



INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU

Dirección de Sismología - CNDG



EL TERREMOTO DE PISCO (PERU) DEL 15 DE AGOSTO DE 2007 (7.9 Mw)



Hernando Tavera
Editor

Estación HUA



LIMA - PERU
2008

Instituto Geofísico del Perú
Dirección de Sismología - CNDG

Calle Badajos 169 - Urb. Mayorazgo IV Etapa
Ate - Lima - Perú
Teléfono: 51-1-3172300
www.igp.gob.pe

*Las opiniones expresadas en los trabajos
publicados en este volumen son de exclusiva
responsabilidad de los respectivos autores*

IMPRESO: Lima, Junio 2008



".....Ustedes ya escucharon y vivieron el peligro
Fueron los terremotos de Nazca de 1996
De Arequipa del 2001 y Pisco del 2007
Ellos nos mostraron que tan vulnerables somos
Sin embargo, todas las ciudades y pueblos afectados
Con la fuerza de sus gentes se han levantado
Llevan la frente en alto y el pecho erguido
Como quien dice, Aquí estamos regresen....

Ustedes que a la distancia lo vieron todo
No sigan allí sentados, dejen de decir que todo ya pasó
Tampoco vale recordar, porque eso es lamentar
Vean la realidad de nuestras ciudades, de nuestras gentes
Después de ocurrido los terremotos, QUE hemos aprendido
Ellos podrían repetirse en cualquier punto del país
Y otra vez sentiremos el dolor del desastre
La impotencia por nada poder hacer

El Perú es un país de TERREMOTOS
Su historia nos ha mostrado que solo es cuestión de tiempo
No cerremos los ojos ante la realidad
Así que, empecemos a trabajar y ha prepararnos
Debemos vencerlos, somos inteligentes
Solo es un TERREMOTO, nada mas....."

H.T.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro especial agradecimiento al Dr. Ronald Woodman, Presidente Ejecutivo del IGP, por el apoyo brindado para la edición del presente volumen y por las continuas discusiones sobre el Terremoto de Pisco que nos han permitido tener mayor visión y objetivos ambiciosos para concluir los estudios programados por la Dirección de Sismología. Al Dr. Hernán Montes, Director Técnico del IGP, por el apoyo brindado para la ejecución de los trabajos de campo y posteriores estudios. A la MsC. Isabel Bernal por su apoyo en la revisión y comentarios a los artículos incluidos en este volumen. Al personal de Redes Geofísicas del IGP por su apoyo en la pronta disponibilidad de los datos sísmicos y a la Dirección de Administración por el importante apoyo logístico para la ejecución de los diversos trabajos de campo.

A los Drs. Laurence Audin y Hugo Perfettini por su apoyo en los trabajos de campo y por sus discusiones sobre la génesis de los terremotos en el Perú. Sus conocimientos e inquietudes sumados a los nuestros, permitieron explicar el proceso geodinámico pre-sísmico, co-sísmico y post-sísmico del Terremoto de Pisco.

Nuestro reconocimiento al apoyo recibido de Cooperazione Internazionale (COOPI), Regione Toscana y Regione Lombardia para la edición de los primeros 50 ejemplares del presente volumen, lo cual nos permite iniciar su difusión.

A todas las personas entrevistadas en los departamentos de Ica, Huancavelica, Ayacucho y Lima, que a pesar de las circunstancias en que se encontraban, permitieron el acceso a sus viviendas y respondieron cordialmente a nuestras preguntas.

Nuestro agradecimiento a los responsables de las redes sísmicas de Ecuador, Bolivia, Colombia, Brasil, Chile y Argentina por enviarnos información sísmica del terremoto de Pisco. Al consorcio IRIS de la red sísmica mundial por la pronta disponibilidad de información para el estudio de la fuente sísmica.

PRESENTACION

Al ocaso del día 15 de Agosto de 2007 (18 horas y 40 minutos, Hora Local), nuevamente el Perú es afectado por un terremoto de gran magnitud (7.9Mw) que produjo muerte y destrucción en las ciudades y localidades de Pisco, Chincha e Ica, en donde se llegó a evaluar intensidades de VII-VIII en la escala de Mercalli Modificada. Este terremoto, a diferencia de otros ocurridos en Perú en los últimos 100 años, se caracterizó por presentar al menos dos frentes de liberación de energía con la propagación unilateral de la ruptura en dirección SE a una velocidad del orden de 2.4 km/seg. Asimismo, se ha registrado aproximadamente 4,500 replicas cuyos epicentros se distribuyen sobre un área de 170x140 km² paralela a la línea de costa.

La ocurrencia del Terremoto de Pisco ha permitido al personal del Instituto Geofísico del Perú (IGP), ejecutar diversos trabajos de campo para recopilar información sísmica, geológica, de tsunamis, suelos, daños y efectos, para su posterior análisis y evaluación a fin de conocer la génesis del terremoto, el desarrollo de su proceso de ruptura y sus efectos secundarios. Es importante indicar que el terremoto de Pisco se constituye como el más grande de los ocurridos en esta área en los últimos 290 años.

Los diversos estudios realizados por la Dirección de Sismología del IGP (DIRSIS) consideran el reprocesamiento de los parámetros hipocentrales del terremoto principal y réplicas mayores, así como el análisis espacio-tiempo de las replicas menores, la evaluación *in situ* de los daños y efectos causados por el terremoto, las aceleraciones del suelo registradas en Ica y Lima, las características del tsunami que afectó a las localidades cercanas al epicentro y los efectos geológicos observados en campo. Por otro lado, la rápida disponibilidad de la información permitió que la DIRSIS en 72 horas distribuya en impreso y por el *website* el informe preliminar detallado de las características del terremoto, además de la edición de un póster que resumía los resultados obtenidos. Asimismo, estos resultados fueron presentados internacionalmente en la reunión de la AGU (*American Geophysical Union*) realizada en la ciudad de San Francisco (EEUU) en Diciembre de 2007. Del mismo modo, los resultados obtenidos en cada estudio han sido tema de varias exposiciones en el

ámbito nacional en las cuales la DIRSIS ha representado al Instituto Geofísico del Perú.

Después de aproximadamente ocho meses de ocurrido el Terremoto de Pisco, la DIRSIS concluye con parte de los estudios programados y procede a editar el presente Informe 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 este gran terremoto. El presente informe multitemático consta de 27 trabajos de investigación estructurados a manera de artículos, los mismos que han sido elaborados por investigadores del Instituto Geofísico del Perú, además de los presentados por investigadores de la Pontificia Universidad Católica del Perú, Universidad Autónoma de México, Universidad de Chile, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial, Institute de Recherche pour le Developpement en Perú 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 de Pisco a nivel regional. A la fecha se ha iniciado otros estudios cuyos resultados permitirán complementar los obtenidos preliminarmente y serán publicados en revistas especializadas en cada tema.

Acompañan al presente informe a manera de anexos, copia del artículo publicado por Tavera y Bernal (2005) en el Boletín de la Sociedad Geológica del Perú sobre el análisis y evaluación de las lagunas sísmicas y áreas de ruptura en el borde occidental el Perú. En este estudio, los autores mostraron la presencia de un área de 150 km ubicada frente a la ciudad de Pisco que debería experimentar ruptura en el futuro. Asimismo, un listado de preguntas y respuestas sobre las características del terremoto de Pisco que ayudaran a disipar las dudas e incertidumbres existentes en la población.

El presente Informe tiene como título “El Terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007 - Perú” y esperamos que la serie de artículos que se presentan cumplan el objetivo de incrementar nuestro conocimiento sobre uno de los mayores peligros a los cuales estamos expuestos, los *TERREMOTOS*.

Hernando Tavera
Director
Dirección de Sismología

INTRODUCCION

Agosto de 2007, a horas 18 con 45 minutos de la tarde (Hora Local), la región central del Perú experimento nuevamente la furia con que la naturaleza actúa, en esta oportunidad mediante la ocurrencia de un terremoto de los mas grandes producidos en los últimos 290 años. El terremoto, hoy conocido como de “Pisco”, tuvo una magnitud de 7.0 en la escala de Richter (ML) y de 7.9 en la escala de magnitud momento (Mw), y produjo muerte y destrucción en las ciudades de Pisco y Chincha en donde se llevo a evaluar intensidades de VIII en la escala de Mercalli Modificada (MM). El radio de acción del terremoto de Pisco fue del orden de 250 km. A la fecha, el Instituto de Defensa Civil (INDECI) y el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) han informado que el sismo deja en la región 32,000 personas afectadas; 595 muertos, daños severos en 12 localidades con mas de 230,000 viviendas dañadas; y 52,150 totalmente destruidas por problemas estructurales (viviendas de adobe muy antiguas y/o de concreto mal diseñadas) en Ica, Pisco y Chincha, y por licuación de suelos principalmente en Chincha (Tambo de Mora) y localidades aledañas.

El inicio del presente siglo, se ha caracterizado por venir acompañado de al menos 5 grandes terremotos ocurridos en el mundo y de ellos, 2 presentaron sus epicentros en el Perú: el terremoto del 23 de Junio de 2001 (8.0Mw) que afectó a la región sur y el 15 de Agosto (7.9Mw) de 2007 conocido como “Terremoto de Pisco”, que por ser el mas reciente aun vive en la memoria de todos los peruanos. Los otros terremotos ocurrieron en Diciembre de 2004 (9.0Mw) afectando a la Isla de Sumatra y que es recordado por el gran tsunami que produjo causando el mayor número de fatalidades hasta hoy conocido por la humanidad a causa de este tipo de peligro. Se debe mencionar a los terremotos de Chile del 2003 y 2005 con magnitudes de 7.7Mw y menor porcentaje de daños y fatalidades personales. Como se puede ver, los terremotos han ocurrido en las regiones reconocidas como de alto potencial sísmico afectando con diferente porcentaje a las ciudades que se encuentran en su entorno y a pesar que hoy en día, existen avances importantes en el conocimiento de los terremotos, en la globalización de la información y, los medios y métodos para mitigar los efectos de los desastres, el terremoto de Pisco deja a todos los peruanos un mayor conocimiento y muchas preguntas sin respuesta que en conjunto, sugieren los caminos a seguir para no ser nuevamente sorprendidos y afectados por este tipo de peligros.

La ocurrencia de terremotos en el Perú ha permitido identificar y delimitar a las dos fuentes de mayor potencial sísmico, la superficie de fricción existente entre las placas oceánica y continental, y la presencia de fallas geológicas en el interior del continente. La primera fuente 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 en este proceso. La historia sísmica permite traer a la memoria los terremotos de 1619, 1746, 1868, 1940, 1942, 1966, 1970, 1974, 1996 entre los que produjeron mayor daño, destrucción y muerte a lo largo de la costa de Perú. La segunda fuente sismogénica está 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, Tambomachay, Ichupampa y Huambo-Cabanaconde entre las principales. La ubicación geográfica de estas fallas sugieren que las ciudades y localidades que pueden ser mayormente afectadas por los terremotos con origen en su proceso de deformación y evolución de la Cordillera de los Andes.

Después de ocurrido el terremoto de Pisco, la globalización de la información permitió al público en general disponer rápidamente a través de INTERNET de la información existente sobre dicho peligro, permitiendo aceptar diversas hipótesis sobre el origen y características del mismo, aunque siempre existe incertidumbre debido al desconocimiento de este campo de la ciencia y principalmente sobre los parámetros físicos que permiten identificar a los terremotos. Por ejemplo, las personas desconocen sobre la existencia de diversos procedimientos para medir la magnitud de los sismos, ya que ellos dependen del tipo de información que se utiliza y de la distancia a la cual se la obtiene. De ahí que para el terremoto de Pisco se difundieran diferentes valores de magnitud proporcionados por una u otra institución. La Escala de Richter (mundialmente conocida) es válida para sismos que ocurren a distancias menores a 600 km (distancia epicentro-estación) y por lo tanto, para el sismo de Pisco es la única que fue utilizada en el Perú. Con información obtenida a mayores distancias, es posible calcular la magnitud del sismo en las escalas de Ondas de Volumen (mb), Ondas Superficiales (Ms), Magnitud Energía (Me) o Magnitud Momento (Mw). Las agencias internacionales de manera aleatoria difundieron valores de magnitud en la

escala Ms y Mw, siendo ambos mayores a la magnitud de Richter, lo cual es ampliamente conocido.

Con el terremoto de Pisco, se ha comprendido que las tareas de prevención y mitigación de los daños producidos por este tipo de peligros, conlleva a realizar una continua educación de la población a todos los niveles a los cuales sea posible (hogares, colegios, universidades, empresas, instituciones publicas, departamentos, provincias, distritos, urbanizaciones y asentamientos humanos) y realizar campañas de difusión a nivel local y nacional; además de evaluaciones físicas de las viviendas o edificaciones con el asesoramiento respectivo. Las experiencias vividas por poblaciones como la de Tambo de Mora en Chincha, permiten considerar que es vital realizar un control adecuado sobre la expansión urbana para que no se desarrolle en zonas geológicamente inestables o en Pisco, utilizando en su construcción material inadecuado. Evidentemente, la tarea de mitigar el desastre es la que mejor se viene desarrollando; sin embargo, debemos suponer que aun falta mucho por hacer y aprender.

Una vez mas, ha sido sobresaliente el esfuerzo de las diferentes instituciones nacionales e internacionales, privadas y públicas para realizar estudios del terremoto de Pisco dentro del campo de su competencia, información importante para los fines de desarrollo científico y socio-económico del país; sin embargo, aun persisten otras instituciones nacionales/internacionales o personas naturales que cometen errores al presentar información de acceso libre por INTERNET, que al ser inadecuada o sin sustento técnico-científico mayormente confunden a la población.

Este nuevo terremoto debe ser considerado como punto de partida para que instituciones, ONGS y universidades que desarrollan investigación en Ciencias de la Tierra unan esfuerzos para concretizar estudios multidisciplinarios de manera eficaz y que en conjunto ayuden en la toma de decisiones a las autoridades competentes en cada campo de desarrollo.

Una vez ocurrido el terremoto de Pisco, la Alta Dirección del Instituto Geofísico del Perú (IGP) encarga a la Dirección de Sismología (DIRSIS-IGP) 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 zona sur de la región central de Perú. Así, la DIRSIS-IGP 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, y los daños y efectos que este produjo en superficie y en las viviendas de las ciudades y localidades afectadas. Uno de los grupos procedió 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 Ica y Lima. Un segundo grupo procede a evaluar los efectos causados por el tsunami en la costa de Ica y sur de Lima, como complemento del importante trabajo preliminar realizado por el Dr. R. Woodman (Presidente Ejecutivo del IGP). Paralelamente, un tercer grupo procede a realizar la visita a las diversas estaciones sísmicas que operan alrededor de la zona afectada por el sismo para recoger la información registrada para su análisis respectivo y así conocer, a partir de las réplicas, el área involucrada en el proceso de ruptura del terremoto. Finalmente, un cuarto grupo permaneció en la sede central del IGP para realizar el análisis y procesamiento de la información sísmica preliminar, la misma que dio origen a un informe sismotectónico que fue punto de partida para todos los estudios que se desarrollaron post-sismo. Esta información fue puesta en el *website* de la DIRSIS-IGP después de 72 horas de ocurrido el terremoto. Asimismo, se editó un Póster con información que resumía las características más importantes del Terremoto de Pisco y que fue enviado a la Reunión Anual de Geofísicos realizado en EEUU en Diciembre de 2007 (San Francisco). Paralelamente a estos estudios, investigadores del IGP procedieron a incrementar los puntos de GPS en la región para un mejor conocimiento de los efectos post-sismos, así como realizar intervenciones para estudiar los efectos del tsunami y geológicos en las localidades mas afectadas por el terremoto.

El programa de intervención post-sísmica desarrollado por el DIRSIS contó con el apoyo de los Drs. Ronald Woodman y Hernán Montes, Presidente Ejecutivo y Director Técnico del IGP. Asimismo, fueron importantes las diversas reuniones técnicas y de coordinación realizadas en instituciones afines al campo de Ciencias de la Tierra con profesionales nacionales y extranjeros. De estas reuniones sobresalen las concretizadas por INDECI dentro de su rol de Prevención y Mitigación de Desastres en el Perú.

Como producto de los trabajos de investigación realizados por el Instituto Geofísico del Perú, en este Informe Especial sobre el Terremoto de Pisco, se presenta los resultados obtenidos en forma de artículos técnicos-científicos a fin de que se tenga conocimiento sobre todos los procesos físicos que se produjeron durante la

ocurrencia del terremoto. Para que el conocimiento involucre otros campos de investigación, se ha invitado a participar en el presente informe a instituciones como la Facultad de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), el Institute de Recherche pour le Developpement (IRD), los Departamentos de Geofísica e Ingeniería Civil de la Universidad de Chile (UDEC), el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Mexico (II-UNAM) y la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA).

INDICE

AGRADECIMIENTOS

PRESENTACION

INTRODUCCION

SISMOLOGIA Y SISMOTECTONICA

Crónica de un Terremoto Anunciado para la Zona Sur de la Región Central de Perú <i>Hernando Tavera</i>	7
El Terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007: Aspectos Sismológicos <i>Hernando Tavera, Isabel Bernal y Henry Salas</i>	13
La Magnitud del Terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007 <i>Isabel Bernal</i>	23
Intensidades Regionales Asociadas al Terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007 <i>Hernando Tavera, Henry Salas, Cesar Jiménez, Luz Arredondo, Rocio Parillo y José Millones</i>	29
Mecanismo de la Fuente para el Terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007 <i>Hernando Tavera</i>	35
Réplicas del Terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007 <i>Hernando Tavera, Henry Salas, Simeón Rodríguez, Ivonne Pérez-Pacheco Rocio Parillo, José Millones, Cesar Jiménez y Luz Arredondo</i>	41
Análisis Espacio-Tiempo de las Réplicas del Terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007 <i>Hernando Tavera y Henry Salas</i>	49
Los Diversos Mecanismos de Ruptura propuestos para el Terremoto de Pisco: Revisión y Análisis <i>Hugo Perfettini</i>	57
El Terremoto de Pisco del 2007, ¿Repetitivo del Terremoto de 1716...? <i>Hernando Tavera</i>	71

INTENSIDADES MACROSISMICAS

Intensidades Macrosismicas en las Areas Urbanas de las Ciudades de Pisco, Chincha e Ica debidas al sismo del 15 de Agosto de 2007 <i>Consuelo Agüero, Hernando Tavera, Efrain Fernandez, Porfirio Huaco, Carmen Talavera y Luz Arredondo</i>	77
---	----

Intensidades y Daños del Terremoto de Pisco del 15 de Agosto del 2007 <i>Maximiliano Astroza</i>	125
Daños por el Terremoto del 15 de Agosto del 2007 – Perú <i>Julio C. Cuenca</i>	149
INGENIERIA SISMICA	
Aceleraciones Máximas registradas en la Ciudad de Lima: Terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007 <i>Isabel Bernal y Hernando Tavera</i>	177
Aceleraciones Máximas registradas en la Ciudad de Ica: Terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007 <i>Isabel Bernal y Hernando Tavera</i>	197
Efectos que Incidieron en el Comportamiento de las Construcciones de Albañilería en el Sismo de Pisco del 15-08-07 <i>Angel San Bartolomé</i>	211
Comportamiento de las Construcciones de Adobe durante el Sismo de Pisco del 15 de Agosto del 2007 <i>Marcial Blondet</i>	227
El Terremoto del 15 de Agosto de 2007 (Mw=7.9), Pisco, Peru. Mapas de Clasificación de Terrenos con fines de Diseño Sismico para las Ciudades de Pisco, Ica y Lima-Callao <i>Javier Lermo, Marlene Limaymanta, Yanet Antayhua y Fernando Lazares</i>	233
FENOMENOS LUMINOSOS	
Enigmas de la Naturaleza: Las Luces asociadas al Terremoto de Pisco del 15 de Agosto, 2007 <i>Isabel Bernal, Hernando Tavera y Bilha Herrera</i>	269
Testimonios y Fenomenología de la Luminiscencia Cosmica del Terremoto de Pisco del 15 de Agosto 2007 <i>Leonidas Ocola y Ursula Torres</i>	295
TSUNAMI	
Observaciones del Tsunami asociado con el Terremoto de Pisco del 15 de Agosto del 2007 <i>Ronald Woodman</i>	351
Características Generales del Tsunami del 15 de Agosto de 2007 <i>Sheila Sauri, Hernando Tavera, Geremias Mónica y Bilha Herrera</i>	371
Informe sobre las Alturas de Run-up alcanzadas por el Tsunami asociado al Sismo Mw=8.0 del 15 de Agosto de 2007 en la zona de Pisco, Perú. <i>Sergio Barrientos</i>	387

Aspectos Físicos del Maremoto de Pisco del 15 de Agosto 2007 y las Inundaciones Máximas <i>Leonidas Ocola</i>	395
--	-----

GEODESIA SATELITAL Y TELEDETECCION

Geodesia Satelital y el Terremoto de Pisco (15/08/07) <i>Edmundo Norabuena, John Salazar, Wendy Quiroz, k. Pencsik y T. Dixon</i>	421
--	-----

Contribución de la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica en la Evaluación de los Daños producidos en la ciudad de Pisco por el Terremoto del 15 de Agosto del 2007 <i>Alex Zambrano, Gustavo Henriquez y Katherine Gonzales</i>	423
---	-----

GEOLOGIA Y GEODINAMICA

Evaluación Geológica del Area de la Hacienda Tupac Amaru – Pisco: Efectos Geológicos del Sismo del 15 de Agosto de 2007 <i>Juan Carlos Gómez y Ricardo Zamudio</i>	431
---	-----

Morfología, tsunamis y licuefacción durante el sismo del 15 de Agosto de 2007. <i>Laurence Audin y Daniel Farber</i>	439
---	-----

ANEXOS

Preguntas y Respuestas <i>Hernando Tavera</i>	479
--	-----

“Análisis de la Distribución Espacial de los Grandes Sismos y Áreas de Ruptura en el Borde Occidental de Perú”. Volumen Jubilar N°6 de la Sociedad Geológica del Perú. <i>Hernando Tavera y Isabel Bernal</i>	487
---	-----

SISMOLOGIA Y SISMOTECTONICA

CRONICA DE UN TERREMOTO ANUNCIADO PARA LA ZONA SUR DE LA REGION CENTRAL DE PERU

Hernando Tavera
Dirección de Sismología

RESUMEN

La ocurrencia continua de grandes terremotos en el borde occidental de la región central de Perú ha despertado el interés de muchos investigadores para estudiar en detalle las características sismotectónicas de esta región, que por su heterogeneidad, en los últimos 70 años, ha dado origen a 7 terremotos de gran magnitud (1940, 1942, 1966, 1970, 1974, 1996(2)), siendo los dos últimos los ocurridos en 1974 y 1996. Todos estos terremotos han producido intensidades del orden de VII en la escala de Mercalli Modificada. La distribución epicentral y áreas de ruptura de estos terremotos definieron la existencia, entre la localidad de Chilca y el extremo norte de Ica, de una área con longitud para su eje mayor de 150 km que no ha experimentado ruptura alguna. Según Tavera y Bernal (2005), esta área presenta las condiciones sismotectónicas necesarias para dar origen, en un futuro, a un gran terremoto con magnitud del orden de 7.0 ML.

INTRODUCCION

En el Perú, los grandes terremotos tienen su origen en el proceso de convergencia y subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, siendo este continuo en la escala del tiempo geológico, de ahí que exista una fuerte fricción entre las placas con la consecuente liberación de la energía acumulada en forma de ondas elásticas en diversos periodos de tiempo. 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 o de ruptura. Estas superficies de fricción no son visibles debido a que se encuentran por debajo del nivel medio del mar, pero es posible proyectarlas en superficie a fin de evaluar de manera indirecta la ubicación de las diversas áreas de ruptura.

Dentro de todo el proceso sismotectónico presente en el Perú y principalmente el relacionado con la subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, la región central resulta ser muy heterogénea debido a que durante los últimos 70 años, ha dado origen a 7 terremotos de gran magnitud ocurridos en los años 1940, 1942, 1966, 1970, 1974 y dos en 1996, todos con magnitudes superiores a 7.0 Ms y valores de intensidad mayores a VII en la escala de Mercalli Modificada (MM). Durante este

mismo periodo de tiempo, en la región sur de Perú solo se tiene la ocurrencia del terremoto de Junio del 2001 (8.0Ms) y en la región norte, la ausencia total de terremotos de estas magnitudes.

Dentro de este contexto es importante realizar una revisión de los epicentros y áreas de ruptura de los terremotos ocurridos en la región central de Perú a fin de identificar la posible existencia de otras áreas que podrían comprometer en el futuro la ocurrencia de otro terremoto en esta región.

AREAS DE RUPTURA

El estudio y análisis de la distribución espacial de los grandes terremotos y sus respectivas áreas de ruptura en el borde occidental de la región central de Perú, permitió observar lo siguiente (Figura 1):

- .- Durante los últimos 70 años, la ocurrencia de grandes terremotos se inicia en el año 1940 con un terremoto de magnitud 7.8 Ms con epicentro cerca de la línea de costa en la localidad de Ancon (zona norte del departamento de Lima) y luego, en su extremo opuesto, en el año 1942 ocurre otro terremoto conocido como de Nazca con una magnitud de 8.0Ms. En el año 1966 un nuevo terremoto de magnitud 8.1 Ms ocurre en la zona norte de la región, pero mas hacia el sur del área de ruptura del terremoto de 1970 (7.6 Ms), siendo este último el mas famoso de los terremotos peruanos por la gran cantidad de personas desaparecidas y muertas en la ciudad de Yungay (Ancash) a consecuencia de un alud de agua y barro procedente del Nevado Huascarán.
- .- Posterior a los terremotos indicados, en el año 1974 ocurre otro de magnitud 8.0 Ms con epicentro frente a la ciudad de Lima y 22 años después otro frente a la ciudad de Nazca con magnitud 7.6 Ms.
- .- La distribución espacial de las áreas de ruptura de estos terremotos cubren prácticamente toda la región central de Perú, dejando marcada la existencia de un área sin ocurrencia de terremotos recientes y que se ubica entre las localidades de Chilca (sur de Lima) y Pisco (Ica) con una longitud de 150 km aproximadamente.

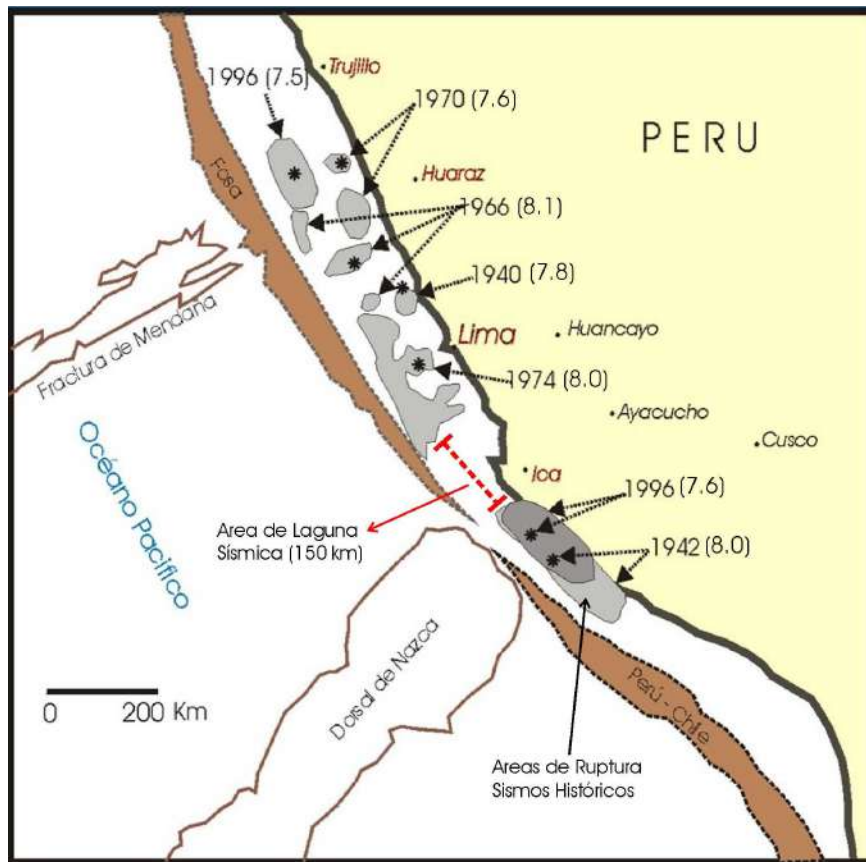


Figura 1.- Distribución espacial de los grandes terremotos y sus áreas de ruptura en la Región central de Perú. La barra en rojo indica el área de la laguna sísmica presente en la zona sur de Lima y norte de Ica. Los valores entre paréntesis indican la magnitud de los sismos en la escala de magnitud Ms.

Algunos autores como Tavera y Bernal (2005) realizaron una revisión detallada de estas áreas de ruptura y remarcaron la existencia del área de 150 km de longitud sin ruptura, como la más indicada para producir un terremoto en el futuro. Dichos autores indicaron que el terremoto tendría una magnitud probable de 7.0 Ms y que produciría daños principalmente entre la localidad de Chilca y la ciudad de Pisco; sin embargo, en sus investigaciones remarcaron que no es posible indicar la fecha en que podría ocurrir este terremoto.

SISMICIDAD RECIENTE

A fin de analizar las características espaciales de las sismicidad reciente en la región central de Perú, en la Figura 2 se presenta los epicentros de terremotos ocurridos entre los años de 1990 y 2006, todos con magnitudes igual y mayores a 4.5ML. En dicha figura se observa que los terremotos con foco superficial (círculos)

asociados directamente con el proceso de fricción de placas se concentran a lo largo de la línea de costa mostrando áreas pequeñas sin ocurrencia de terremotos que por sus dimensiones no son significantes. Sismicidad superficial también esta presente en el interior del continente asociado a la deformación cortical y a la presencia de fallas geológicas. En la misma figura, la distribución espacial de los sismos de foco intermedio (cuadrados), muestra un incremento notable del número de terremotos al sur de la localidad de Chilca (círculo en rojo) y sugiere que en esta región el régimen de deformación se ha incrementado en el interior de la placa de Nazca por debajo de la superficie de contacto de placas, lo que podría acelerar la ocurrencia de un terremoto de gran magnitud en superficie.

Estas características en la distribución espacial de los terremotos, apoyan las observaciones hechas por Tavera y Bernal (2005) sobre la posibilidad de que en esta zona podría ocurrir un terremoto de gran magnitud en el futuro.

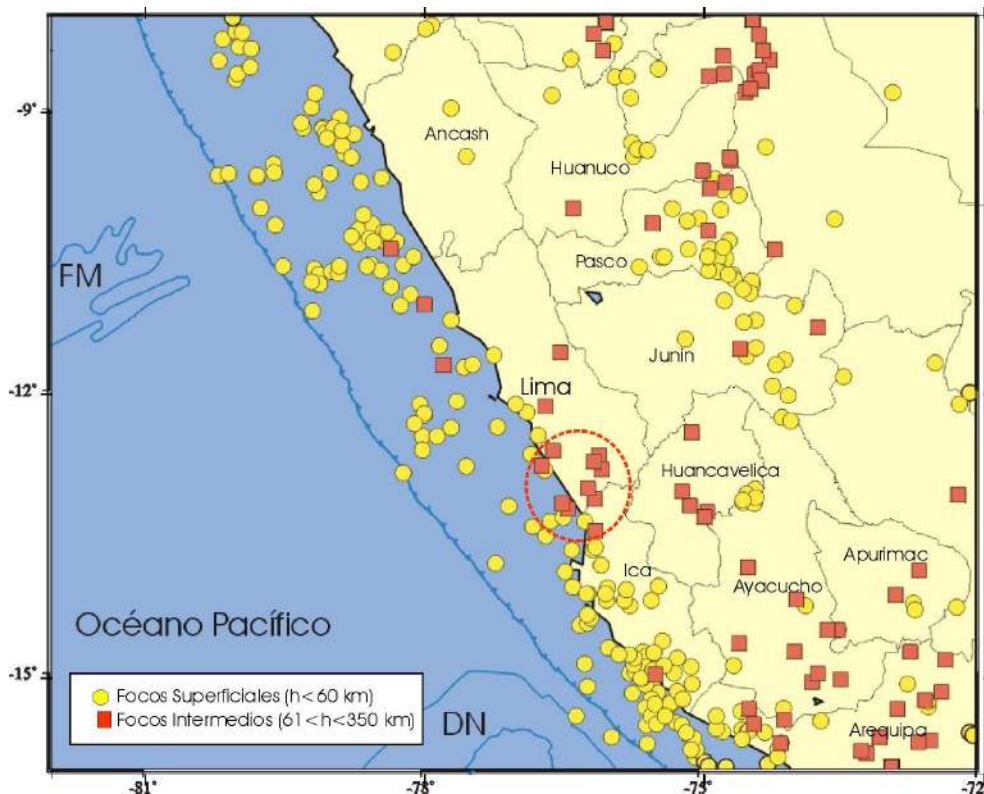


Figura 2.- Sismicidad en la región central de Perú ocurrida entre los años 1990 y 2006, todos con magnitudes mayores e iguales a 4.5 ML. Obsérvese que en la zona sur de la región central de Perú (encerrada en círculo rojo), se incremento la ocurrencia de terremotos con focos a profundidades intermedias.

DISCUSION

Los resultados expuestos por Tavera y Bernal (2005) y las características de la distribución espacial de los terremotos descritos en este estudio, confirman la existencia, en la zona sur de la región central de Perú, de un área de 150 km de longitud para su eje mayor con grandes posibilidades de producir un terremoto de gran magnitud en el futuro. Esta apreciación se basa en el método de predicción tectónica y aunque resulta ser incierto para el pronóstico de terremotos, de todos los métodos conocidos es el de mayor aceptación en razón que al menos permite conocer con cierta certeza el lugar donde ocurriría el terremoto y su posible magnitud. Debe entenderse que este método requiere conocer con exactitud los parámetros hipocentrales de los grandes terremotos y las geometrías de sus áreas de ruptura, ya que solo así será posible identificar la existencia de otras áreas con posibilidades de producir un terremoto en el futuro. De acuerdo a esto, en la zona sur de la región central de Perú, entre la localidad de Chilca y la ciudad de Pisco, existía un área que reúne todas las condiciones para dar origen a un gran terremoto.

El trabajo realizado por Tavera y Bernal (2005) fue publicado en el Volumen Jubilar N°6 del Boletín de la Sociedad Geológica de I Perú y es anexado en el presente volumen.

EL TERREMOTO DE PISCO DEL 15 DE AGOSTO DE 2007

El día miércoles 15 de Agosto del 2007 (18horas 40 minutos, hora local), la zona sur de la región central de Perú fue afectada por un terremoto de magnitud Richter (ML) igual a 7.0 y magnitud Momento (Mw) igual a 7.9, produciendo muerte, destrucción y desolación en las ciudades de Pisco, Ica, Chincha y muchas otras localidades circundantes. La intensidad máxima observada en la escala de Mercalli Modificada fue de VII-VIII en la ciudad de Pisco. El terremoto se caracterizó por presentar gran duración (210 segundos aproximadamente) y la posible presencia de dos frentes de ruptura que sumados a sus réplicas definen un área rectangular de ruptura paralela a la línea de costa y cuyo eje mayor tendría una longitud de 160 km aproximadamente. Esta área se ubica entre la localidad de Chilca y la ciudad de Pisco. El terremoto del 15 de Agosto es conocido como "Terremoto de Pisco" y se constituye como uno de los más grandes que se hayan producido en esta región en los últimos 290 años.

BIBLIOGRAFIA

Comte et al., (1991). Natural Hazards, 4, 23-44.

Tavera et al., (1998). Revista Geofísica, IPGH, N°9, 143-163.

Tavera H. y Bernal, I. (2005). Volumen 6, Números Especiales del Boletín de la Sociedad Geológica del Perú.

EL TERREMOTO DE PISCO DEL 15 DE AGOSTO DE 2007: ASPECTOS SISMOLOGICOS

Hernando Tavera
Isabel Bernal y Henry Salas
Dirección de Sismología – CNDG

RESUMEN

El 15 de Agosto de 2007 a horas 18 y 40 minutos (hora local), la zona sur de la región central de Perú fue afectada por un terremoto de magnitud 7.0ML (Richter) que en algunos segundos produjo muerte y destrucción en las ciudades de Pisco, Ica y Chincha en donde se evaluaron intensidades máximas de VII-VIII en la escala de Mercalli Modificada (MM). El terremoto produjo intensidades de V (MM) en la ciudad de Lima y fue sentido hasta las ciudades de Piura, Arequipa, Cusco y Pucallpa con intensidades del orden de II-III (MM). Este sismo tuvo como características principales su gran duración y el aparente proceso complejo de ruptura que experimento, para luego ser seguido por un gran número de réplicas con magnitudes que no sobrepasaron el grado 6.5ML. En este estudio se resume las principales características del terremoto en relación a sus parámetros hipocentrales, orientación de la fuente, réplicas e intensidades regionales. El terremoto del 15 de Agosto se constituye como el de mayor magnitud y duración ocurrido en esta región en los últimos 290 años.

INTRODUCCION

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 centro, han sido descritas por diversos investigadores (Grange et al., 1984; Schneider y Sacks, 1987; Cahill y Isacks, 1992; Tavera y Buforn, 2001), siendo los principales resultados relacionados con la distribución de los focos sísmicos en superficie y en función de la profundidad de sus focos, 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 origen a los procesos compresivos que se desarrollan sobre la superficie de contacto de las placas de Nazca y Sudamericana. Estos terremotos se presentan con mayor frecuencia en la región central de Perú y los

de magnitudes mayores o iguales a 4.5 ML son sentidos en superficie con intensidades mínimas del orden de III en la escala Mercalli Modificada (MM) como mínimo. Recientemente, en el año 1996 en esta región ocurrió un terremoto de magnitud 7.6Mw que produjo intensidades de VII (MM) en la ciudad de Nazca con daños y destrucción en un radio de 250 km aproximadamente.

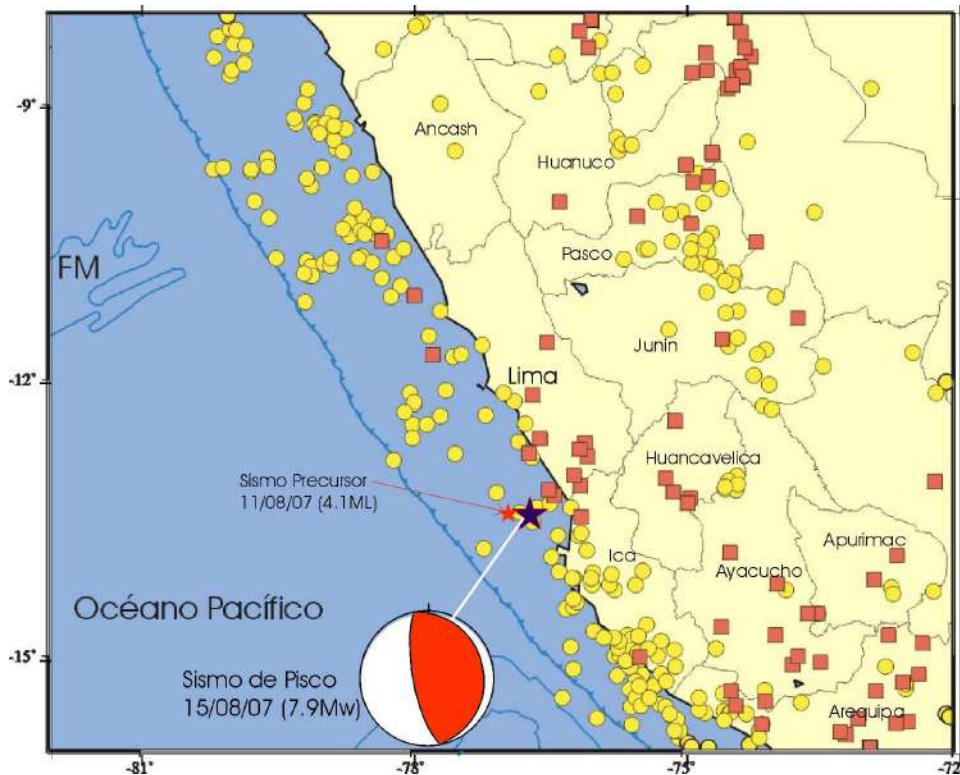


Figura 1.- Mapa de sismicidad para la región central del Perú con sismos ocurridos entre los años 1995 y 2006 ($ML > 4.5$). Los círculos indican sismos con foco superficial ($h < 60$ km) y los cuadrados, sismos con foco intermedio ($61 > h > 350$ km). La estrella en azul indica la ubicación del epicentro del sismo de Pisco y la roja, el epicentro de un posible evento precursor.

Asimismo, es importante resaltar la presencia de sismos con focos intermedios que se concentran principalmente en la zona andina y subandina sugiriendo que a estos niveles de profundidad y distancia desde la fosa, la deformación en el interior de la placa de Nazca es bastante importante. Sin embargo, se debe notar que cerca de la línea de costa y en la proximidad del límite departamental entre Lima e Ica, se ha producido gran concentración de sismos con foco intermedio dentro de un área circular de 50 km de radio aproximadamente. Dentro del contexto geodinámico, los sismos intermedios se producen por el estiramiento de la placa de Nazca en su afán de avanzar e introducirse en el manto y al existir resistencia sobre la superficie de contacto de ambas placas, se incrementa la deformación a niveles de profundidad

mayores a 60 km. Estas simples características en la distribución espacial de los sismos podrían sugerir que en esta zona se está produciendo un proceso anómalo de deformación que podría producir una mayor liberación de energía cuando los esfuerzos sobrepasen el nivel de resistencia de las placas a su desplazamiento.

El día miércoles 15 de Agosto de 2007 y cerca de las 18 horas con 40 minutos (hora local), un terremoto de magnitud 7.0 en la escala de Richter afectó de consideración a las ciudades de Pisco, Ica, Chincha y otras aledañas en un radio de aproximadamente 250 km. El epicentro del terremoto fue localizado a 74 km al Oeste de la ciudad de Pisco; es decir, el terremoto tuvo su origen en el proceso de convergencia y subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamérica. Este terremoto se constituye como uno de los más grandes ocurridos en esta región en los últimos 290 años y en su desarrollo presentó características importantes como su gran duración, el aparente complejo proceso de ruptura, el modo de propagación de la energía y la generación de un tsunami de carácter regional.

En este trabajo se presenta los parámetros hipocentrales del terremoto del 15 de Agosto, sus posibles implicancias sismotectónicas y efectos del mismo basándose en los cálculos y evaluaciones preliminares realizados por la Dirección de Sismología del Instituto Geofísico del Perú.

EL TERREMOTO DE PISCO DEL 15 DE AGOSTO DE 2007

Parámetros hipocentrales

El terremoto del 15 de Agosto presentó su epicentro, según los reportes iniciales del Instituto Geofísico del Perú (IGP), a 60 km en dirección Oeste de la ciudad de Pisco. Sin embargo, la disponibilidad de mayor información proveniente de las estaciones que integran la Red Sísmica Nacional, ha permitido recalcular sus parámetros hipocentrales (Figura 1):

<i>Hora Origen</i>	:	<i>23 horas, 40 minutos, 53.6 segundos (GMT)</i> <i>18 horas, 40 minutos, 53.6 segundo (hora local)</i>
<i>Latitud</i>	:	<i>-13.49° Sur</i>
<i>Longitud</i>	:	<i>-76.85° Oeste</i>
<i>Profundidad</i>	:	<i>26 km</i>
<i>Magnitud</i>	:	<i>7.0 ML (Richter)</i>
<i>Ímáxima</i>	:	<i>VII-VIII en Pisco e Ica.</i>

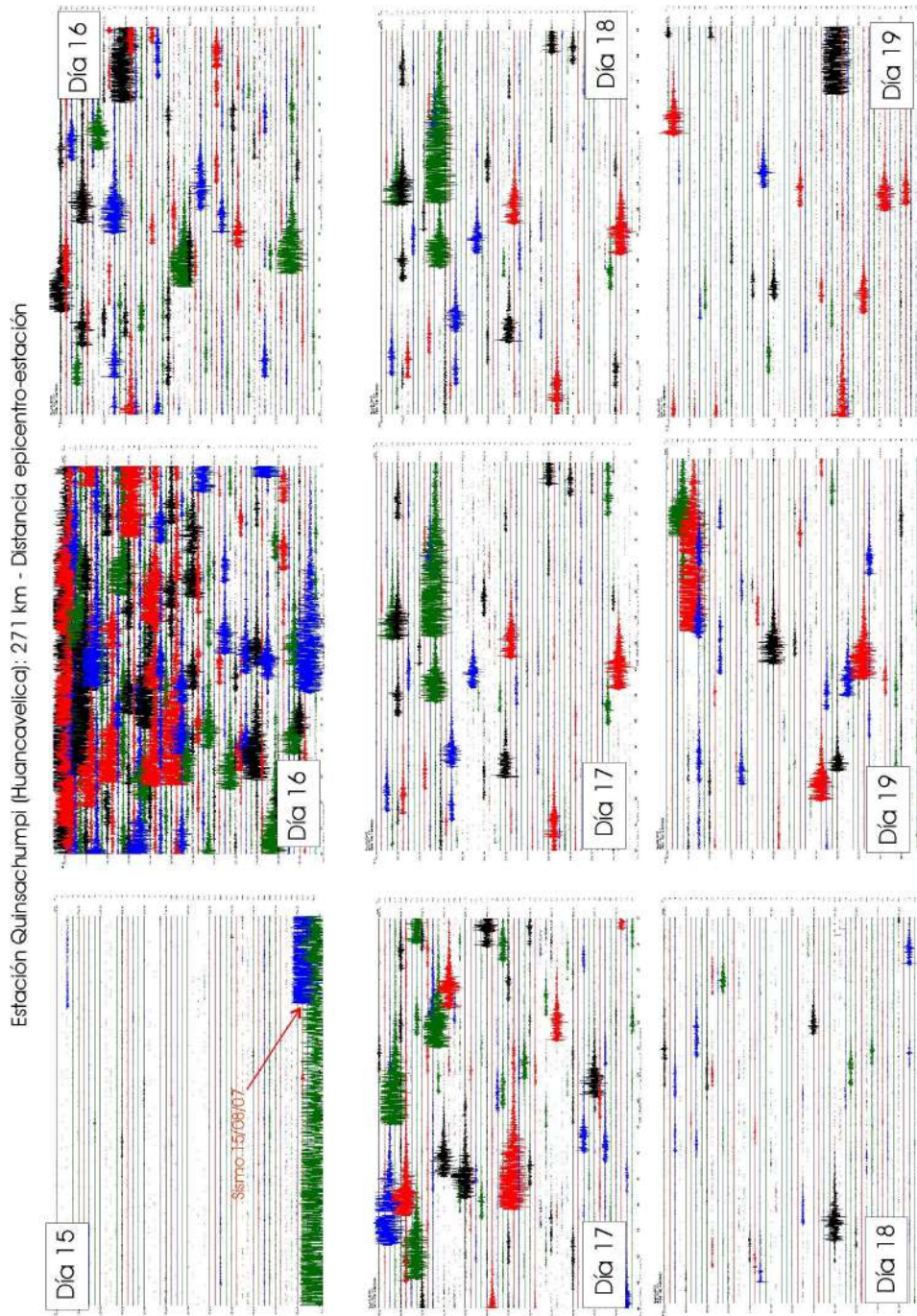


Figura 2.- Sismogramas de la estación QCH (Huancavelica, 271 km) que muestran la frecuencia de réplicas entre los días 16 y 19 de Agosto. Obsérvese que el número de replicas disminuye con el pasar de las horas y días.

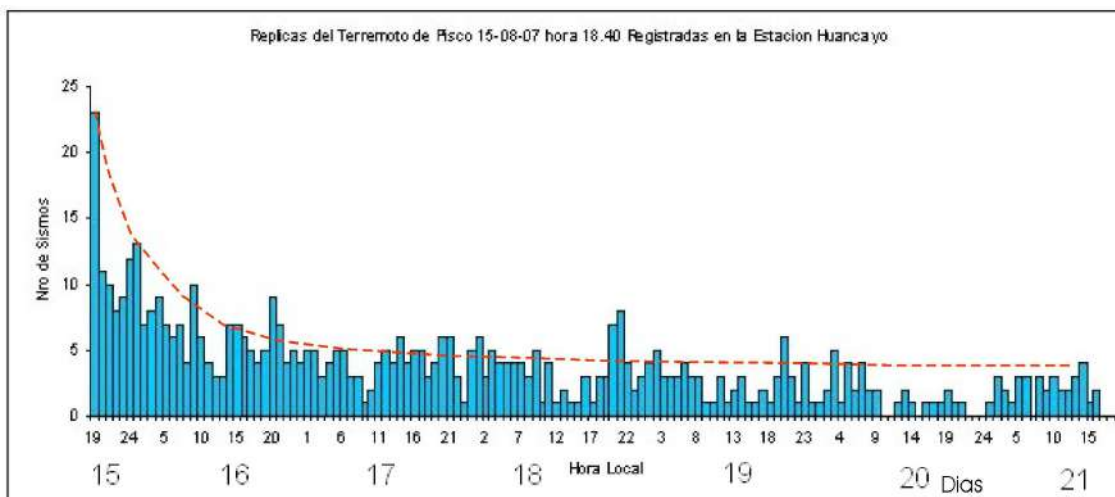


Figura 3.- Frecuencia de réplicas del terremoto de Pisco registradas en la estación sísmica de Huancayo (236 km distancia epicentro-estación) entre los días del 15 al 21 de Agosto de 2007.

Según estos parámetros, el epicentro se ubico a 74 km en dirección Oeste de la ciudad de Pisco. 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 a distancias telesísmicas.

Réplicas

Después de ocurrido el terremoto de Pisco, le siguió un numero importante de réplicas que al día 30 de Agosto de 2007 sobrepasan las 4,500 y de estas, solo 34 fueron sentidas en Pisco con intensidades entre III y V (MM), y en la ciudad de Lima Metropolitana 18 de ellas fueron sentidas con intensidades mínimas de III (MM). De estas réplicas, las mayores en un número de 8 presentaron magnitudes entre 5.6 y 6.3 ML. En la Figura 2 se muestra dos ejemplos de los sismogramas de la estación sísmica de Quinsachumpi (QCH) en Huancavelica con los registros de las replicas ocurrida entre los días 16 y 19 de Agosto de 2007. En dicha figura se observa que el numero de replicas registradas es mayor inmediatamente después de ocurrido el terremoto y estas van disminuyendo conforme se incrementan los días, lo cual es notorio en la Figura 3 se presenta la frecuencia del número de réplicas registradas, en este caso, en la estación sísmica de Huancayo (HUA) durante los días del 15 al 21 de Agosto de 2007.

Características de la Señal Sísmica

Los registros del terremoto del 15 de Agosto obtenidos de la red sísmica nacional, han permitido inicialmente observar el carácter complejo del proceso de ruptura que experimento este terremoto y que sugiere la posible ocurrencia de rupturas aleatorias propias de terremotos de magnitudes elevadas con origen en el proceso de subduccion. Considerando que a distancias cortas prevalecen las altas frecuencias emitidas por los sismos, es difícil poder identificar posibles características de la fuente sísmica y tan solo tener una idea de la duración de su registro o del tiempo que fue sensible para un determinado individuo. En la Figura 4.a se presenta el registro en velocidad y desplazamiento del terremoto en la estación de Toquepala ubicada a 780 km en dirección SE con relación al epicentro y en el se observa que el grupo de la fase P tendría una duración del orden de 210 segundos, tiempo durante el cual es posible identificar la presencia de varios cambios de frecuencias y amplitudes equivalentes a igual número de fases sísmicas resultantes de su reflexión y refracción en el interior de la corteza.

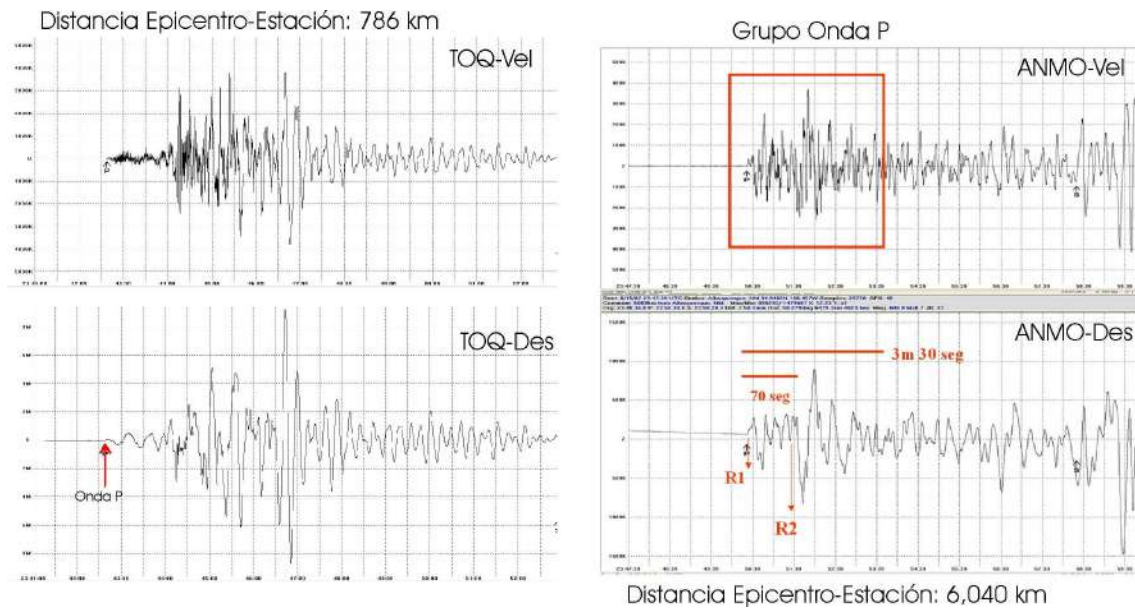


Figura 4.- Registros en velocidad (Vel) y desplazamiento (Des) para el terremoto de Pisco.
.a.) Estación TOQ, la señal sísmica es compleja con contenido de altas frecuencias.
.b.) Estación ANMO, la señal corresponde al grupo de la onda P y esta libre de otros tipos de ondas. Obsérvese la duración del proceso de ruptura y el cambio en la amplitud de la señal que sugiere la ocurrencia de dos rupturas aleatorias (R1 y R2).

Para lograr estudiar las características de la fuente propiamente dicha, es necesario utilizar registros del terremoto obtenidos a distancias mayores a los 3,500 km por ejemplo. En la Figura 4b se presenta el registro del terremoto en velocidad y desplazamiento en la estación Alburquerque (ANMO, EEUU) ubicada a una distancia epicentral de 6,040 km en dirección Norte con respecto al epicentro del terremoto. En este registro es posible observar que el tren de ondas correspondiente a la fase P tiene una duración de aproximadamente 210 segundos y en ella se puede distinguir la presencia de hasta dos cambios importantes de periodos y amplitudes, los mismos que pueden ser asociados a la ocurrencia de rupturas secundarias que se producirían 60-65 segundos después de la primera (R1 y R2). De acuerdo a las características de la señal en el registro, es notorio que para R2 las amplitudes son mayores; por lo tanto, la segunda ruptura habría liberado mayor energía.

Orientación de la Fuente Sísmica y Momento Sísmico Escalar

La orientación de la fuente que dio origen al terremoto del 15 de Agosto 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 de la onda P obtenidas de las estaciones de la red sísmica nacional y mundial por el Instituto Geofísico del Perú. La solución para el mecanismo focal se presenta en la Figura 1 y corresponde a un proceso de deformación del tipo inverso con uno de los planos nodales casi vertical y el otro prácticamente horizontal, ambos orientados en dirección NNO-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 14°) en dirección ENE correspondería al plano de falla. En estas condiciones, el eje de esfuerzo principal o eje de compresión P se orienta en dirección ENE coherente con la dirección de convergencia de las placas en la región central del Perú.

Asimismo, la Universidad de Harvard (método del CMT) ha calculado para el terremoto de Pisco del 15 de Agosto un Momento Sísmico Escalar de $1.1E+21$ Nm, equivalente a una magnitud momento de 7.9Mw.

Intensidades

La información utilizada para evaluar las intensidades regionales producidas por el terremoto del 15 de Agosto, fue obtenida vía línea telefónica después de ocurrido el mismo. Las intensidades máximas fueron evaluadas en VII-VIII (MM) y

estas corresponden a las ciudades de Pisco, Ica y Chincha en donde se produjo el mayor porcentaje de destrucción y numero de personas heridas y muertas. Es importante resaltar que la mayor parte de las viviendas afectadas estuvieron construidas de adobe y quincha, además de otras cuyas paredes y muros de material noble que desde un inicio presentaban fallas estructurales. En general, en dirección Norte (Piura) y Sur (arequipa) el terremoto fue sentido con intensidades de II MM; mientras que, hacia el interior del país el terremoto fue sentido con intensidades de III (MM) en las ciudades de Cusco y Pucallpa.

En la ciudad de Lima, el terremoto fue sentido por un largo periodo de tiempo sin producir daños, pero si la continua oscilación de las viviendas, árboles y tendidos eléctricos que produjeron alarma en la población. En estas condiciones la intensidad evaluada en Lima fue de V (MM). Algunos locales de más de dos pisos ubicados en el Callao presentaron fisuras en sus paredes y daños menores en columnas pudiéndoles corresponder una intensidad del orden de V-VI (MM).

Otros efectos

Ocurrido el terremoto del 15 de Agosto, se produjo efectos secundarios como deslizamientos, derrumbes de tierra y un gran número de fenómenos de licuación de suelos que principalmente dañaron la Carretera Panamericana Sur, dejando casi aislada a las ciudades mas afectadas como Pisco e Ica.

Otro efecto importante es el tsunami de carácter netamente regional, que se produjo inmediatamente después de producirse el terremoto. En este caso, el tsunami afecto a las localidades habitadas, en su totalidad, por pescadores y al estar ellas alejadas de las ciudades, durante las primeras horas y por el grado de daño producido en Pisco, no se le presto mayor atención. Horas después, se confirmo que el terremoto produjo un tsunami cuya altura de ola podría haber tenido 10 metros en la localidad de Lagunillas. El tsunami tuvo mayor avance a lo largo de la costa de la región central de Perú con posibilidad de haber llegado al puerto del Callao con olas de alturas medias de 1 a 2 metros que inundaron la vía costanera

INTERPRETACION Y DISCUSION

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 Sur de Perú, en la región Centro los sismos se distribuyen, en profundidad, siguiendo una línea con pendiente cercana a 28° en dirección NE hasta una profundidad de 110 km aproximadamente. El epicentro del terremoto del 15 de Agosto se localizó en la parte inicial de esta alineación de sismos; es decir, a 74 km al Oeste de la ciudad de Pisco.

La complejidad en el proceso de ruptura del terremoto de Pisco, 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. Así, el IGP estimó la magnitud del terremoto en la escala de Richter en 7.0 (ML); mientras que, el NEIC reporta una magnitud m_b de 6.8 y posteriormente una magnitud momento de 7.9Mw.

El terremoto de Pisco se originó en el proceso subducción a niveles muy superficiales; por lo tanto, su fuente es representada mediante un mecanismo focal de tipo inverso con esfuerzos netamente compresivos orientados, en este caso, en dirección ENE. En general, las características del mecanismo focal sugieren que el plano de falla se orienta en dirección NO-SE y presenta su buzamiento casi horizontal en dirección ENE.

La calidad de los datos sísmicos disponibles ha 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 de Pisco, el proceso de ruptura o fricción de placas fue lento durante los primeros 60-65 segundos y después la velocidad se incremento hasta completar los 210 segundos que fue la duración total de las amplitudes máximas de registro, siendo la energía liberada por la segunda ruptura mayor en comparación con la primera.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al personal del Servicio de Emergencia Sísmica y Redes Geofísicas por su apoyo en el análisis preliminar de la información y por la pronta disponibilidad de los datos.

BIBLIOGRAFIA

- 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.*
- Tavera et al (2007). Informe Tecnico, IGP, 25 pag.*

LA MAGNITUD DEL TERREMOTO DE PISCO DEL 15/08/07

Isabel Bernal
Dirección de Sismología

RESUMEN

En este trabajo se presenta los valores de magnitud calculados para el terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007 a partir de los diversos procedimientos establecidos internacionalmente para estimar este parámetro. Los valores de magnitud fueron reportados por el Instituto Geofísico del Perú (IGP), por el National Earthquake Information Center (NEIC) y por la Universidad de Harvard (CMT). Los resultados muestran que los valores de magnitud, dependiendo de la escala que se utilice, varían hasta en un grado; sin embargo, todos ellos definen adecuadamente la cantidad de energía liberada por el terremoto de Pisco.

INTRODUCCION

El último terremoto que afectó la zona sur de la región Central de Perú, ocurrió el 15 de Agosto de 2007 y de acuerdo a su duración y cantidad de energía liberada, es considerada como el mayor de los ocurridos durante la última centuria en esta región. El terremoto produjo intensidades máximas del orden de VII-VIII (MM) en las ciudades de Pisco, Ica y Chincha, además de un radio de perceptibilidad del orden de 600-700 km.

La magnitud del terremoto de Pisco, en función de su magnitud, fue reportada por el Instituto Geofísico del Perú y 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 terremoto/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 terremoto se debe corregir la amplitud de su registro en función del tipo de sismógrafo, por su distancia epicentro-estación, profundidad del foco y 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 terremoto de un solo golpe. Existen diversas escalas de magnitud para estimar el tamaño de los terremotos y estas dependen de la distancia a la cual se registra el terremoto y al tipo de onda 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 Pisco del 15 de Agosto, el IGP y las agencias 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 debido a la facilidad con la cual se accede a internet. En este estudio se describe de manera resumida cada una de las escalas frecuentemente utilizadas (Tavera, 2001) y se consigna diversos valores de magnitud para el terremoto de Pisco. La información procede del Instituto Geofísico del Perú (IGP), del National Earthquake Information Center (NEIC) y de la Universidad de Harvard (CMT).

ESCALAS DE MAGNITUD

Magnitud local (M_L). La magnitud local hace referencia a la escala de Richter establecida para registros provenientes de una estación sísmica del tipo Wood-Anderson (WA) y es definida como:

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

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 WA 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 de las ondas P y S (ondas de volumen) y el periodo predominante en el registro del sismo en su componente vertical. 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 se basa en la amplitud máxima del registro medido en el grupo de las ondas Rayleigh con periodos (T) entre 18 – 22 segundos. Las correcciones consideran 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 (M_d). 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 (M_t). Magnitud estimada a partir de la altura máxima de la ola producida por el tsunami y el uso de la relación propuesta por Dorbath et al (1990) para terremotos que ocurren en el borde occidental 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 (M_w). 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:

$$M_0 = \mu \cdot A \cdot \Delta u$$

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:

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

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

LA MAGNITUD DEL TERREMOTO DE PISCO

En la Tabla 1 se presenta todos los valores de magnitud obtenidos para el terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007. 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, siendo esto frecuentemente cuando los terremotos son

originados por procesos complejos de ruptura, tal como ocurrió con el terremoto de Pisco. Estas características permiten que se produzca, en muchos casos, la saturación de algunas escalas.

Tabla 1.- *Magnitudes para el terremoto de Pisco expresados en diferentes escalas.*

Tipo de Escala	Magnitud IGP	Magnitud NEIC
Magnitud Local (ML)	7.0	6.7-
Magnitud Ondas Volumen (mb)	-	6.8
Magnitud Ondas Superficiales (Ms)	7.9	7.9
Magnitud Duración (MD)	6.9	5.7
Magnitud Tsunami (Mt)	8.5	-
Magnitud Momento (Mw)	-	8.0
Magnitud Energía (Me)	-	7.5

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. 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 definen mejor la magnitud del evento sísmico.

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 Pisco presentó olas con una alturas medias de 6 metros, se estima un valor de magnitud ligeramente mayor que los obtenidos utilizando métodos directos (Tabla 1).

A partir de la inversión del tensor momento, la Universidad de Harvard obtiene un momento sísmico de $1.1E+21$ Nm (equivalente a una magnitud momento de 7.9Mw) y una cantidad de energía sísmica del orden de $3.8E+15$ Nm.

En cuanto a la magnitud, las diferencias entre cada grado solo puede ser considerada en escala logarítmica, así un terremoto de magnitud 8.5 es 100 millones de veces más grande que uno de 3.0. Por otro lado, una bomba atómica "A" libera la energía que liberarían 20,000 toneladas de TNT y sería proporcional a un terremoto de magnitud 6.0. La bomba atómica "H" de 20 megatones libera energía equivalente a un terremoto de magnitud 8.0. De acuerdo a estas comparaciones, el terremoto de Pisco de magnitud 7.0 ML habría liberado energía equivalente a 10,000 bombas atómicas similares a la que exploto en Hiroshima.

BIBLIOGRAFIA

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.

Tavera et al (2007). Informe Técnico sobre el terremoto de Pisco, IGP, 34 pag.

INTENSIDADES REGIONALES ASOCIADAS AL TERREMOTO DE PISCO DEL 15 DE AGOSTO DE 2007

Hernando Tavera

Dirección de Sismología – IGP

Henry Salas, Cesar Jiménez, Lucy Arredondo, Rocio Parillo, José Millones

Centro Nacional de Datos Geofísicos

RESUMEN

En este estudio se presenta el Mapa de Intensidades Regionales correspondiente al terremoto de Pisco ocurrido el 15 de Agosto de 2007. La información utilizada ha sido obtenida a partir de interrogaciones telefónicas simultáneas realizadas inmediatamente después de ocurrido el terremoto. Los resultados obtenidos indican que el terremoto de Pisco produjo una intensidad máxima de VII-VIII en la escala MM dentro de una área elipsoidal que encierra a las ciudades de Pisco y Paracas. El terremoto fue percibido desde el departamento de Moquegua por el sur, hasta Piura por el norte y Ucayali por el oeste. La mayor área de percepción se encuentra en dirección de la región central de Perú; mientras que, la propagación de la ruptura se produjo en dirección contraria.

INTRODUCCION

El terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007 (18h40m, hora local), representa el de mayor magnitud y duración de todos los ocurridos en la región central de Perú durante la última centuria. El epicentro del terremoto fue localizado a 74 km al oeste de la ciudad de Pisco (Departamento de Ica) y tuvo una magnitud de 7.9 en la escala de magnitud momento (Mw). Este terremoto afectó principalmente a los departamentos de Ica, Huancavelica y parte sur de Lima en donde produjo muerte y destrucción. La estadística final indica que aproximadamente 320,000 personas sufrieron los efectos del terremoto y de las cuales, 595 habrían muerto. Además se produjeron daños severos en 12 localidades con más de 230,000 viviendas dañadas y 52,150 totalmente destruidas principalmente por problemas de licuación de suelos en Pisco y localidades aledañas. En el tramo Ica-Lima de la Panamericana Sur se produjeron grandes deslizamientos y subsidencias de tierra, así como brotes de agua que impidieron el tránsito de vehículos por varios días.

Según información recopilada, aproximadamente 15 minutos después de ocurrido el terremoto, se produjo un tsunami netamente local que afectó al poblado de Laguna Grande (30 km al sur de la localidad de Paracas) en donde murieron 3 personas y más de 12 se encuentran desaparecidos (ver informe en este volumen). Este tsunami habría llegado al Callao en donde se observó, sobre la carretera costanera, diversos niveles de inundación con olas de baja altitud.

Una vez conocidos los parámetros hipocentrales del terremoto de Pisco (Boletín del Instituto Geofísico del Perú), se procedió a realizar la evaluación de los efectos y daños causados por el mismo en toda la región central de Perú siguiendo dos procedimientos. Primero, se realizaron encuestas telefónicas a personal de las municipalidades, policía nacional, compañía de bomberos, hospitales y algunas veces naturales, llegándose a disponer de gran información confiable debido a que todas las personas respondieron a un mismo cuestionario, que para tal fin, existe en el IGP. La información disponible fue interpretada haciendo uso de la escala de intensidades de Mercalli Modificada (MM).

Asimismo, después de ocurrido el terremoto de Pisco, personal del Instituto Geofísico del Perú se desplazó a la región afectada a fin de realizar la evaluación in situ de los efectos y daños causados por el terremoto, principalmente en las ciudades de Ica, Pisco y San Vicente de Cañete. 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 y sus resultados son presentados en informes que son parte del presente volumen.

INTENSIDADES EN LA ESCALA MERCALLI MODIFICADA

La información utilizada para elaborar el Mapa de Intensidades del terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007 consta de 82 fichas y su evaluación ha permitido considerar de manera inicial los siguientes valores de intensidad:

- .- Intensidad VIII: En Ica: *Pisco, Paracas y zonas aledañas.*
- .- Intensidad VII: En Ica: *Ica, Chincha y zonas aledañas*
En Lima: *San Vicente de Cañete y zonas aledañas.*
- .- Intensidad VI: En Lima: *Callao, Lima Sur, Mala, Yauyos.*
En Huancavelica: *Huaytara y zonas aledañas.*
En Ica: *Palpa y zonas aledañas.*
- .- Intensidad V: En Ica: *San Juan de Marcona, Nazca y zonas aledañas.*
En Huancavelica: *Huancavelica y zonas aledañas.*
En Lima: *Huaral, Canta, Huacho, Barranca y zonas aledañas.*
- .- Intensidad IV: En Arequipa: *Chala y zonas aledañas.*
En Ayacucho: *Puquio, Ayacucho y zonas aledañas.*

- En Junin: *Huancayo, Satipo, La Merced y zonas aledañas.*
- En Pasco: *Cerro de Pasco y zonas aledañas..*
- En Huanuco: *Huanuco y zonas aledañas.*
- En Ancash: *Huaraz, Chimbote y zonas aledañas.*
- .- Intensidad III: En La Libertad: *Trujillo y zonas aledañas.*
- En Cajamarca: *Cajamarca, San Marcos y zonas aledañas.*
- En San Martín: *Saposoa, Bellavista y zonas aledañas*
- En Huanuco: *Tingo María y zonas aledañas.*
- En Ucayali: *Pucallpa, Atalaya y zonas aledañas.*
- En Cusco: *Cusco, Quillabamba, Urubamba y zonas aledañas.*
- En Arequipa: *Cotahuasi, Camana, Chuquibamba, Aplao, Ocoña, Caraveli y zonas aledañas.*
- .- Intensidad II: Ciudades de *Moquegua, Arequipa, Chiclayo, Piura, Talara, Chachapoyas, Moyabamba, Tarapoto y Yurimaguas.*

En la Figura 1 se presenta el Mapa de Intensidades en la escala Mercalli Modificada correspondiente al terremoto de Pisco del 15 de Agosto. En dicha figura, se observa que el epicentro del terremoto se ubica frente a la ciudad de Pisco y en ella se llegó a evaluar una intensidad máxima de VIII para un área elipsoidal que considera a las ciudades de Pisco y Paracas, y en donde del total de viviendas, cerca del 24% quedaron completamente destruidas y el 13% con daños severos afectando a 55,000 habitantes aproximadamente. Asimismo, en estas dos ciudades se contabilizó el mayor número de muertes (331 personas) y desaparecidos (64 personas). El área de daños y efectos secundarios considera la isosista de grado VI (MM) que considera a localidades de los departamentos de Ica, Huancavelica, y zona sur de Lima. Dentro de esta área se ha observado que en Chincha e Ica el 27% de las viviendas colapsaron completamente y el 10% tuvieron daños severos. En Cañete y Yauyos (departamento de Lima), el 8% de viviendas colapsaron y el 7% presentaron daños severos. En Castrovirreyna, Huaytara y Huancavelica (departamento de Huancavelica), solo el 4% colapsaron y el 6% tuvieron daños importantes. En todas estas ciudades aproximadamente 265,000 personas fueron afectadas por el terremoto y dentro de ellas se contabiliza 245 muertes y 180 desaparecidos.

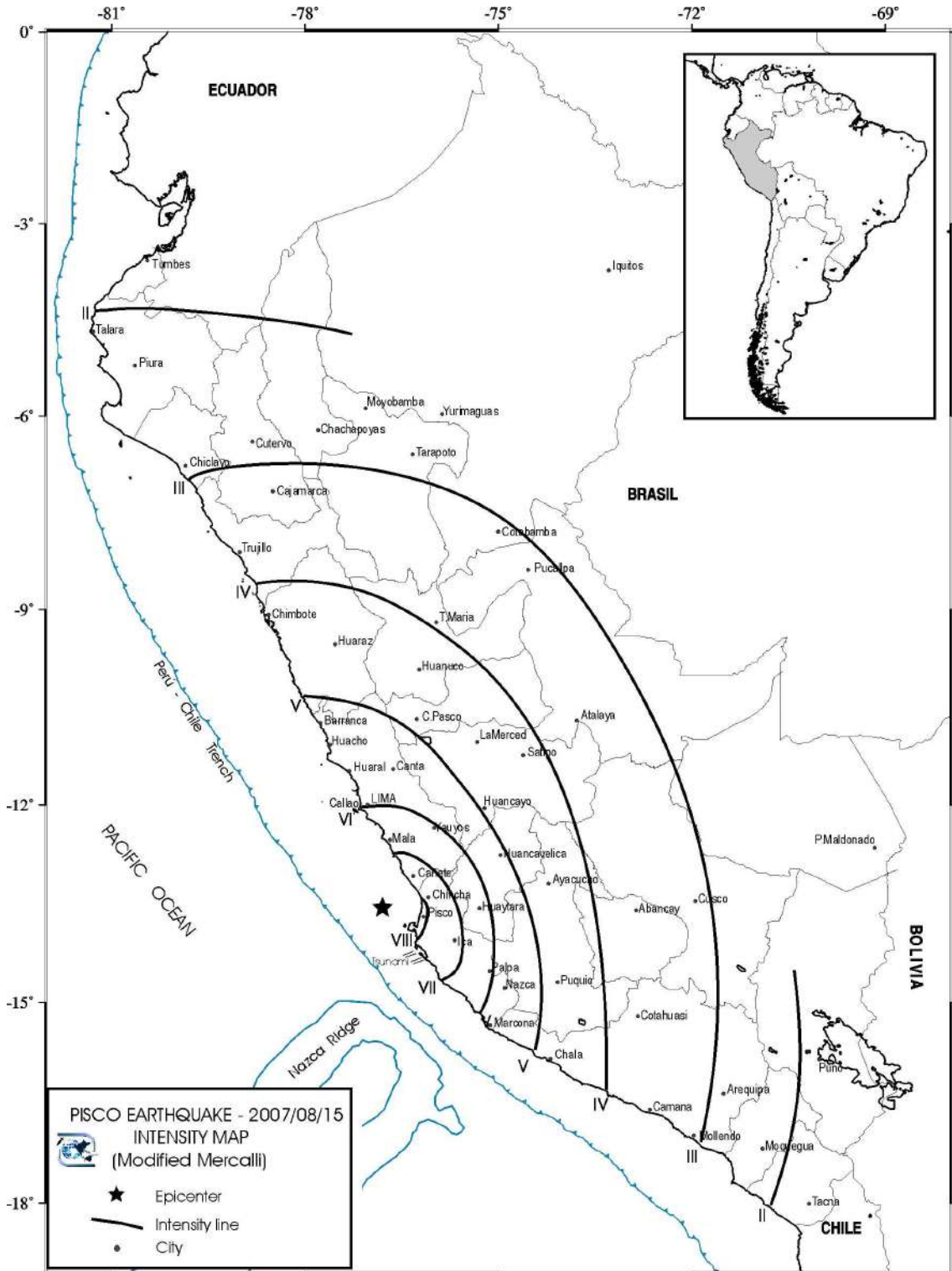


Figura 1.- Mapa de intensidades en la escala de Mercalli Modificada (MM) para el terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007 (Tavera et al, 2008).

Por otro lado, la simple apreciación sobre la forma de las curvas de isosistas permite considerar que el terremoto tuvo mayor área de percepción al norte del epicentro, a pesar que el proceso de ruptura del mismo se propagó en dirección SE (ver Tavera et al, en este volumen). Esta situación es contraria al observado durante la ocurrencia del terremoto del 23 de Junio de 2001 en la región sur del Perú, en donde el área de mayor percepción coincidió con la dirección de propagación de la ruptura (Tavera et al, 2003). Una posible explicación a esta particularidad es que la Cordillera Costanera se levanta en Paracas y se extiende por todo el sur de Perú, estando totalmente ausente en la región central. Es posible que la energía emitida por el terremoto haya sido atenuada por dicha cordillera, y al no estar presente al norte del epicentro la energía se propagó libremente. Dentro de este contexto, la calidad del suelo en las ciudades de Pisco, Ica, Chincha, San Vicente de Cañete, sumados a la antigüedad de las viviendas, fueron los factores más importantes para que el terremoto produzca el daño ya descrito y discutido en los diferentes trabajos incluidos en este volumen.

BIBLIOGRAFIA

Tavera et al (2008): The Pisco earthquake of August 15th, 2007: Preliminary Results, SRL (in review).

Tavera et al (2006): The southern region of Peru earthquake of June 23rd, 2001. Journal of Seismology, DOI: 10.1007/s10950-006-9014-2.

MECANISMO DE LA FUENTE PARA EL TERREMOTO DE PISCO DEL 15 DE AGOSTO DE 2007

Hernando Tavera

Dirección de Sismología - CNDG

RESUMEN

En este estudio se determina el mecanismo focal del terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007 a partir de la polaridad de la onda P identificada en registros obtenidos a distancias regionales/telesísmicas y a partir del modelado de ondas de volumen a distancias telesísmicas. Los resultados indican que el mecanismo focal para el terremoto de Pisco es del tipo inverso con el plano de falla buzando en dirección Este de manera casi horizontal. Las características de la función temporal de la fuente sísmica (STF) sugieren que el proceso de ruptura del terremoto de Pisco tuvo una duración del orden de 110 segundos, tiempo durante el cual se produjeron hasta dos rupturas aleatorias, siendo la segunda de mayor tamaño y duración. Según la distribución de las réplicas, la segunda ruptura se habría producido frente a la Bahía Independencia (al sur de la Península de Paracas) evidenciando la propagación de la ruptura en dirección SE. La profundidad del foco ha sido ajustada en 15 km. El momento sísmico es del orden de $2.3E+21$ Nm, equivalente a una magnitud $M_w=8.1$.

INTRODUCCION

En la zona sur de la región Central de Perú, el día miércoles 15 de Agosto de 2007 (18h 40m hora local) ocurre un terremoto de magnitud 7.9 Mw (magnitud momento) que causó muerte y destrucción en los departamentos de Ica, Huancavelica y sur de Lima. La intensidad máxima del terremoto fue evaluada en VII-VIII en la escala de Mercalli Modificada (ciudad de Pisco, departamento de Ica) y su epicentro fue localizado a 74 km al Oeste de la ciudad de Pisco; es decir, en el mar. Este terremoto se constituye como uno de los más grandes y destructores que se haya producido en esta región en los últimos 290 años.

El terremoto de Pisco tiene su origen en la principal fuente sismogénica presente en el Perú; es decir, la que considera la fricción de las placas de Nazca y Sudamericana dentro del proceso de subducción que se realiza con una velocidad relativa del orden de 8-10 cm/año (DeMets et al., 1990; Norabuena et al, 1999). En función de la profundidad de sus focos, los sismos pueden clasificarse en superficiales ($h < 60$ km), intermedios ($60 < h < 350$ km) y profundos ($h > 350$ km); por lo tanto, los sismos cuyos epicentros se concentran entre la fosa y la línea de costa están directamente relacionados con la interacción de las placas (sismos superficiales), y los de mayor magnitud son los causantes de los más grandes daños conocidos en la historia sísmica de la región central de Perú (ejemplo, terremotos de 1940, 1942, 1966, 1970, 1974 y 1996). En general, los mecanismos focales de todos estos terremotos son del tipo inverso con planos nodales orientados, en promedio, en dirección NS a

NO-SE y con el plano que buza en dirección Este prácticamente horizontal. La orientación de los ejes de esfuerzo principal es coherente con la dirección de convergencia de placas (Tavera y Buforn, 2001).

En este estudio se obtiene la orientación de la fuente y de los ejes de esfuerzo principal del terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007 a partir de las características del primer impulso de la onda P y modelado de ondas de volumen provenientes de redes sísmicas regionales de Sudamérica y de la red sísmica mundial. Asimismo, la profundidad del foco y características del proceso de ruptura son analizados a partir de las formas de onda y función temporal de la fuente sísmica.

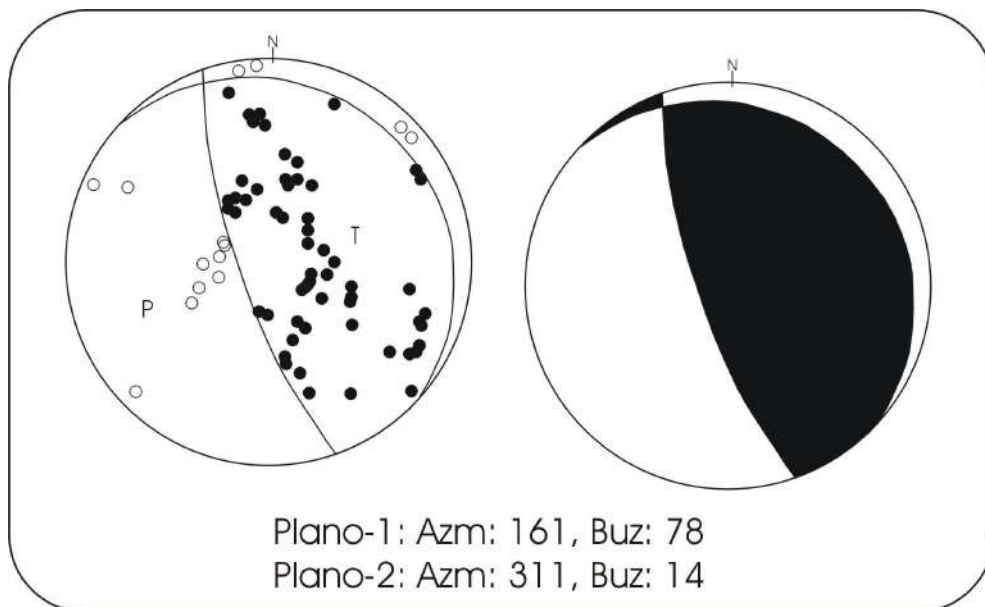


Figura 1.- Mecanismo focal para el terremoto de Pisco obtenido a partir de la polaridad de la onda P. Puntos y área de color negro indica compresión, puntos vacíos y área blanca indican dilatación. P y T definen a los ejes de Presión y Tensión. Azm= azimut y Buz= buzamiento.

ORIENTACION DE LA FUENTE

Polaridad de la onda P

La orientación de la fuente del terremoto de Pisco ha sido estimada usando las características del primer movimiento de la onda P registrada en estaciones de las redes sísmicas regionales de Sudamérica y de la red mundial. Se ha utilizado el algoritmo de Brillinger et al., (1980) para conocer la orientación de los planos nodales y de los ejes principales de esfuerzo con sus respectivas desviaciones estándar. Se ha

utilizado 75 datos de polaridad y los resultados obtenidos se presentan en la Figura 1. La solución para el terremoto de Pisco corresponde a un mecanismo focal de tipo inverso con planos nodales orientados en dirección NNO-SSE, siendo uno de los planos casi vertical ($\delta=78^\circ$) y el otro prácticamente horizontal con un buzamiento del orden de 14° en dirección ENE. La orientación de los ejes P y T es coherente con la dirección de convergencia de placas.

Modelado de Ondas de Volumen

La orientación de la fuente, profundidad del foco (h), la función temporal de la fuente sísmica (STF) y el momento sísmico escalar (M_0) para el terremoto de Pisco son conocidos a partir del 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. 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° .

La calidad de los registros telesísmicos obtenidos para este terremoto (relación señal/ruido mayor a 150), ha permitido analizar y evaluar la complejidad de la señal correspondiente al grupo de la onda P. En función de su azimut epicentro-estación, en la Figura 2 se muestra los registros del desplazamiento del suelo correspondiente a 10 estaciones ubicadas a distancias comprendidas entre 30° y 90° , todas de la red sísmica mundial. En todos los registros, el grupo de la onda P tiene una duración del orden de 160-200 segundos, tiempo durante el cual se puede distinguir dos trenes de ondas (E1, E2), el primero de menor duración y amplitud que el segundo. Esto sugiere que el terremoto de Pisco presentó un proceso complejo de liberación de energía asociado a dos frentes de ruptura (E1, E2) que se produjeron con un intervalo de 60 segundos, siendo el primero menor en cuanto a tamaño o cantidad de energía liberada. Asumiendo una velocidad de ruptura del 65% de la velocidad de la onda S, la segunda fuente se ubicaría a 150 km de distancia de la primera.

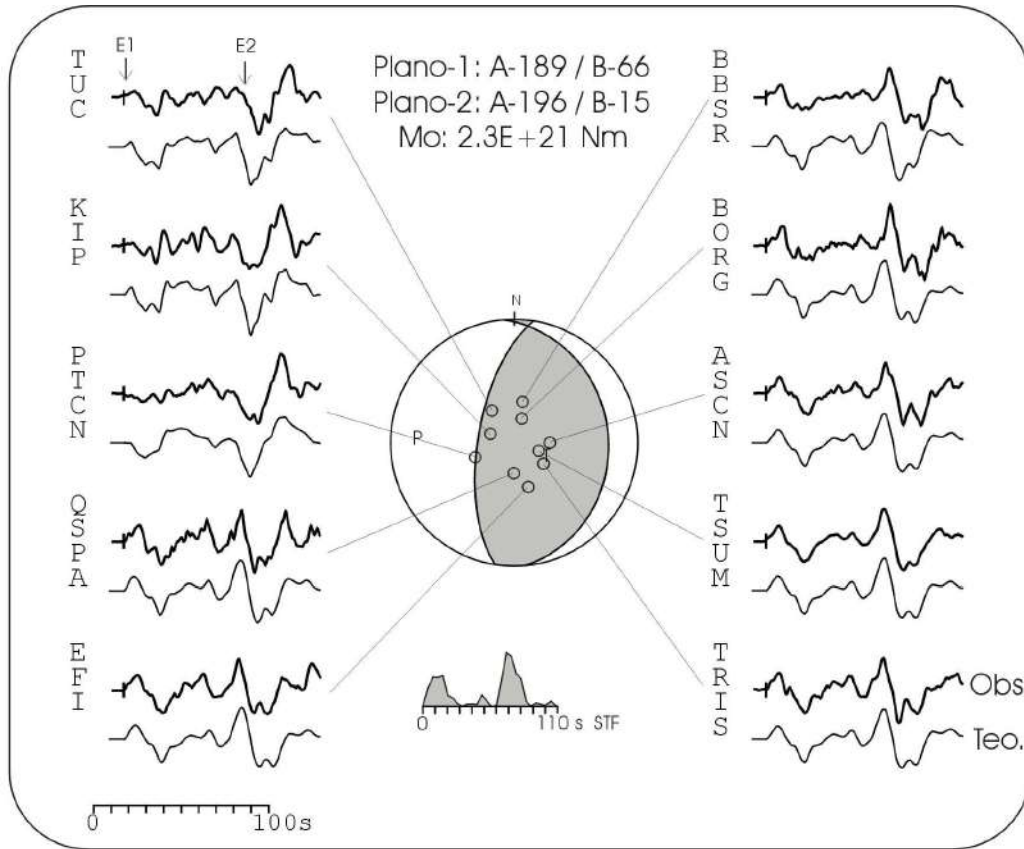


Figura 2.- Modelado de formas de onda a distancias telesísmicas para el terremoto de Pisco. El área sombreada sobre la esfera focal indica compresión y la blanca, dilatación. P y T indican la proyección de los ejes de Presión y Tensión. STF corresponde a la función temporal de la fuente sísmica. Obs.= señales sísmicas observadas y TEO.= señales teóricas. En el extremo izquierdo de cada señal sísmica se indica el nombre de la estación sísmica y en la parte inferior, la escala horizontal en segundos. En la parte superior, se indica el azimut y buzamiento de los planos nodales, además del valor para el momento sísmico escalar (M_0). E1 y E2, representan los trenes de ondas asociados a fuentes de liberación de energía.

Por otro lado, al analizar azimutalmente las formas de onda de los registros sísmicos de la Figura 2, se observa como las amplitudes de la onda P del primer grupo decrecen en la dirección de las estaciones PTCN, KIP y TUC, lo cual indica que ellas se encuentran próximas a uno de los planos nodales.

Para el modelado de ondas se ha utilizado 10 registros telesísmicos de la onda P correspondientes a estaciones distribuidas sobre toda la esfera focal (Figura 2). Para la inversión, como datos de entrada inicial se ha considerado la orientación de la fuente obtenida a partir de la polaridad de la onda P y los parámetros hipocentrales según Tavera et al (este volumen). Según el procedimiento descrito anteriormente, el

mejor ajuste obtenido para los sismogramas observados (línea oscura) y teóricos (línea gris) se presenta en la Figura 2. La solución corresponde a un mecanismo focal de tipo inverso con planos nodales orientados en dirección N-S, buzando uno de los planos 66° hacia el Oeste y el otro 25° hacia el Este respectivamente. En general, la correlación obtenida entre los registros observados y teóricos es buena; sin embargo, algunos picos de amplitud no pueden ser modelados correctamente debidos a la complejidad de la señal que podría sugerir la existencia de posibles efectos de directividad asociado a un proceso de ruptura unilateral. Obsérvese que el plano nodal con buzamiento al Oeste pasa entre las estaciones de TUC, KIP y PTCN, de ahí que las amplitudes iniciales de la onda P sean menores que el resto de estaciones que se encuentran próximos al centro de la esfera focal.

Asimismo, en la figura se observa que la función temporal de la fuente (STF) es compleja y tiene una duración de 110 segundos, tiempo durante el cual la energía se habría liberado principalmente debido a dos fuentes distribuidas sobre el mismo plano de falla. Ambas fuentes tendrían una duración de 30 segundos, siendo la segunda de mayor amplitud; además de estar separadas por 25-30 segundos, tiempo durante el cual se habría producido mínima liberación de energía o en todo caso, las placas se habrían desplazado sin mayor fricción. Estas características para la SFT son similares a los observados directamente sobre la forma de las señales sísmicas.

Esta metodología ha permitido estimar la profundidad del foco del terremoto de Pisco en 15 km y obtener un momento sísmico escalar de $2.3E+21$ Nm equivalente a una magnitud M_w de 8.1 (magnitud momento).

CONCLUSIONES

El terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007, se constituye como el de mayor magnitud ocurrida a niveles superficiales en la región Central de Perú en los últimos 290 años. Este terremoto, al igual que otros con origen en el proceso de subducción, presenta un mecanismo focal de tipo inverso con planos nodales orientados de manera ortogonal a la dirección del movimiento de placas. Las soluciones obtenidas a partir de datos de polaridad de ondas P y modelado de ondas de volumen presentan diferencias del orden de 20° y 44° para los azimutes de los planos nodales y de 12° y 11° para el buzamiento de ambos. Estas diferencias en las

soluciones son debidas al tipo de datos utilizados y a las metodologías seguidas para su cálculo, pudiendo estar dentro de los rangos de certeza de cada método.

La profundidad del foco ha sido ajustada en 15 km, es decir, menor en 3 km al obtenido por Tavera et al (este volumen); mientras que, su momento sísmico escalar fue estimado en $2.3E+21$ equivalente a una magnitud momento de 8.1 Mw.

La STF para el terremoto de Pisco muestra el carácter complejo de todo su proceso de ruptura con una duración de 110 segundos, tiempo durante el cual se produjo dos rupturas (fuentes de liberación de energía) aleatorias separadas en tiempo por 60 segundos. La última ruptura fue de mayor tamaño, habiendo ocurrido a una distancia media de 150 km de la primera. Las características de la señal sísmica y de la STF muestran una evidente propagación unilateral de la ruptura en dirección SE, coherente con la distribución espacial de las réplicas y cuyas características fueron descritas por Tavera et al (ver este volumen).

BIBLIOGRAFIA

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.

RÉPLICAS DEL TERREMOTO DE PISCO DEL 15 DE AGOSTO DE 2007

Hernando Tavera

Dirección de Sismología – CNDG

Henry Salas, Simeón Rodríguez, Yvonne Pérez-Pacheco, Rocío Parillo

José Millones, Cesar Jiménez y Lucy Arredondo

Centro Nacional de Datos Geofísicos - IGP

RESUMEN

Se realiza el análisis de la distribución espacial de las réplicas del terremoto de Pisco ocurridas durante un periodo de siete días después del evento principal. Estas réplicas fueron registradas por estaciones de banda ancha y periodo corto de la Red Sísmica Nacional y de una red local que opera a lo largo de la costa del departamento de Lima. Los resultados indican que el área total de ruptura asociado al terremoto de Pisco fue de 170x130 km² con el eje mayor paralelo a la línea de costa. Las réplicas forman tres importantes agrupamientos separados por pequeñas áreas en las cuales el desplazamiento de habría producido de manera asísmica. A partir del área de réplicas y momento sísmico, se determina un desplazamiento medio de 170 cm.

INTRODUCCION

La actividad sísmica en el Perú tiene su origen en el proceso de convergencia entre las placas de Nazca y Sudamericana con una velocidad relativa del orden de 8-10 cm/año (DeMets, et al, 1990; Norabuena et al, 1999). 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 central, han sido estudiadas por Stauder (1970), Suarez et al (1991), Lindo (1993), Tavera y Buforn (1998) y Bernal y Tavera (2002). A diferencia de la región sur, en la región central la superficie de acoplamiento de placas es heterogénea y presentaría un ángulo de inclinación de 18° desde la fosa hasta la línea de costa, para luego incrementarse a 25°-30° hasta una profundidad del orden de 110 km y luego seguir por debajo del continente de manera sub-horizontal. Debido a estas características, la ocurrencia de sismos de elevada magnitud es muy frecuente y en general, siempre están acompañados por un gran número de réplicas que permiten estudiar con mayor precisión, las características de sus procesos de liberación de energía y dimensiones de sus áreas de ruptura.

El día 15 de Agosto, a las 18:40 (hora local) un terremoto de carácter superficial y con magnitud 7.9 Mw (magnitud momento) afectó a toda la zona sur de la región central de Perú. El epicentro del terremoto fue localizado a 74 km al oeste de la ciudad de Pisco, departamento de Ica. Las ciudades y localidades mas afectadas

fueron Pisco, Paracas, Ica, Chincha, San Vicente de Cañete, Huaytara y Huancavelica. Los mayores daños y efectos materiales y personales se produjeron en la ciudad de Pisco en donde se llegó a evaluar intensidades de VIII (MM). Después del terremoto, se produjo un gran número de réplicas que fueron registradas por las estaciones sísmicas de la Red Sísmica Nacional y por una red temporal que opera dentro de un proyecto especial para el estudio de las deformaciones locales. Durante un periodo de 7 días se llegó a registrar alrededor de 1500 réplicas y de ellas, un número de 12 fueron sentidos en Pisco con intensidades máximas de V (MM) que terminaron por derrumbar las viviendas previamente dañadas por el sismo principal.

En este estudio se analiza la distribución espacial de la réplicas del terremoto del 15 de Agosto ocurridas en un periodo de tiempo de 7 días (del 15 al 22 de Agosto de 2007), a fin de conocer sus características, el área total de ruptura y el desplazamiento medio sobre el plano de falla.

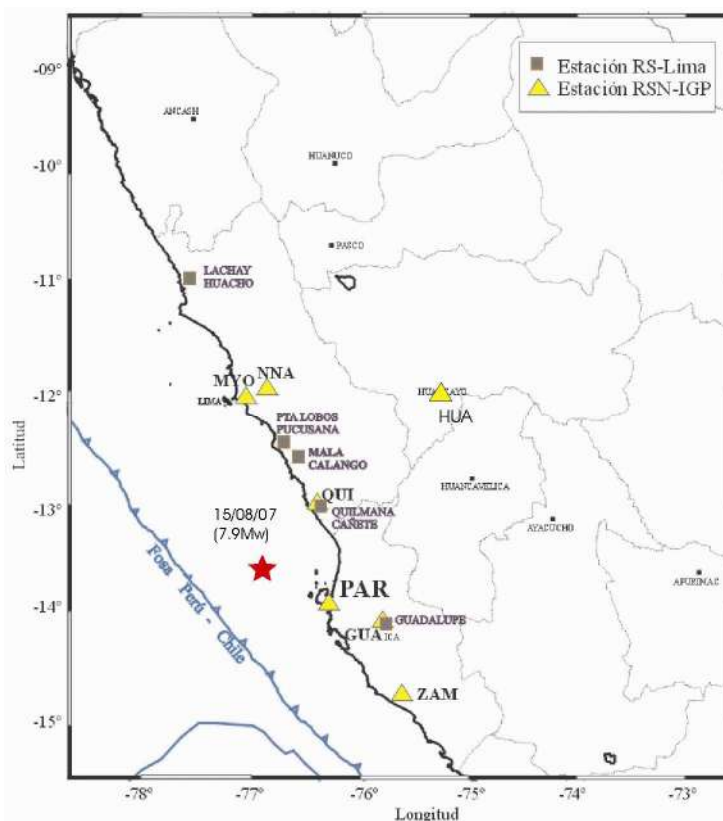


Figura 1.- Distribución de las estaciones sísmicas de la RSN y red local de Lima consideradas en el cálculo de los parámetros hipocentrales de las réplicas del terremoto de Pisco.

LA RED SISMICA TEMPORAL

Las réplicas producidas por el terremoto de Pisco fueron registradas por estaciones de banda ancha y periodo corto de la Red Sísmica Nacional del Perú a cargo del Instituto Geofísico del Perú y otra local como parte de uno de los proyectos que desarrolla la Dirección de Geodesia y Geología del IGP. En total se disponía de una red de 10 estaciones sísmicas que bordean completamente el área involucrada en el proceso de ruptura del terremoto. La distribución espacial de estas estaciones se muestra en la Figura 1.

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 a fin de realizar su análisis y lectura de los tiempos de llegada de las fases P y S (calculó de los parámetros hipocentrales), además del tiempo de duración del registro de la señal de cada sismo (calculó de la magnitud). Posteriormente, los tiempos de llegada de las fases P y S leídas en los registros de cada una de las estaciones sísmicas fueron correlacionados a fin de contar con información para un total de 250 réplicas. En la Figura 2, se muestra algunos ejemplos de sismogramas de la estación Quinsachumpi (QCH) para los días del 15 al 19 de Agosto y en la cual se puede observar el registro del evento principal y de sus réplicas mayores. Asimismo, obsérvese como el número de réplicas disminuye conforme pasan los días, de tal manera que después de 20 días, las estaciones más cercanas al epicentro prácticamente no registraban 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 la velocidad de la onda S.

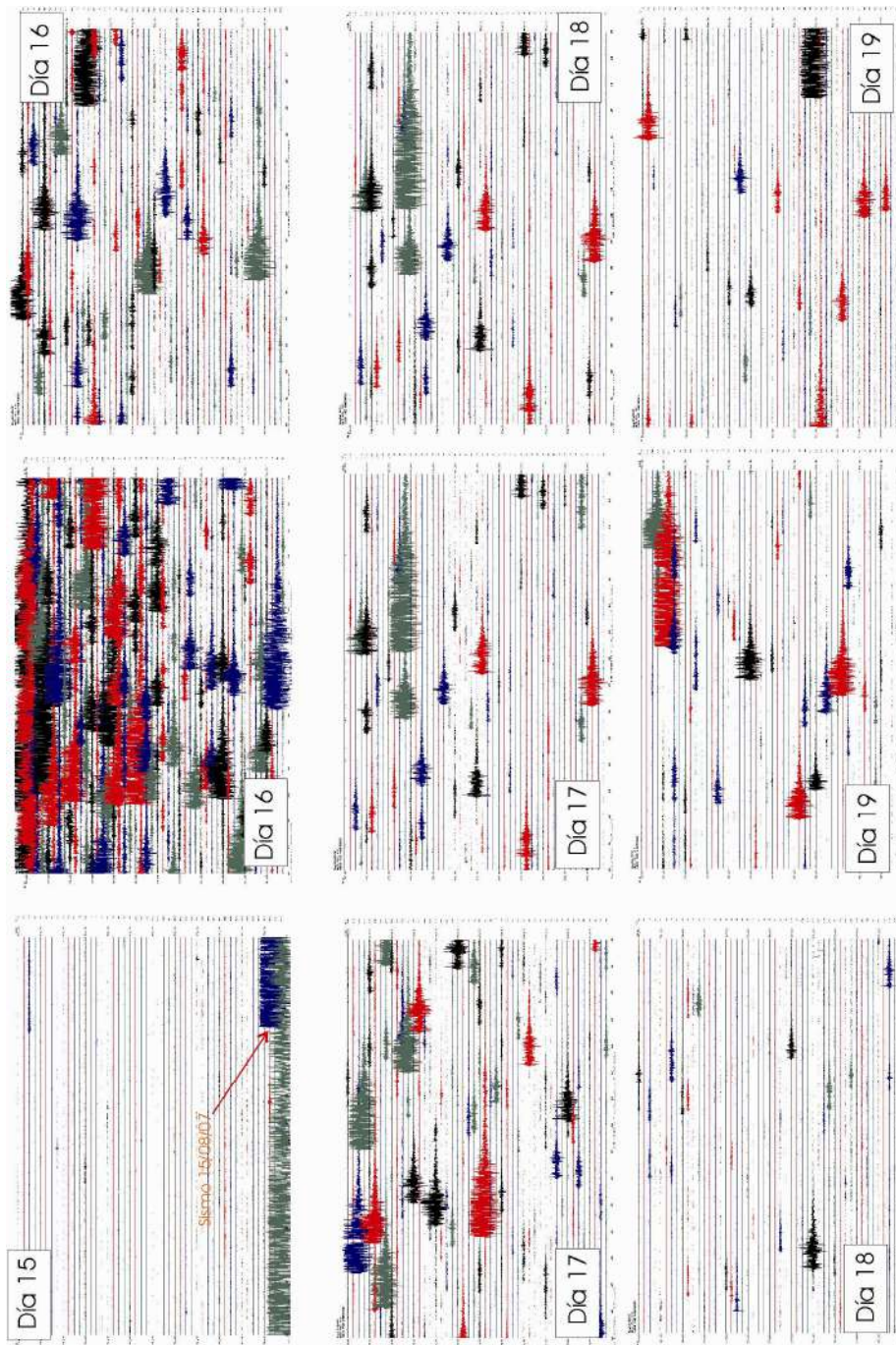


Figura 2. Sismogramas de la Estación Quinsachumpi (QCH) ubicada en Huancavelica a 271 km de distancia epicentro-estación. Se muestra la frecuencia de réplicas después del evento principal para los días del 15 al 19 de Agosto de 2007. Nótese que el número de replicas es mayor inmediatamente después del sismo principal.

Modelo de Velocidad

En la Tabla 1, 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 por Langer y Spence (1995) para el estudio de las réplicas del terremoto del 3 de Octubre de 1974 ocurrido a 150 km al NO del epicentro del terremoto de Pisco.

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. Inicialmente, se ha considerado un valor de 1.78 y que corresponde al obtenido por Langer y Spence (1995), siendo el valor coherente con los obtenidos en otros estudios de sismicidad superficial (Dorbath et al., 1991; Grange, 1983; Lindo, 1993; y Tavera et al., 2000).

Tabla 1.- 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	8.0
8.0	30.0	-----

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.

DISTRIBUCION ESPACIAL DE LAS REPLICAS

En la Figura 3 se muestra la distribución espacial de las 250 réplicas con errores en sus parametros hipocentrales menores a 3 km (coordenadas del epicentro y profundidad del foco). Todas estas réplicas presentan magnitudes locales que oscilan entre 2.0 y 4.0 ML.

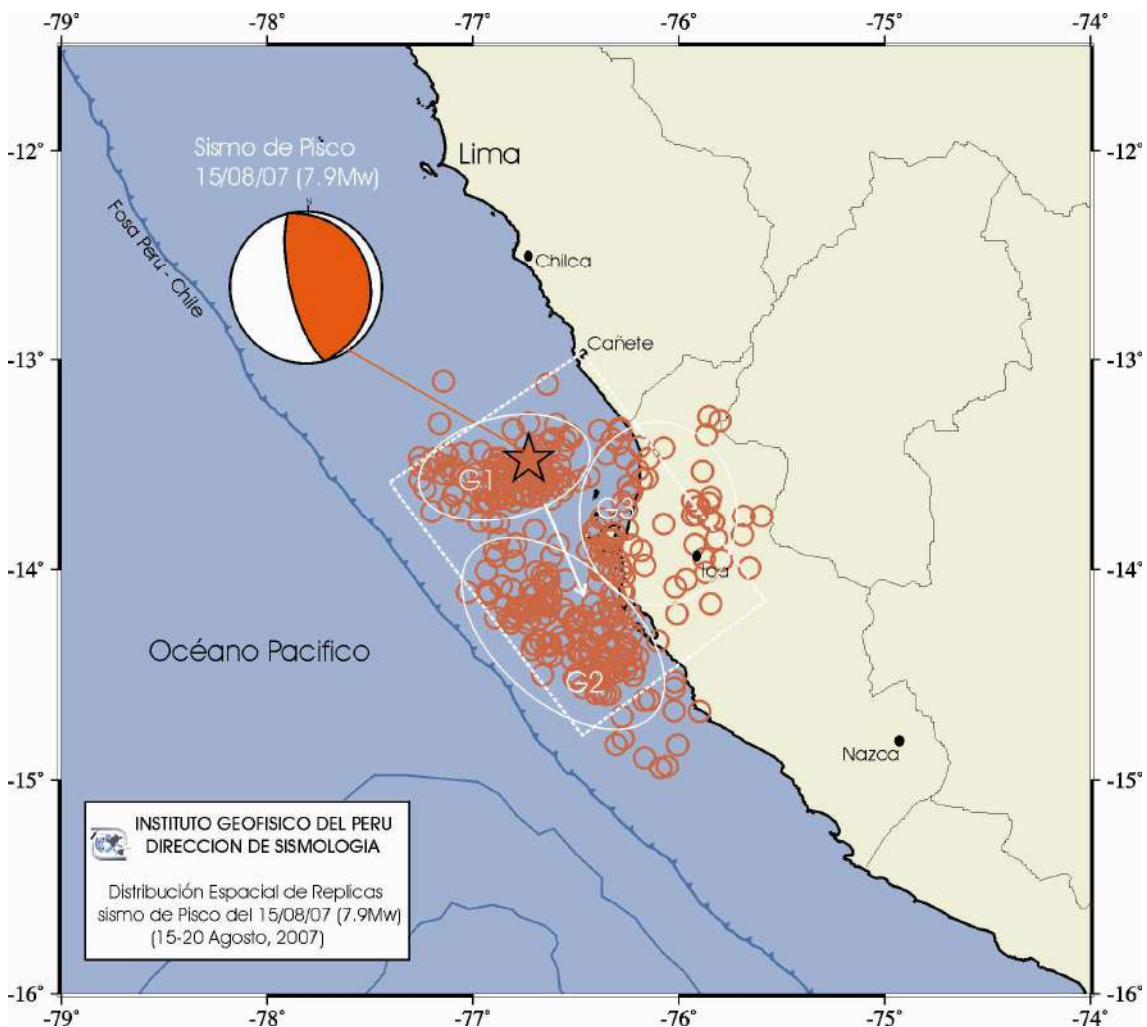


Figura 3.- Distribución espacial de las réplicas del terremoto de Pisco ocurridas entre los días del 15 al 22 de Agosto-2007. Nótese la presencia de tres agrupamientos (G1, G2, G3) que indican el desarrollo de un proceso complejo de ruptura. El mecanismo focal para el sismo de Pisco es coherente con el tipo de deformación que se presenta en esta principal fuente sismogénica. La flecha indica la dirección de la propagación de la ruptura.

El total de réplicas se distribuye principalmente entre la fosa y la línea de costa y en menor proporción, sobre el continente cubriendo un área de 170x130 km² aproximadamente. Esta área rectangular se extiende desde la localidad de Cañete hasta Pisco (Bahía Independencia) paralela a la línea de costa. Las réplicas se distribuyen formando tres (3) grupos, el primero con epicentros alrededor del evento principal (G1), el segundo con epicentros frente a la Península de Paracas y Bahía Independencia (G2), y el tercero con epicentros sobre la Península de Paracas y entre Cañete y Pisco (G3). Dentro del área de ruptura, el evento principal presenta su epicentro en el extremo NO; por lo tanto, la distribución espacial de las réplicas sobre toda el área sugieren que el proceso de ruptura o liberación de energía fue complejo y se propago en dirección SE.

En general, entre cada grupo de réplicas se observa la presencia de áreas que no habrían experimentado ruptura pero que participaron en todo el proceso de manera asísmica

DISCUSION

La distribución espacial de las réplicas analizadas en este estudio (periodo del 7 días) sugieren que el terremoto de Pisco produjo un área de ruptura de 170x130 km² y su variación espacio-tiempo indicaría que la ruptura se propagó en dirección SE. A diferencia de otros terremotos de gran magnitud, el de Pisco solo fue seguido por 8 réplicas con magnitudes del orden de 5.0 a 6.4 ML, lo cual indica que la energía acumulada se habría liberado completamente con el evento principal.

Para el terremoto de Pisco se ha obtenido un momento sísmico escalar de 1.1×10^{28} dina-cm (Universidad de Harvard) y considerando un área de ruptura de 170x120 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 $\Delta U = 170$ cm, menor

que los obtenidos por métodos de inversión del vector desplazamiento que proponen valores del orden de 8 metros sobre el plano de falla (Chen, 2007).

De acuerdo a las características de la distribución espacial de las réplicas del terremoto de Pisco, el proceso de ruptura fue muy heterogéneo con la presencia de tres núcleos de mayor liberación de energía bordeados por pequeñas áreas en las cuales los desplazamientos se habrían producido de manera asísmica. A pesar que el área de replicas es pequeña, el terremoto de Pisco se constituye como un de los de mayor magnitud ocurridos en esta región en los últimos 290 años.

BIBLIOGRAFIA

- 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.*
- Tavera y Buforn, (1998). Física de la Tierra, UC Madrid, 10, 187-219*
- Tavera et al., (2000). Informe Técnico, Convenio Electroperú-IGP, 38 p.*
- Woollard, T. (1975). Rev. of Geophys.14, 87-137.*

ANALISIS ESPACIO-TIEMPO DE LAS RÉPLICAS DEL TERREMOTO DE PISCO DEL 15 DE AGOSTO DE 2007

Hernando Tavera y Henry Salas
Dirección de Sismología - CNDG
Instituto Geofísico del Perú

INTRODUCCION

El día 15 de Agosto de 2007, a las 18h: 40m (hora local) un terremoto de carácter superficial con magnitud 7.9 Mw (7.0 ML) afectó a toda la zona sur de la región Central de Perú con intensidades máximas de VII-VIII MM (escala de Mercalli Modificada). El epicentro de este terremoto fue localizado a 74 km en dirección Oeste de la ciudad de Pisco, departamento de Ica.

A consecuencia de este terremoto, se ha producido un gran número de réplicas que fueron registradas por 10 de las estaciones que integran la Red Sísmica Nacional y/o redes locales (Figura 1). Durante un periodo de 16 días se ha registrado aproximadamente 5000 réplicas, sobresaliendo ocho con magnitudes entre 5.0 y 6.3 ML que produjeron intensidades del orden de V, MM. En el presente estudio se analiza la distribución espacio-tiempo de las réplicas a fin de conocer el proceso de liberación temporal de la energía y las dimensiones del área de ruptura.

RED SISMICA

El total de las réplicas fueron registradas por estaciones de banda ancha y periodo corto de la Red Sísmica Nacional a cargo del Instituto Geofísico del Perú (IGP) y por otras pertenecientes a proyectos especiales a cargo de la Dirección de Geodesia. De acuerdo a la Figura 1, las estaciones utilizadas prácticamente bordean el área involucrada en el proceso de ruptura; por lo tanto, en todas ellas se han registrado con buena resolución réplicas con magnitudes mínimas del orden de 2.0 ML.

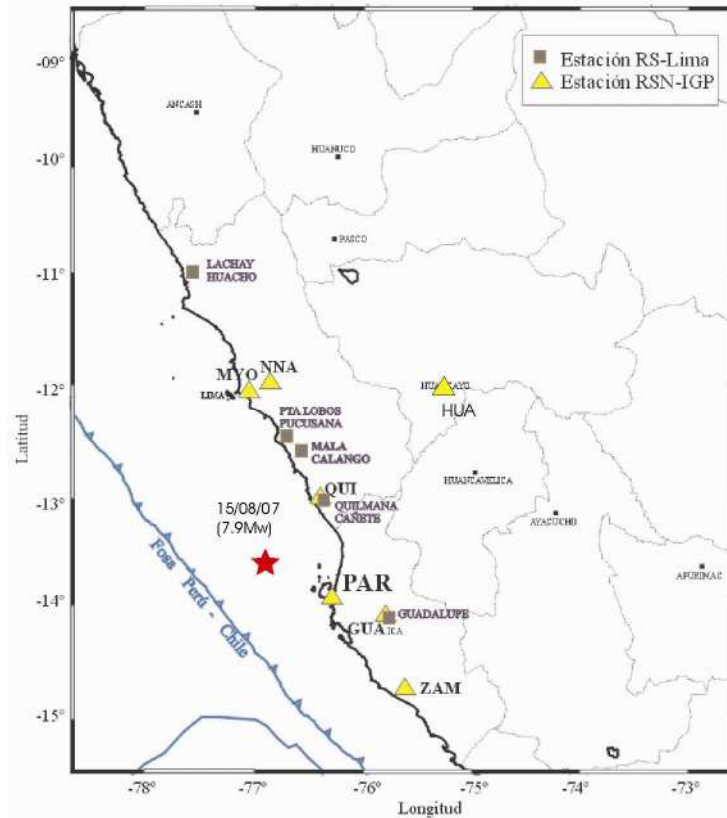


Figura 1.- Distribución de las estaciones sísmicas de la RSN y red local de Lima consideradas en el cálculo de los parámetros hipocentrales de las réplicas del terremoto de Pisco.

PROCESAMIENTO DE DATOS

Después de obtenida la información de campo, se procedió a realizar el análisis y lectura de los tiempos de llegada de las fases P y S para cada réplica a fin de calcular sus parámetros hipocentrales, además del tiempo de duración del registro de la señal para estimar su magnitud. En la Figura 2, se muestra algunos ejemplos de señales registradas en la estación sísmica de Huancayo (HUA) entre los días del 15 al 18 de Agosto de 2007. En dichos sismogramas se observa que después de ocurrido el terremoto de Pisco, el número de réplicas es mayor en frecuencia y tamaño (magnitud) y con el pasar de las horas ellos van disminuyendo.

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 la velocidad de las ondas S.

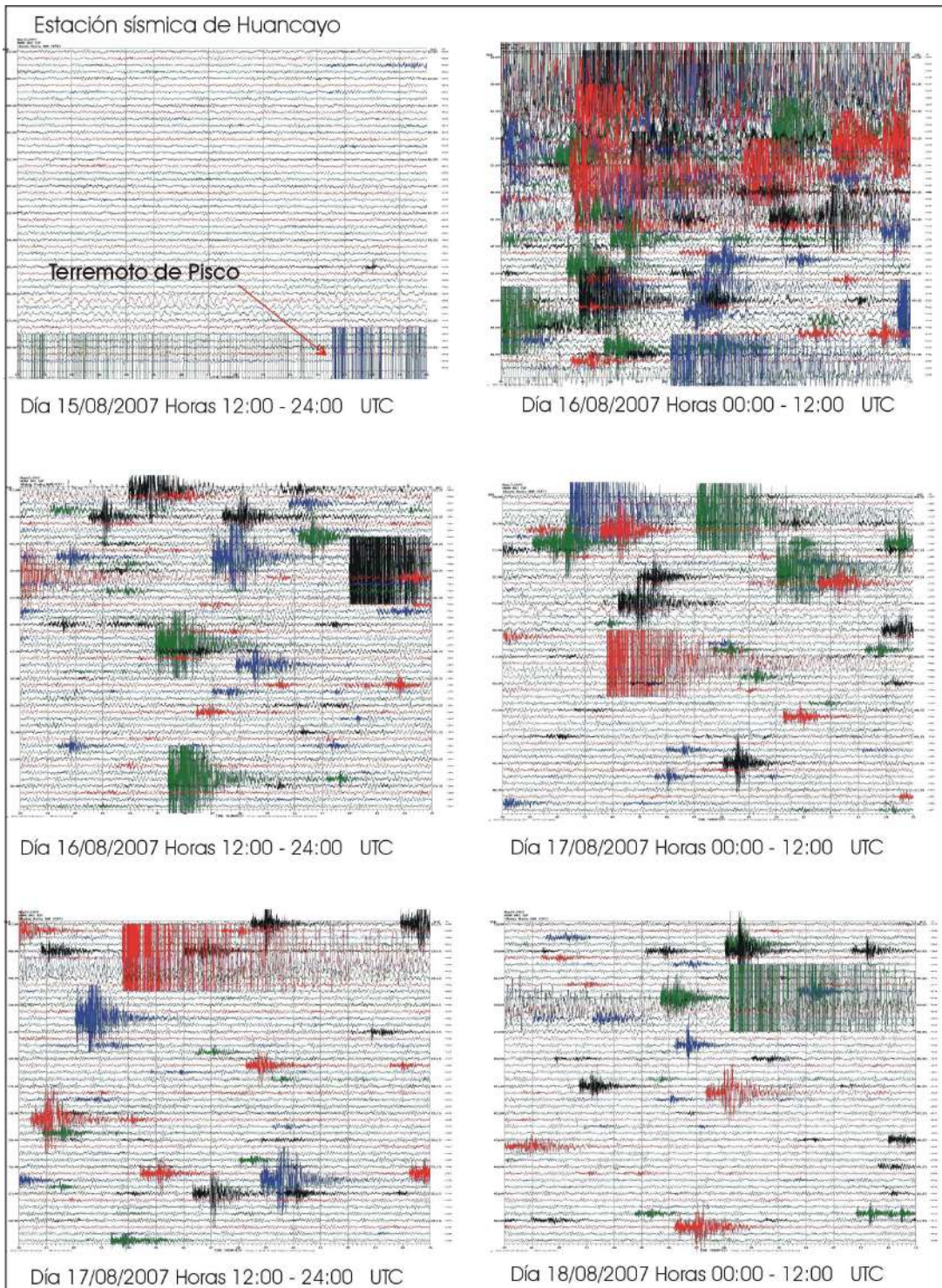


Figura 2.- Sismogramas de la estación Huancayo (HUA) con el registro del Terremoto de Pisco y serie de réplicas ocurridas entre los días del 15 al 18 de Agosto de 2007. Obsérvese que la frecuencia y amplitud de los registros son mayores inmediatamente después del terremoto y ellas van disminuyendo con el pasar de las horas.

En la Tabla 1, 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 de Lima del 3 de Octubre de 1974.

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	-----

Para corregir la velocidad de las ondas S se ha utilizado la relación V_p/V_s de 1.78 y que corresponde al obtenido por Langer y Spence (1995). 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. Las magnitudes locales así obtenidas, representan un valor relativo que permite estimar de manera aproximada la cantidad de energía liberada por cada réplica.

ANALISIS ESPACIO-TIEMPO

En la Figura 3 se muestra la distribución espacio-tiempo de las réplicas del terremoto de Pisco por horas y su análisis permite considerar lo siguiente: durante las primeras 5 horas, las réplicas se concentran alrededor del evento principal (estrella), estando únicamente una réplica de magnitud 6.0ML a 150 km en dirección SE del evento principal (círculo amarillo); es decir, frente a la Bahía Independencia. Después de 7 y 9 horas, las réplicas se incrementan y muestran dos agrupamientos, el primero alrededores del evento principal y el otro con la réplica mayor indicada anteriormente.

A las 12 y 24 horas de ocurrido el terremoto de Pisco, las réplicas muestran con mayor resolución los dos agrupamientos antes indicados, además de otro sobre la misma Península de Paracas. Transcurridos 7 días, las réplicas muestran claramente los tres agrupamientos con eventos de diversa magnitud (superiores a 2.0ML) que en conjunto sugieren el área total de ruptura.

En la Figura 4, se presenta la distribución espacio-tiempo de las réplicas por orden de magnitud. En ellas se observa que todas las réplicas con magnitudes ML mayores a 5.0 prácticamente se concentran alrededor del epicentro del evento principal (estrella) y frente a la Bahía Independencia. Las réplicas con magnitudes comprendidas entre 4.0 y 4.9 ML, van formando dos agrupamientos, uno con el evento principal y el otro frente a toda la Bahía Independencia. Del mismo modo, las réplicas con magnitudes entre 3.0 y 3.9 ML, muestran claramente la presencia de hasta tres posibles agrupamientos, siendo el correspondiente a la Península de Paracas la de menor dimensión. Finalmente, las réplicas con magnitudes entre 2.0 y 2.9 ML, muestran con mayor resolución los agrupamientos antes mencionados, además de otros de pequeñas dimensiones sobre el continente.

DISCUSION

La distribución espacio-tiempo de las réplicas analizadas en este estudio (periodo del 15 al 31 de Agosto, 2007) sugiere que el terremoto de Pisco desarrollo un complejo proceso de ruptura focalizado principalmente en tres áreas, la primera frente a la ciudad de Pisco y alrededor del epicentro del evento principal, la segunda frente a la Bahía Independencia y el tercero por debajo de la Península de Paracas. Estos agrupamientos de sismos pueden ser considerados como asperezas, siendo la ubicada frente a la Bahía Independencia la de mayor dimensión o área. Asperezas menores se observan en la Península de Paracas y en el interior del continente. Según la sección vertical de la Figura 4, las réplicas se distribuyen en profundidad siguiendo un plano inclinado de 15° a lo largo de 160 km. De acuerdo a distribución espacial de las réplicas, el área de ruptura tendría una dimensión de 170x140 km².

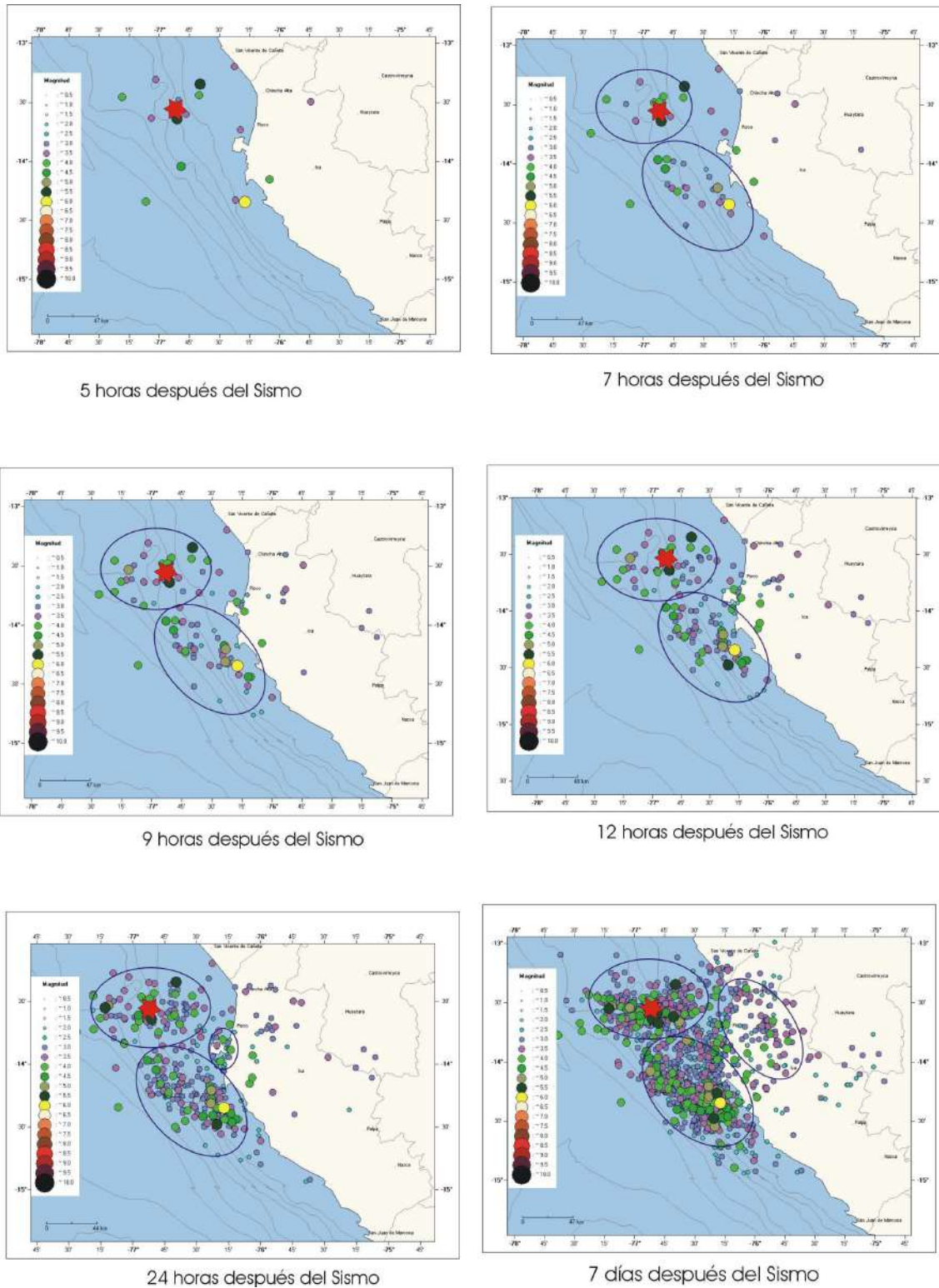


Figura 3.- Distribución espacio-tiempo de las réplicas del terremoto de Pisco por horas. Los círculos muestran los agrupamientos de réplicas discutidos en el texto.

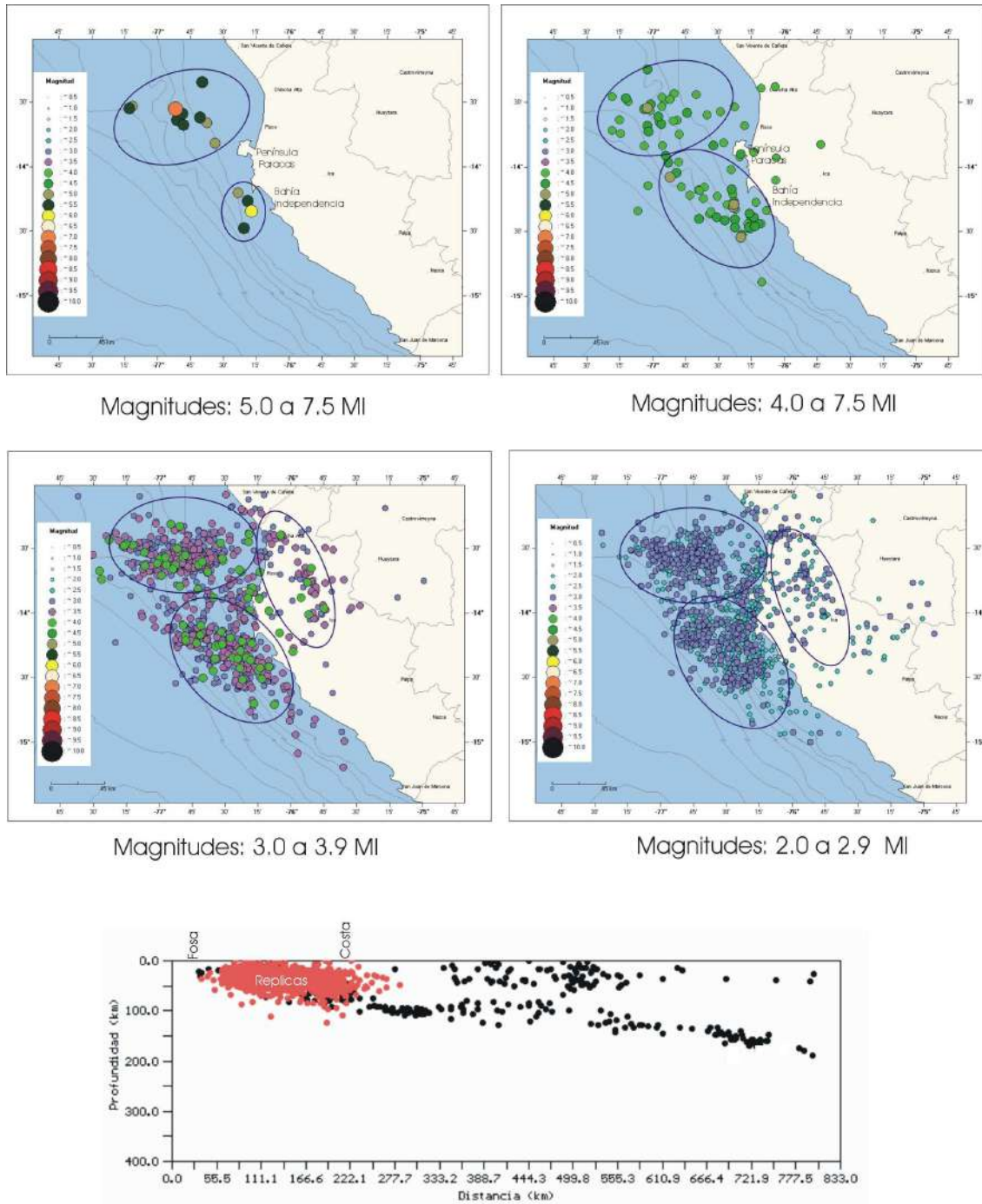


Figura 4.- Distribución espacio-tiempo de las réplicas del terremoto de Pisco en función de su rango de magnitud. Los círculos muestran los agrupamientos de réplicas discutidas en el texto. En la parte inferior, sección vertical para el total de réplicas registradas (puntos rojos) y tendencia de la sismicidad en la región central de Perú (puntos negros).

BIBLIOGRAFIA

Langer y Spence, (1995). Bul. Seism. Soc. Am., 85, 665-687.

Lee y Lahr, (1982). U.S. Geological Survey Open-file Report 75-311

Woollard, (1975). Rev. of Geophys. 14, 87-137.

LOS DIVERSOS MECANISMOS DE RUPTURA PROPUESTOS PARA EL SISMO DE PISCO: REVISION Y ANALISIS

Hugo Perfettini

Institute de Recherche pour le Développement- IRD/Perú

INTRODUCCION

Para comprender los procesos que se desarrollan durante una ruptura sísmica, es necesario conocer la historia del desplazamiento que se produce sobre el plano de falla durante el terremoto a partir de la aplicación de modelos cinemáticos. Para el terremoto del 15 de agosto del 2007 (7.0ML), se han propuesto 3 modelos cinemáticos preliminares obtenidos por diferentes investigadores, los cuales fueron calculados usando datos telesismicos, i.e., (registros obtenidos a grandes distancias del epicentro) y cuyos resultados serán mejorados con datos provenientes del campo cercano, imágenes satelitales y datos geodésicos (InSAR, GPS) que deben incorporarse a la inversión. Cabe indicar que cuanto mas información se utilice, los resultados serán más adecuados.

Un buen modelo tiene que cumplir con los datos existentes:

- a.- Ajustar correctamente los datos telesísmicos que fueron usados.
- b.- Ser consistente con la distribución espacial de las réplicas. Considerando que una zona en donde se ha producido fuertes desplazamientos con la liberación de gran cantidad de energía debido a muchos esfuerzos, no se espera una alta actividad post-sísmica. Al contrario, una zona que no rompió durante el sismo será potencialmente, una zona de fuerte actividad post-sísmica porque su proximidad a la ruptura permite que mucha energía elástica sea transferida a áreas próximas a la misma.
- c.- Respetar las observaciones del campo (tsunami, variaciones permanentes de la morfología de la costa y otros).
- d.- Ser consistente con los datos de INTERFEROMETRÍA del ERSDAC obtenido por inversión de datos de radar (satélite ALOS), (<http://www.ersdac.or.jp/eng/index.E.html>)

MODELOS EXISTENTES

Para el sismo de Pisco (15 de Agosto del 2007) se propusieron los siguientes modelos cinemáticos:

Modelo de Caltech (Ozgun Konca):

(http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/2007_peru/peru.html)

Modelo (1) obtenido por Ozgun Konca de Caltech (USA). Este modelo se muestra en las Figuras 1-4 y considera 18 registros de ondas P y 19 de SH obtenidos a distancias. En este modelo, el epicentro es ubicado a 76.509° O, 13.354° S, con foco a una profundidad de 39 km (USGS: <http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2007/us2007gbcv/#details>). El plano de ruptura propuesto tiene un azimut de 324° , un buzamiento de 27° y ángulo de desplazamiento variable. La magnitud es de $M_w=8.0$ y la velocidad de ruptura del orden de 1.5 km/s.

Modelo de Geosciences -Azur (Martín Vallée):

(<http://www-geoazur.unice.fr/SEISME/PERU150807/note1.html>)

Modelo (2) obtenido por Martín Vallee de Geosciences Azur (Francia). Este modelo se muestra en las Figuras 5-7, y considera 15 registros de ondas P obtenidos a distancias telesísmicas. El plano de ruptura propuesto tiene un azimut de 318° , un buzamiento de 20° y ángulo de deslizamiento variable. El momento sísmico es de $8.1E+20$ N.m y corresponde a $M_w=7.9$. La velocidad de ruptura es 1.3 km/s y su duración de 98.5 s. Las dos rupturas o zonas de desplazamiento máximo (o asperezas sísmicas) están separadas por 60 s.

Modelo de Tsukuba Universidad (Dr. Yagi):

(http://www.geo.tsukuba.ac.jp/press_HP/yagi/EQ/20070816/)

Modelo (3) obtenido por el Dr. Yagi de la Universidad de Tsukuba (Japón). Este modelo se muestra en las Figuras 8-10, y considera 15 registros de onda P obtenidos a distancias telesísmicas. El plano de ruptura propuesto tiene un azimut de 320° , un buzamiento de 18° y ángulo de deslizamiento variable. El momento sísmico es de $2.0E+21$ N.m y corresponde a $M_w=8.1$. La velocidad de ruptura máxima es de 1.75

km/s. con una duración de casi 180 s. Las dos rupturas o zonas de desplazamiento máximo (o asperezas sísmicas) están separadas 60 s.

CARACTERISTICAS COMUNES

Los elementos comunes entre estos 3 modelos de inversión son:

- a) Existencia de 2 asperezas (o zonas de desplazamiento fuerte). Una esta ubicada cerca del epicentro del sismo y frente a la ciudad de Chincha. La segunda más al sur de la península de Paracas y cerca de la fosa. En los modelos 1 y 3, la segunda aspereza es más fuerte que la primera. Caso contrario de lo observado para el modelo 2. Para los 3 modelos, la primera aspereza es más profunda que la segunda que es más superficial y cercana a la fosa.
- b) El tiempo de la ruptura entre las dos asperezas es de 60 segundos. Se considera una distancia promedio de 100 km entre ellas, con una velocidad de propagación de energía del orden de 1.7 km/s.; es decir, relativamente baja (los valores característicos son del orden 2-3 km/s).
- c) Existencia de un desplazamiento significativo bajo el continente cerca de la costa, lo cual es raro para un terremoto con origen en el proceso de subducción.

COMPARACIONES CON OBSERVACIONES DE CAMPO

- ❖ De los 3 modelos propuestos, el Modelo 3 es el que mejor se ajusta a los datos telesísmicos (sintéticos vs. Datos), seguido por el Modelo 2 y finalmente por el Modelo 1 (Figuras 3, 5, 7, y 9).
- ❖ El modelo 1, predice 1.5 m de levantamiento de la costa al nivel de la península de Paracas (Figura 4). Las observaciones de campo sugieren un máximo de 40 cm. El Modelo 3 es lo más consistente con esta observación. El Modelo 2 es intermedio.
- ❖ Los datos de tsunami sugieren una altura mayor de la ola al sur de la península de Paracas con respecto al norte. El tiempo de llegada de la ola es entre 10-15 minutos al sur de la península y de 20-25 minutos al norte. Eso sugiere que el tsunami se inició a una distancia significativa de la costa. El Modelo 1, no ajusta con ninguna

de estas observaciones. Para el Modelo 2, la segunda ruptura se produce debajo del continente y no puede originar un tsunami. La primera ruptura se origina a distancias considerables de la costa y puede justificar el tiempo de llegada de la ola. Pero el modelo no justifica la amplitud de la ola al sur de la península respecto a su extremo norte. Para el Modelo 3, la segunda aspereza presenta menos desplazamiento pero considera una área de ruptura mas grande y puede dar origen a una ola del orden de 1.5 m, consistente con las observaciones de run-up al sur de la península de Paracas. En el modelo 2, la altura máxima de la ola seria de 2-3 m y en el modelo 1, hasta 4 m. Estos valores parecen exagerados comparados con las observaciones de campo.

- ❖ El Modelo 1, no es consistente con la distribución espacial de las réplicas (Figura 11). La segunda aspereza esta ubicada al centro de uno de los clusters de sismicidad mas activo, y la primera, muy lejos de la actividad post-sísmica. En el Modelo 2 (Figura 12), no hay suficiente desplazamiento cerca de la fosa para explicar la alta densidad de réplicas en esa zona. En la Figura 15, se presenta un modelo conceptual para la ruptura, consistente con la distribución de las réplicas. Y bastante similar al Modelo 3 (Figura 13).
- ❖ El interferograma ALOS sugiere la presencia de una zona de desplazamiento máximo al oeste de la península de Paracas (ver Figura 14, la dirección de convergencia de las franjas), y el único modelo consistente con esta característica es el Modelo 3.

CONCLUSIONES

Existen 3 modelos preliminares de ruptura obtenidos a partir de datos telesísmicos. De los 3 modelos, el propuesto por el Dr. Yagi (Modelo 3) es mas consistente con los observaciones de campo a diferencia del obtenido por el Modelo 1. El Modelo 2 se encuentra entre ambos modelos. Pero el factor "tiempo" justifica las debilidades de estos modelos debido a que fueron publicados 5 días después el sismo. La geometría de la falla es un factor determinante en el proceso de inversión y ella es variable entre los modelos.

En el Modelo 1, la geometría de la falla definida por la solución preliminar del catalogo CMT (Universidad Harvard), no considera la geometría compleja de la

subducción. El buzamiento es de 28° , siendo 10° mayor que lo obtenido con los otros modelos y además existe contradicción con la distribución de la microsismicidad en la zona descrito por Tavera, et al. 2007.

Entre los Modelos 2 y 3, el azimut de la falla es casi idéntico aunque este parámetro no es tan importante como el buzamiento, el cual presenta una variación de 2° , pudiendo ser responsable de las diferencias en la solución de los modelos, es probable también, que haya influencia del método de inversión de los datos utilizados o del modelo de velocidad usado, etc.

La velocidad de ruptura en los 3 modelos es anormalmente baja. Dos escenarios pueden justificar este punto.

a.- El terremoto de Pisco consiste en la ruptura de 2 sub-eventos. El primer evento cerca de Chíncha y el segundo, de mayor magnitud, al oeste de la península de Paracas separados por 60 segundos. Considerando una velocidad típica para la propagación de la ruptura de 3 km/s, y una distancia entre asperezas de 100 km, el tiempo sería del orden de 33 s. Este escenario implica que llegan las ondas de la primera ruptura en el sitio de la próxima, se espera 30 s (para mantener 60 s entre la ruptura de las 2 asperezas), y se inicia el segundo evento. Sin embargo, el frente de ruptura descrito en la Figura 1 no es consistente con una des-aceleración en el proceso de ruptura, que parece bastante continuo, así que este escenario es poco probable.

b.- La ruptura atravesó una zona de desplazamiento estable o zona de "creep". Modelos teóricos sugieren que la ruptura puede tener durante un tiempo una alta velocidad (km/s) si el frente de ruptura tiene suficiente amplitud y la zona es delgada (Perfettini y Ampuero, 2007), eventualmente cruzarla y reiniciarla al otro lado de esta zona de "creep". Velocidades del orden de 1 km/s parecen posibles en esta zona y son consistentes con la existencia de los "Tsunami earthquakes" (Okal y Newman, 2001). Si es el caso, es posible que durante su propagación en esta zona de "creep", la ruptura irradia pocas ondas sísmicas y casi no aparecen en los sismómetros. Es probable que el power spectrum de una zona de desplazamiento estable es pobre en altas frecuencias (e.g., 1-100Hz) pero rico en bajas frecuencias. Sin embargo, este desplazamiento puede ser detectado, o al menos su valor final (o estática), pero por el momento no se cuenta con esta información,

siendo los datos de Interferometría de radar (InSAR) los únicos medios de identificar este probable escenario. Si las inversiones hechas tomando solo datos sismológicos, y las hechas con el InSAR muestran diferencias sistemáticas, pueden sugerir una contribución significativa para la existencia de una componente asísmica en la ruptura. Un punto importante a favor de este escenario se muestra en la Figura 15, y en donde no hay réplicas entre las dos grandes asperezas, lo que significa que la zona está libre de acumulación de esfuerzos, en estas condiciones, los 3 modelos obtenidos a partir justamente de datos sismológicos sin considerar al creep, muestran poco desplazamiento co-sísmico en esta zona.

La distribución del desplazamiento post-sísmico va a permitir comprender mejor en proceso de ruptura y ver cual escenario es el más probable. La presencia de desplazamientos bajo el continente es una característica común en los 3 modelos y no parece ser un problema del proceso de inversión. Mas sugiere que en esta área, la zona sísmogena es continua hasta el pie de la alta topografía, como es el caso en el lado norte de Pisco y sur de Nazca. El proceso de ruptura del terremoto de 1996 (Figura 15, línea azul) es bastante similar al de Pisco con respecto al modo de propagación en el continente. Es muy posible que en el proceso de subducción de la dorsal de Nazca se ha levantado parte de la placa continental creando una plataforma entre Pisco a Nazca (Hampel, 2002). Como en esta zona, hay menos distancia entre la costa y la fosa (pero la distancia cordillera-fosa permanece constante), la ruptura estaría mas en el continente. Así la línea de costa no limita la zona sísmogena, sino alta topografía que parece ser un buen indicador de dicho límite. El carácter asísmico (creep) de la dorsal, como es propuesto en la literatura, puede ser también una explicación del proceso complejo de la ruptura. Los dos efectos del creep sobre la ruptura de los grandes sismos son: 1) Segmentar la ruptura, disminuyendo así el tamaño de los sismos. 2) Recargar las asperezas sísmicas mas rápidamente, haciendo que el tiempo de recurrencia entre sismos consecutivos sea mas corto. La variación entre la frecuencia y el tamaño de los grandes sismos ($M_w \sim 8$ y mas) entre el norte de la dorsal (donde ya se ha subducido la dorsal) y el sur es clara. El tiempo de recurrencia para sismos grandes en el sur, es mas largo, con una tendencia clara a generar eventos mas grandes ($M_w \sim 8.5$ y mas). Pero en el norte (con respecto a la dorsal de Nazca), es lo contrario: más sismos de menor magnitud.

Muchas de estas consideraciones permanecen como especulativas y dan solo pistas potenciales para investigaciones futuras.

BIBLIOGRAFIA

H. Perfettini and J.P. Ampuero, "Dynamics of a velocity strengthening fault region: Implications for slow earthquakes and postseismic slip", submitted to JGR, 2007.

E. A. Okal and A.V. Newman, "Tsunami earthquakes: the quest for a regional signal", *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2001

A. Hampel, "The migration history of the Nazca Ridge along the Peruvian active margin: a re-evaluation", *Earth and Planetary Science Letters*, 2001.

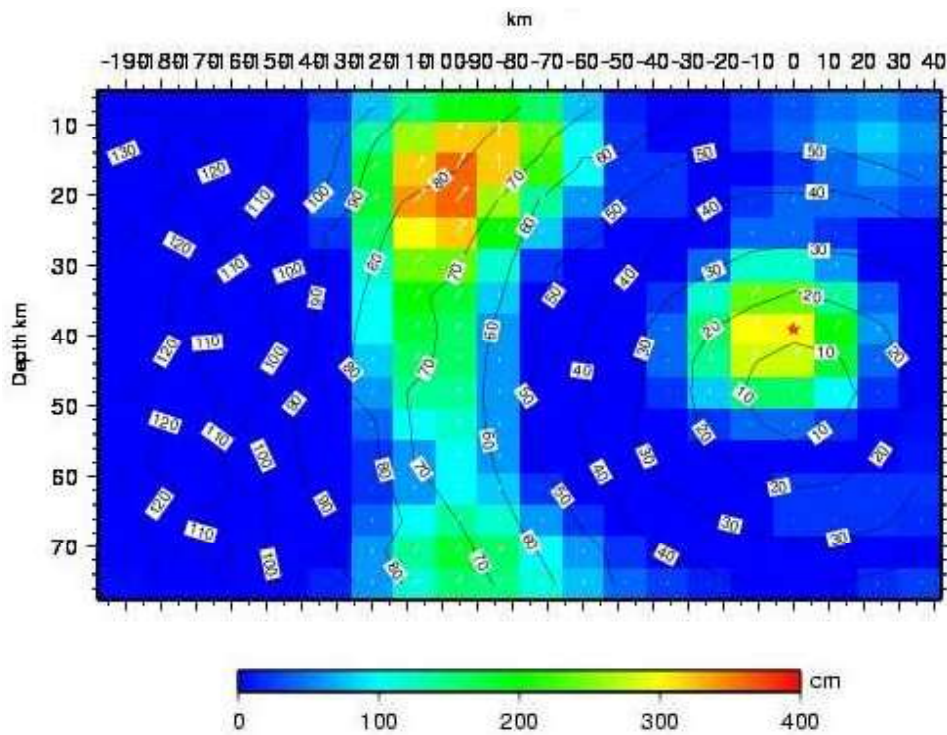


Figura 1.- Modelo cinemático de O. Konca (Caltech).

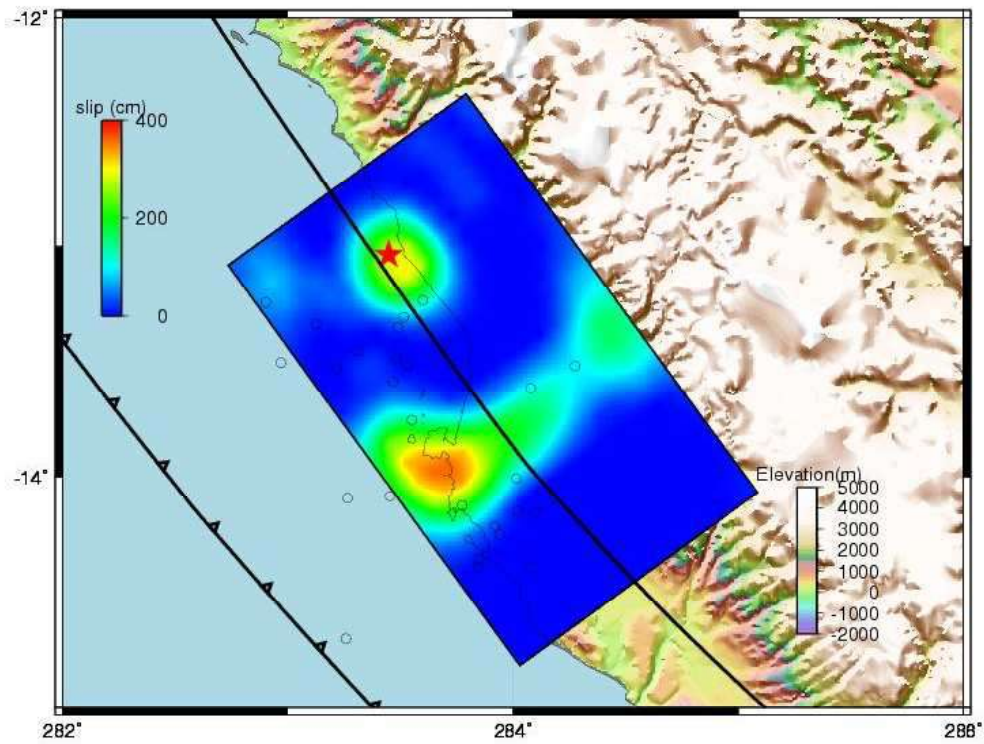


Figura 2.- Modelo cinemático de O. Konca (Caltech).

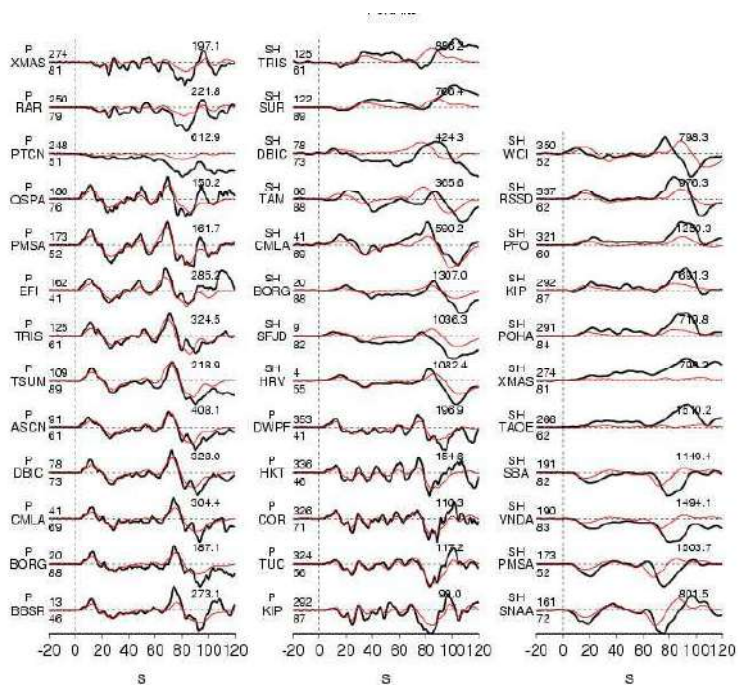


Figura 3.- Registros sintéticos vs. Registros reales para el modelo cinemático de O. Konca (Caltech).

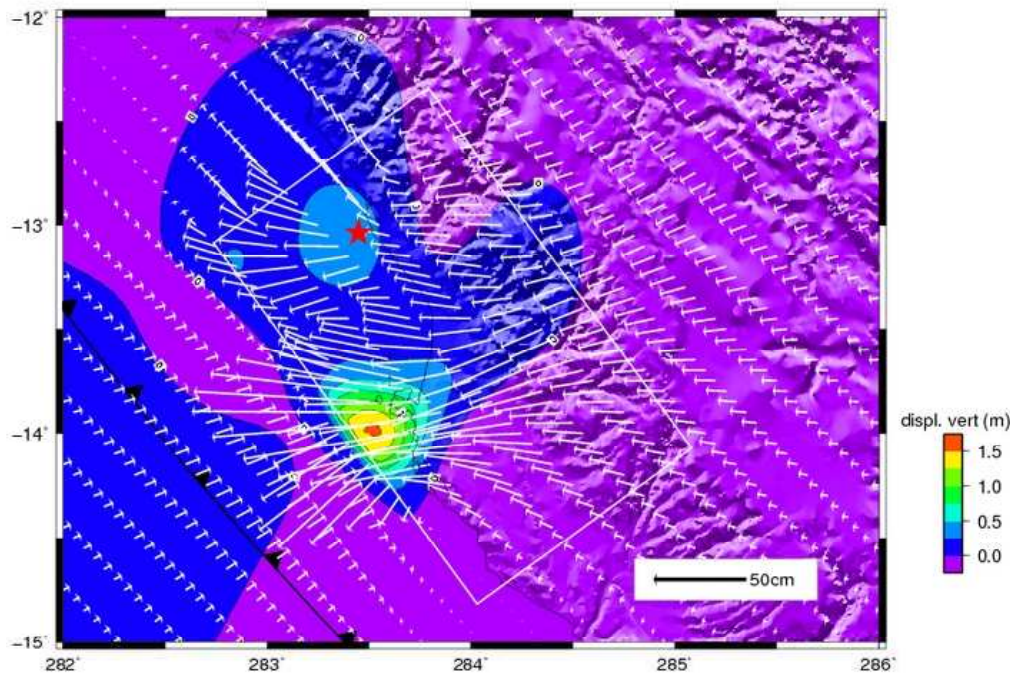


Figura 4.- Desplazamiento en superficie, del modelo de O. Konca (Caltech). Mas de 1.5 m de uplift es predecido abajo la península de Paracas.

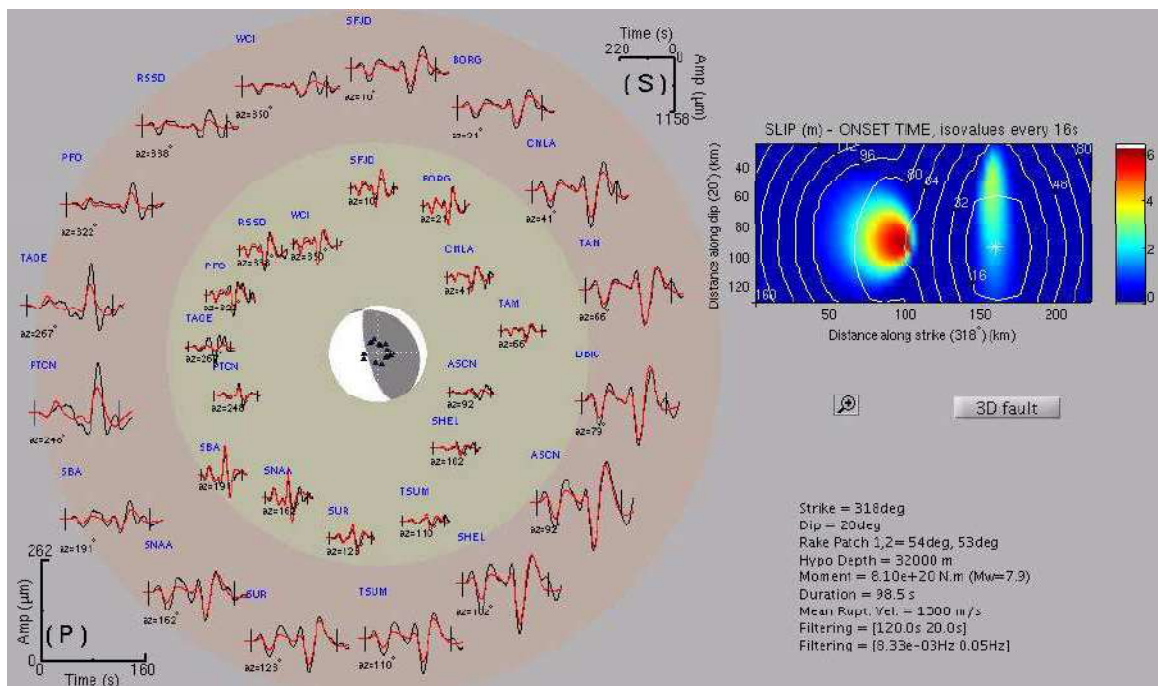


Figura 5.- Modelo cinemático de M. Vallee (Geosciences Azur).

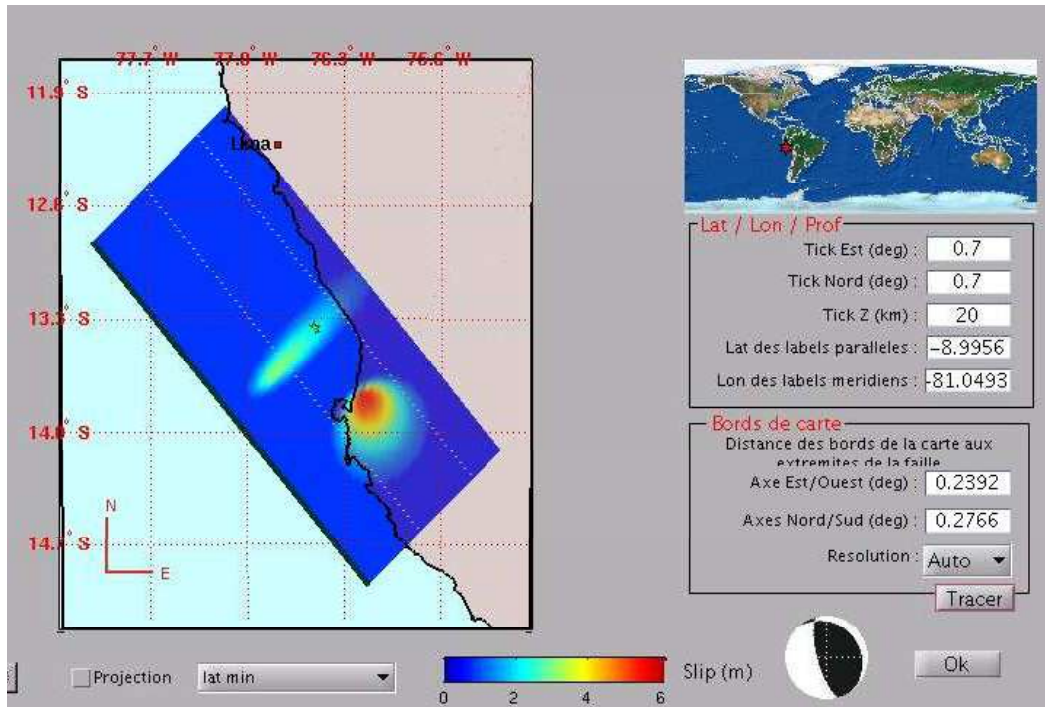


Figura 6.- Modelo cinemático de M. Vallee (Geosciences Azur).

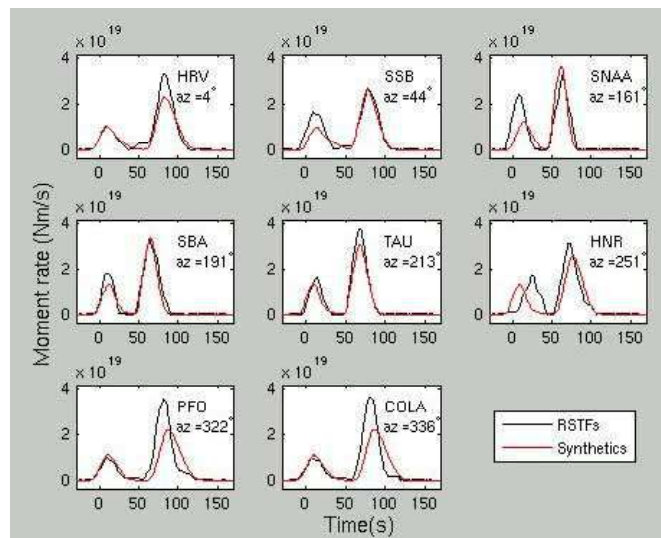


Figura 7.-: Registros sintéticos vs registros reales para el Modelo cinemático de M. Vallee (Geosciences Azur).

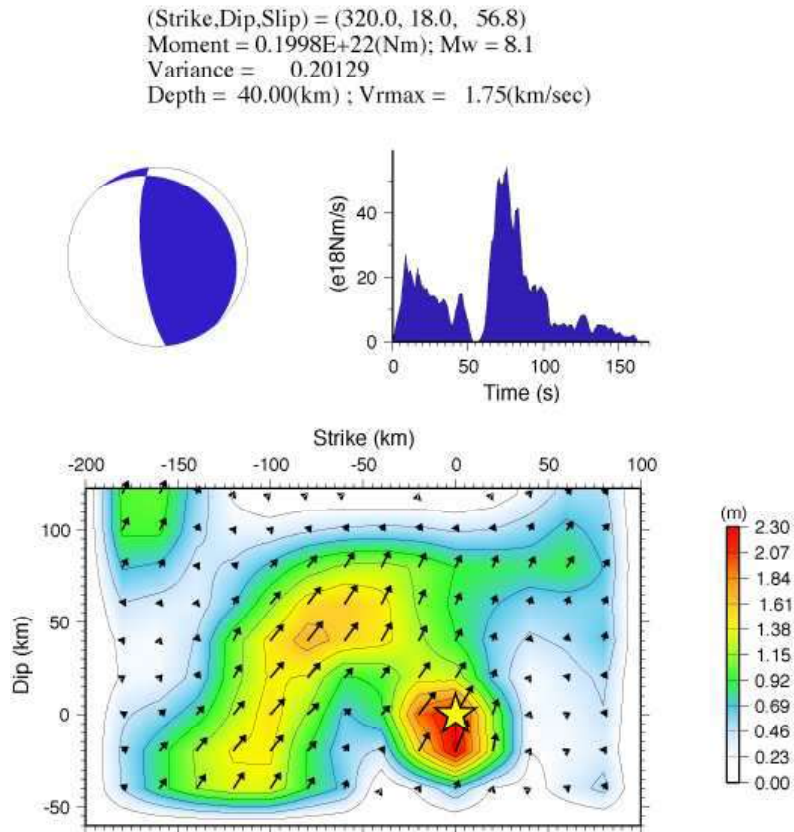


Figura 8.- Modelo cinemático de Tsukuba Universidad (Dr. Yagi).

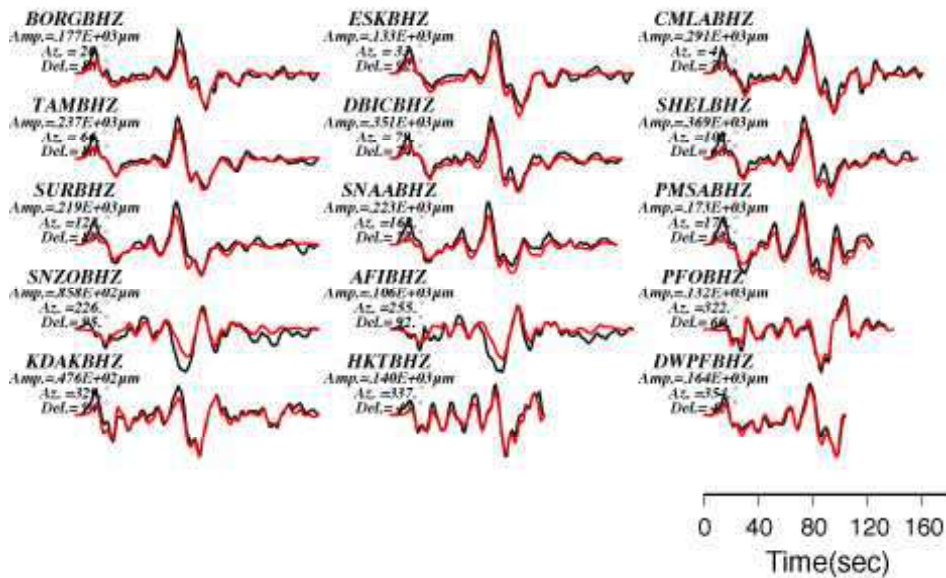


Figura 9.- Registros sintéticos vs. Registros reales para el modelo cinemático de Tsukuba Universidad (Dr. Yagi).

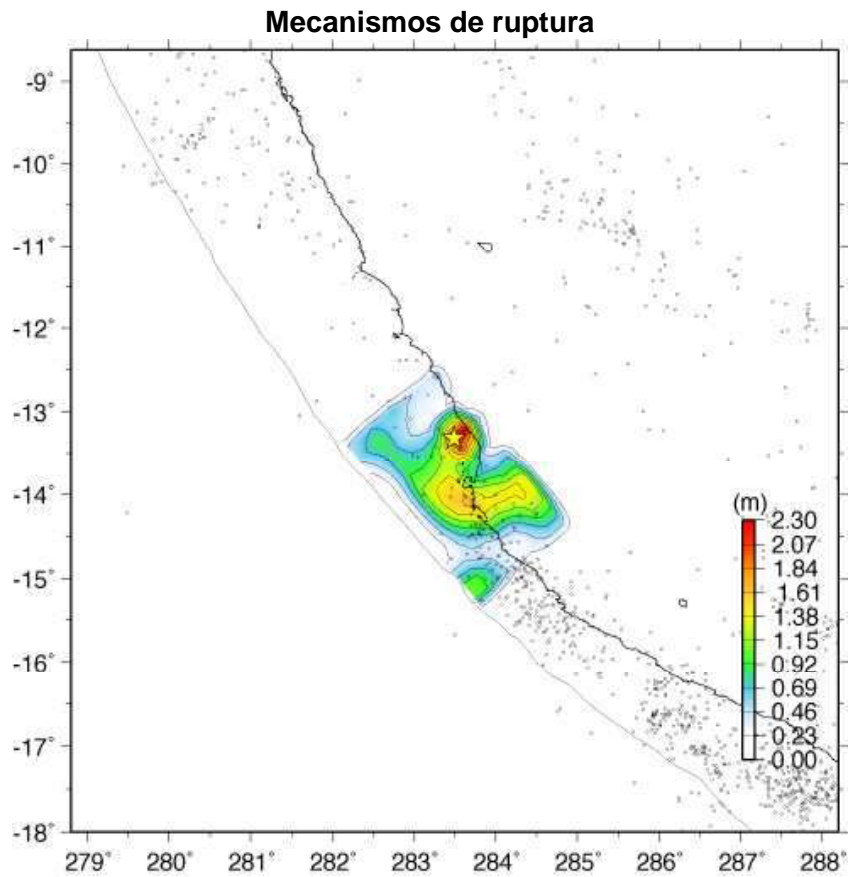


Figura 10.- Modelo cinemático de Tsukuba Universidad (Dr. Yagi).

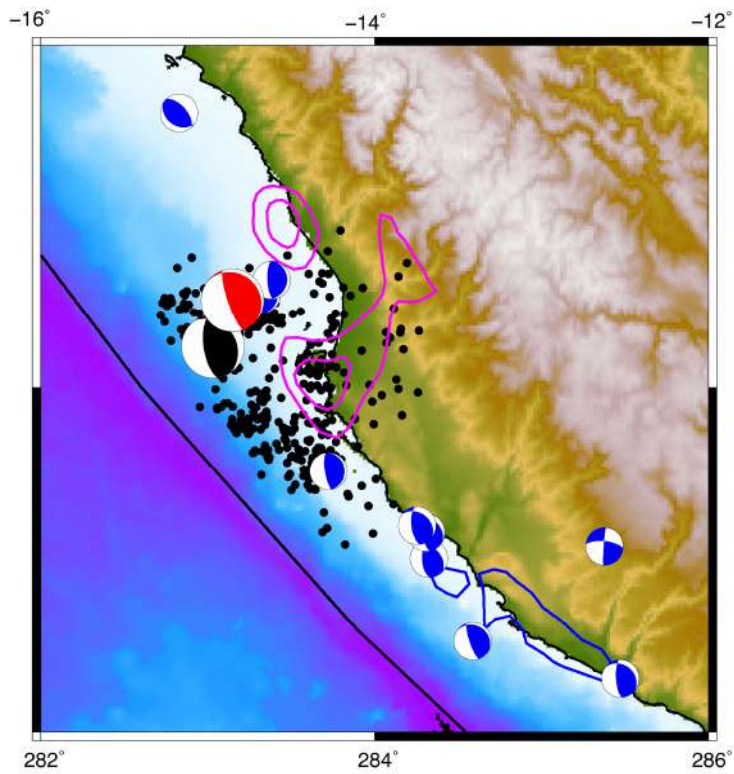


Figura 11.- Replicas mayores y contornos del Modelo 1.

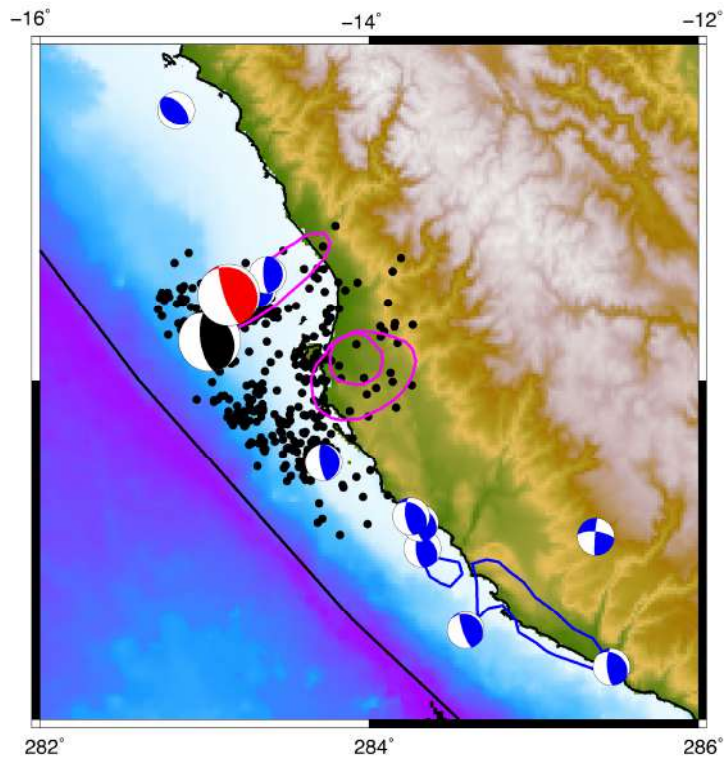


Figura 12.- Replicas mayores y contornos del Modelo 2.

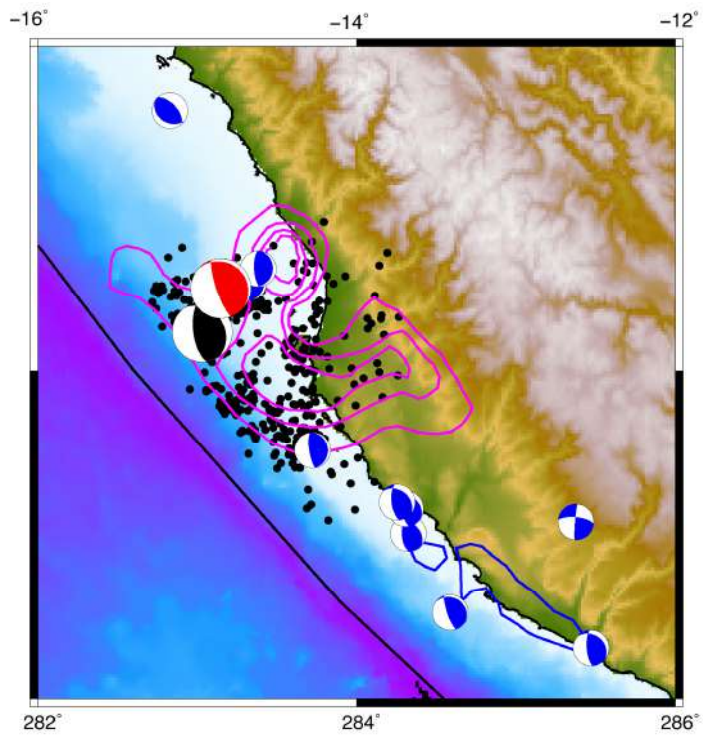


Figura 13.- Replicas mayores y contornos del Modelo 3.

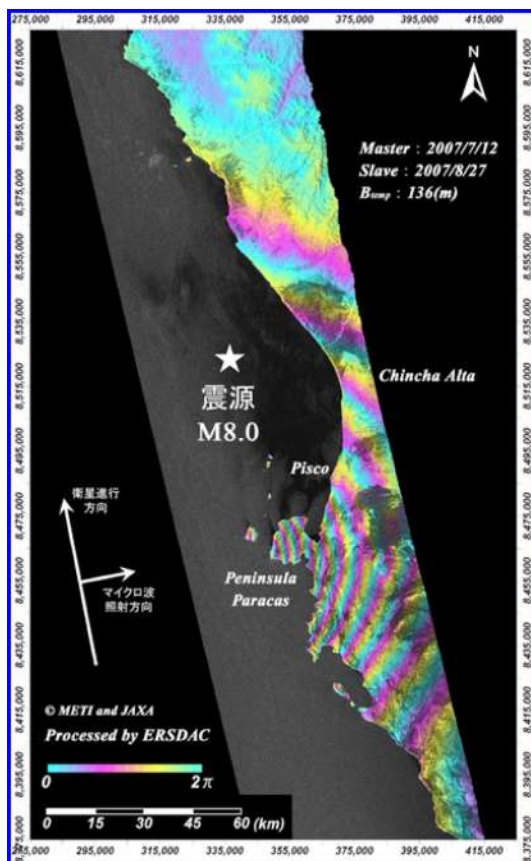


Figura 14.- Interferograma ALOS obtenida por ERSDAC.

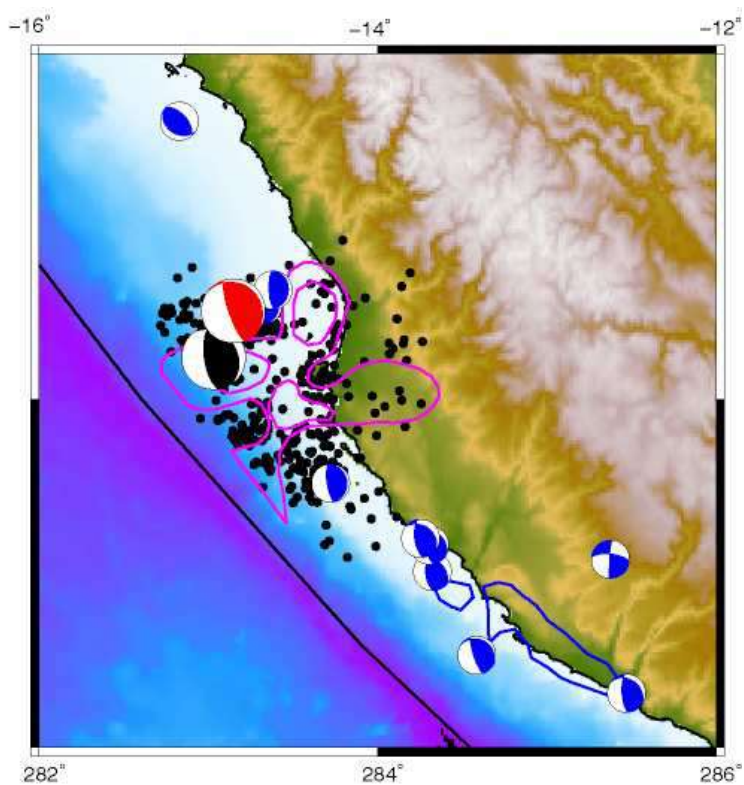


Figura 15.- Modelo conceptual en acuerdo con la distribución espacial de las replicas.

EL TERREMOTO DE PISCO DEL 2007 ¿.. ES REPETITIVO DEL TERREMOTO DE 1716...?

Hernando Tavera

*Dirección de Sismología – CNDG
Instituto Geofísico del Perú*

INTRODUCCION

En zonas de subducción, la ocurrencia continua de grandes sismos se produce de manera repetitiva en el tiempo, esto debido a que las placas deben movilizarse por partes o involucrando áreas pequeñas en su inevitable avance. En el caso del borde occidental del Perú, la placa de Nazca se introduce por debajo de la Sudamericana a una velocidad del orden de 8-10 cm/año, siendo estas dimensiones estimadas de los desplazamientos producidos durante la ocurrencia de grandes terremotos. De acuerdo a esto, el área en donde se produjo un terremoto en el pasado, debe ser fuente de otro en el futuro con la probabilidad de que presente las mismas características en su proceso de ruptura y en los efectos que ellos producen en las ciudades cercanas al epicentro.

En el caso del Perú, el único terremoto histórico para el cual se ha documentado información sísmica que permita proponer la hipótesis de ser un terremoto repetitivo ocurrió en el año 1996 (7.7Mw), el mismo que habría presentado características similares al ocurrido en el año 1942 con una magnitud de 8.1Mw (Tavera et al, 1998). Aunque el sismo de 1996 fue de menor magnitud, la similitud entre sus curvas de isosistas y la forma de sus señales sísmicas registradas en estaciones ubicadas en los mismos azimutes y distancias epicentrales, sustentan la hipótesis de similitud (Figura 1).

En este estudio, se compara algunas de las características de los efectos causados por el terremoto de Pisco del 2007 con las que habría presentado un terremoto ocurrido en la misma zona en el año 1716. La información que se utiliza es descriptiva y corresponde a la presentada por Silgado (1978). Debe indicarse que las primeras estaciones sísmicas en el mundo empezaron a funcionar en la primera década de los años 1900.

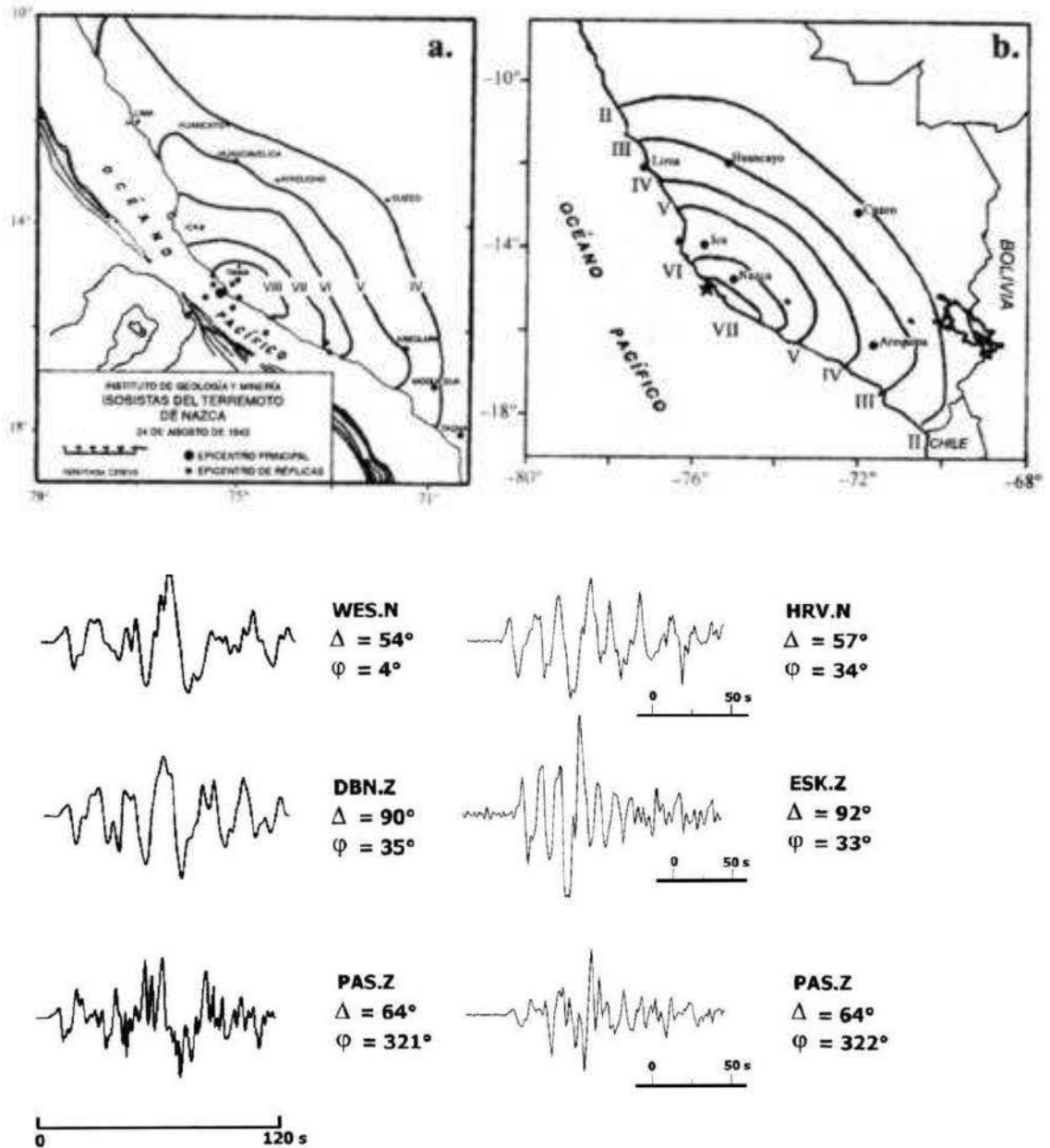


Figura 1.- Arriba: Mapas de intensidades para los sismos de 1942 (izquierda) según Silgado (1978) y 1996 (derecha) según Chatelain et al (1997). Obsérvese la similitud en la forma de las curvas de isosistas.

Abajo: Comparación entre las formas de onda de los terremotos de 1942 (izquierda) y 1996 (derecha) correspondientes a estaciones ubicadas en azimutes y distancias similares, a excepción de la estación PAS. En todos los registros se observa el mismo número de trazos, que al margen de su amplitud y periodo, son similares. Las líneas horizontales indican la escala de tiempo.

EL TERREMOTO DE 1716

Según Silgado (1978), el 10 de Febrero de 1716 se encontraba en el puerto de Pisco un viajero francés de nombre La Barbinais Le Gentil esperando el barco que lo conduciría a China. Dicho personaje relata lo siguiente:

“... Llegue a ese puerto el día 3 de Febrero para ser testigo de un terremoto, acompañado de circunstancias como para inspirar terror. Sucedió el día 10 a las 8 de la noche y vi que en casi un instante se derribaron casi todas las casas. Quise huir, pero el miedo que, dicen dá alas, parecía haberme atado los pies. A duras penas pude llegar a la plaza de la villa a donde todo el mundo se había refugiado. Como al cuarto de hora, tembló de nuevo la tierra que abriéndose en algunos lugares, expelió chorros de polvo y agua con ruido pavoroso. Esa noche fue de horror y espanto, pues la tierra se agitaba a cada momento. No éramos sino tres o cuatro franceses que no nos atrevíamos a abandonar las ruinas de nuestras casas y aún menos a habitarlas. La consternación era general en esa desdichada villa, no solo a causa de las sacudidas continuas de tierra, sino por el temor de que el mar la inundara una segunda vez, como ya había ocurrido hacia unos 38 años. El día 11 como a las 9 de la mañana la tierra tembló con mas violencia que el día anterior...”.

Todos los movimientos habrían sido sentidos en Lima y con gran intensidad el principal.

Al margen de lo creíble o no de este relato, es necesario resaltar la posible ocurrencia de los siguientes sucesos:

- “... en casi un instante de derribaron todas las casas...”. Aunque esto es normal de apreciar cuando ocurre un terremoto, se debería aceptar que el relator hace referencia a que la totalidad de casas existentes alrededor de la plaza de la villa colapsaron.

- “...la tierra se abrió en algunos lugares, expelió chorros de polvo y agua con ruido pavoroso...”. Por las características del suelo de Pisco, es evidente que lo que el relator observó fueron procesos de licuación de suelos producidos probablemente en áreas bastante grandes como para llamar la atención. Es sabido que en Pisco las capas freáticas están cerca de la superficie y por lo tanto, el polvo y el agua habrían

emergido por la presión que ejerce el suelo durante su movimiento a causa del terremoto.

.- "... por el temor de que el mar la inundara una segunda vez, como había ocurrido hacía unos 38 años...". De manera simple el relator describe el temor de los habitantes que recuerdan a otro terremoto, quizás de similar tamaño, que produjo un tsunami que pudo haber ocasionado daños en Pisco. De acuerdo a esta información, el sismo ocurrido hace 38 años antes de 1716, correspondería al que se produjo el 17 de Junio de 1678 con posible epicentro frente a la costa del Callao afectando principalmente a la ciudad de Lima. Aunque Silgado (1978) no indica que dicho sismo haya producido un tsunami. Según el relator, se entendería que el tsunami producido por este terremoto llegó a Pisco.

.- "...El día 11 como a las 9 de la mañana la tierra tembló con mas violencia que el día anterior...". Según esta información, el sismo del día 10 sería un precursor, pero el relator no describe los sucesos que acontecieron este día en que el sismo habría sido más grande que el anterior; por lo tanto, se asume que es un error de percepción del terremoto.

TERREMOTOS DEL 2007 y 1716

En los diferentes trabajos presentados en este volumen, se ha descrito de diversa formas las características del terremoto de Pisco; por lo tanto, el autor se limitara a realizar una breve descripción comparativa entre los terremotos de 1716 y 2007.

.- Durante el terremoto de Agosto de 2007, las casas, edificios e iglesias de la ciudad de Pisco colapsaron en pocos segundos, y cualquier observador pudo relatar sucesos similares al terremoto de 1716.

.- En Pisco y áreas aledañas, el terremoto del 2007 produjo importantes procesos de licuación de suelos y deslizamientos de grandes volúmenes de tierra formando agrietamientos de diferentes dimensiones. Muchos de estos procesos pueden ser fácilmente interpretados como que la tierra se abrió durante el terremoto.

.- Asimismo, el terremoto de Pisco ha puesto en evidencia directa que en todo el extremo nor-oeste del departamento de Ica, la capa freática se encuentra muy cerca de la superficie y durante su ocurrencia, la presión ejercida por las ondas en el suelo inestable produjo la emanación de agua con brotes a diferentes alturas y tamaños, y en algunos casos, los chorros de agua tomaron colores oscuros al mezclarse con los componentes mineralógicos del suelo (Figura 2). Estos chorros de agua al ser expulsados producen ruidos pavorosos, tal como se describe para el terremoto de 1716.



Figura 2.- Poblador de la localidad de Tambo de Mora (Chincha) indicando la altura a la cual llegaron los chorros de agua (1.20m) que brotaron durante el terremoto de Pisco de 2007 (foto de M. Olcese, PUCP).

.- El terremoto de Pisco produjo un tsunami que tuvo mayores consecuencias en los alrededores de la Península de Paracas, pero también se sabe que las olas de dicho tsunami llegaron a Pisco-Playa con alturas medias del orden de 3 metros y distancias de inundación máxima de 760 metros, y en otros como el Muelle Fiscal de 450 metros. Las viviendas dañadas por el tsunami se encontraban a distancias medias de la playa del orden de 700 metros. Los comentarios del relator, no indican que el terremoto de 1716 produjo tsunami en Pisco.

COMENTARIOS

Aunque la información disponible para el terremoto de 1716 es mínima, la descripción precisa de algunos acontecimientos puntuales, permite de alguna forma proponer procesos similares al terremoto del 2007. En estas condiciones, el terremoto del 15 de agosto de 2007 se habría producido después de 291 años de lenta e importante acumulación de energía en las placas frente a la localidad de Pisco.

BIBLIOGRAFIA

Silgado, E. (1978). Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974), Serie C, Instituto de Geología y Minería, 133 pags.

Chatelain, et al. (1997). The Mw=7.7 Nazca (Peru) earthquake, November 12, 1996: A repetition of the 1942 event..?. Seis. Res. Lett., 68, 917-922.

INTENSIDADES MACROSISMICAS

INTENSIDADES MACROSISMICAS EN LAS AREAS URBANAS DE LAS CIUDADES DE PISCO, ICA Y CHINCHA DEBIDAS AL SISMO DEL 15 DE AGOSTO DE 2007

**Consuelo Agüero², Hernando Tavera¹, Efraín Fernández², Porfirio Huaco³,
Carmen Talavera², Luz Arredondo²**

¹Dirección de Sismología; ²Centro Nacional de Datos Geofísicos

*³Dirección de Geodesia y Geología
Instituto Geofísico del Perú*

INTRODUCCION

El 15 de Agosto del 2007, a horas 23:40:58 GMT, el Departamento de Ica fue afectado por un sismo de magnitud 7.0 ML (escala de Richter) causando daños en un área que incluye a los Departamentos de Huancavelica, Ayacucho, Sur de Lima y Norte de Arequipa. Este sismo fue denominado “Sismo de Pisco”, debido a que su epicentro fue localizado a 60 km al Oeste de la ciudad de Pisco, siendo la más afectada por el sismo. Según reportes del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) el sismo ocasionó 595 pérdidas humanas, 1,039 heridos y 35,214 familias damnificadas. En la Provincia de Pisco se ha reportado 335 personas fallecidas, 100 heridos y 16,000 familias damnificadas.

La Dirección de Sismología del Instituto Geofísico del Perú, preparó un programa de estudios a desarrollarse en las ciudades de Pisco, Chincha e Ica para realizar observaciones de los daños ocasionados por el sismo, así como determinar el nivel de sacudimiento del suelo basándose en la escala sísmica de intensidades M.S.K.- 64, versión adaptada para su uso en el Perú por Ocola (1979). El estudio fue realizado en dos etapas, la primera consistió en el trabajo de campo (16 al 22 de Agosto) para la toma de datos en las ciudades indicadas. Los formularios utilizados corresponden a los “Formatos de Encuesta de Intensidades, Efectos en Construcciones y Efectos en el Suelo”. En la segunda etapa se realizó la interpretación y análisis de los datos de campo, así como la preparación de mapas de intensidades macrosísmicas, antigüedad de viviendas y niveles de daño.

La metodología para el análisis y evaluación de intensidades macrosísmicas utilizada en el presente estudio se encuentra detallada en el Anexo adjunto.

DISTRIBUCION DE INTENSIDADES EN LA CIUDAD DE PISCO

Considerando la densidad urbana de la ciudad de Pisco, se tomaron un total de 30 muestras distribuidas proporcionalmente en toda la ciudad, y considera viviendas de uno ó dos pisos. En la Figura 1 se muestra la ubicación de las viviendas evaluadas y los valores de intensidad asignados en cada una. El valor máximo de intensidad corresponde al grado 8⁻ hacia el Oeste de la Av. José de San Martín. Los valores de intensidades correspondientes al grado 7⁺, predominan en casi toda la zona urbana de la ciudad; Urbanizaciones San Alberto, Alborada, Elías Barrionuevo, Santa Rita y también en los alrededores de la Plaza de Armas. Los valores de intensidades equivalentes al grado 6⁺ corresponden al sur de la ciudad de Pisco, desde la parte norte de la Urb. La Esperanza hasta la Urb. Las Américas.

Los puntos con intensidades 7⁺ M.S.K, se encuentran sobre suelos de arcilla arenosa y saturada con el nivel freático a profundidades de 1.50 a 1.70 m; mientras que, los puntos con valores 6⁺ están sobre suelos de arcilla y grava, con nivel freático a 3 m. El total de valores de intensidad M.S.K. para cada punto de evaluación, es como sigue: grado 8⁻ M.S.K. dos puntos de observación, grado 7⁺ catorce puntos, grado 7 M.S.K. en cuatro puntos; grado 7⁻ M.S.K. en un punto y el grado 6⁺ M.S.K. en nueve puntos. En función de la severidad del sacudimiento del suelo la ciudad de Pisco, se divide en dos zonas, una con intensidad promedio de 7⁺ y la otra con intensidad promedio de 6⁺ grados (Figura 1).

Características de las Viviendas

Las características de las viviendas de uno y dos pisos evaluados en la ciudad de Pisco, clasificadas según la escala M.S.K.- 64, se describen a continuación:

- **Viviendas de tipo "A"**. Construcciones de adobe, con mortero de barro, 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; son construcciones de muy débil sismo resistencia. Estas viviendas se encuentran en la zona céntrica de la ciudad de Pisco.

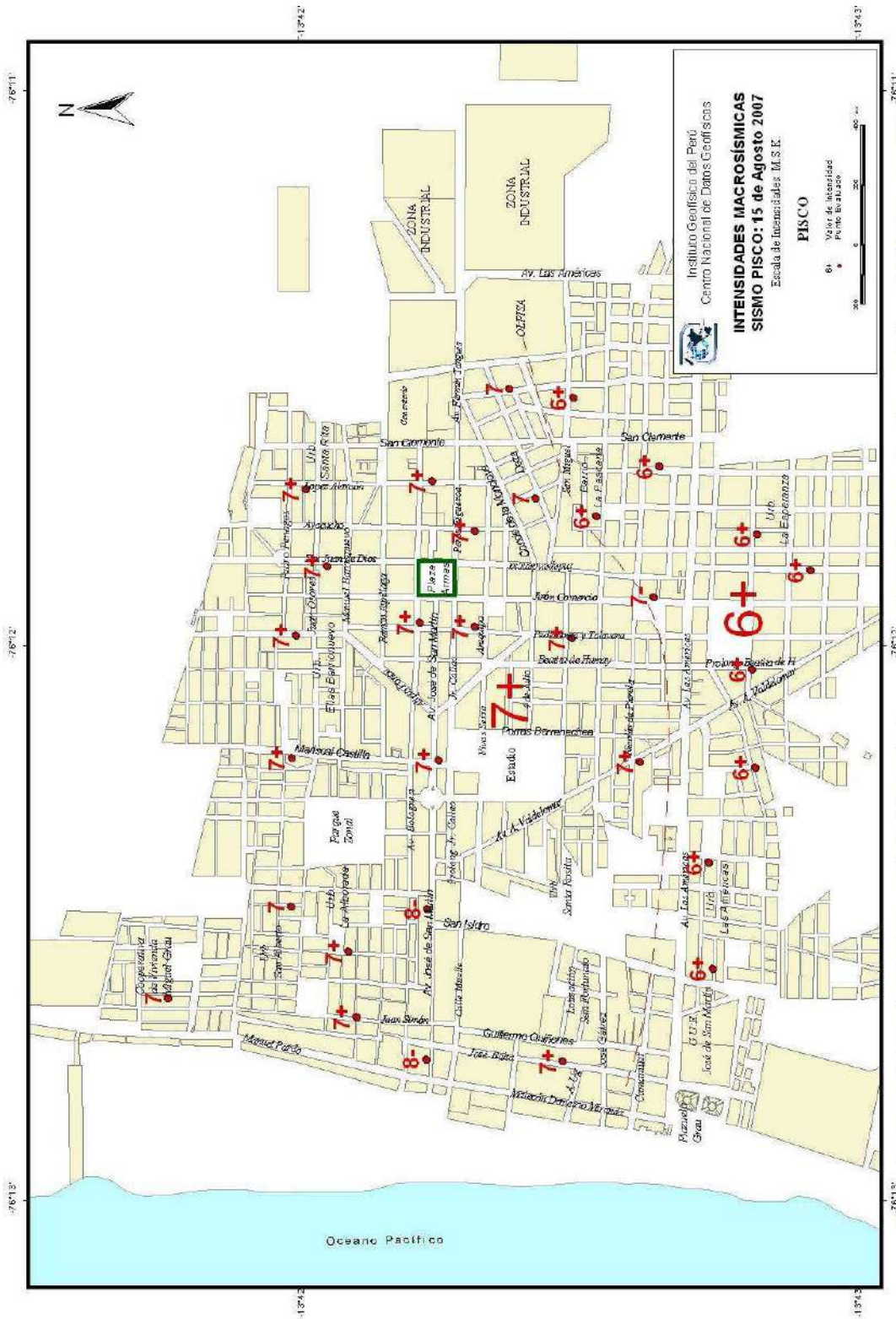


Figura 1.- Mapa de distribución de intensidades macrosísmicas en la ciudad de Pisco debidas al sismo de Pisco del 15 de Agosto de 2007.

- **Viviendas de tipo "B"**. Viviendas 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 sin refuerzo de concreto armado en los muros; los techos no tienen refuerzo; estas se ubican aisladamente por toda la ciudad de Pisco.
- **Viviendas de tipo "C"**. Construcciones 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 toda la zona periférica de la ciudad de Pisco, por ejemplo en las Urbanizaciones San Alberto, Alborada, Elías Barrionuevo, Santa Rita, La Esperanza, Las Américas.

Evaluación de la Calidad de Viviendas

Los daños ocasionados por el terremoto de Pisco en las viviendas de uno y dos pisos, fueron evaluados a partir de datos de campo recopilados en el formato "Efectos en Construcciones" (Anexo 1) y para tal efecto es 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 no han tenido supervisión técnica, ó el material es pobre o de mala calidad. La evaluación de daños se ha realizado sobre la base de criterios de la escala sísmica de intensidades M.S.K. y de la tabla de cuantificación de niveles de daño propuesta por Ocola (1979), se procede a interpretar los datos y determinar el nivel de daño.

El número de viviendas evaluadas fue 30 y en términos de porcentaje para los tres tipos de vivienda se representa en la Figura 2. En el caso de las viviendas de tipo "C", se observa que el mayor porcentaje 93.3% corresponde a viviendas de buena calidad; mientras que el 6.7% a viviendas de regular calidad. En la misma figura se puede notar que el mayor porcentaje 75% de viviendas evaluadas del tipo "B" corresponden a las de buena calidad y el 25% son de regular calidad, no se han evaluado viviendas de mala calidad. Del mismo modo para el caso de las viviendas de tipo "A" se observa que el mayor porcentaje 54.5% de viviendas evaluadas son de mala calidad, el 36.4% de regular calidad y el 9.1% de buena calidad.

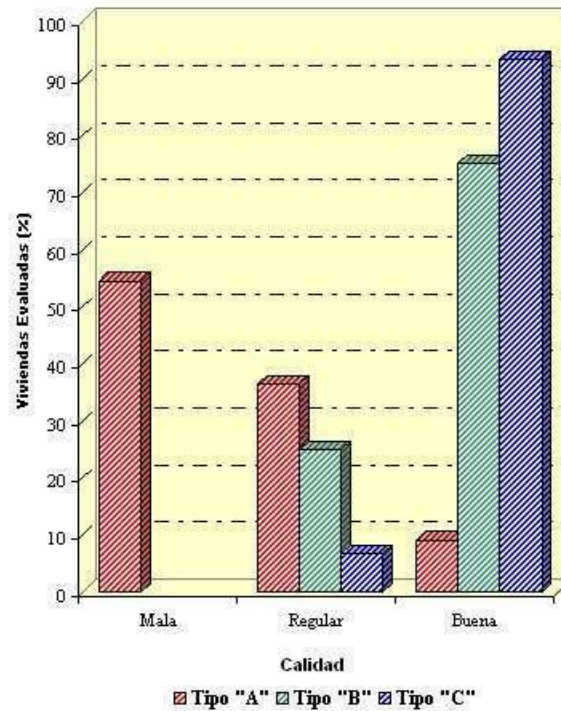


Figura 2.- Representación del porcentaje total de viviendas evaluadas en la Ciudad de Pisco, considerando el tipo y la calidad de construcción.

Frecuencia de Daños

El nivel de daño se obtiene del análisis y evaluación de la información contenida en el formulario “Efectos en las Construcciones” (Anexo 1).

En la Figura 3 se muestra, en términos de porcentaje, las viviendas de uno y dos pisos 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 63.6% sufrieron destrucción parcial (nivel de daño 4) y el 36.4% colapso total (nivel 5). En el caso de las viviendas de *Tipo “B”*, el 25% no han sufrido daño, el 50% tienen daños leves (nivel 1) y el 25% daños severos (nivel 3). En el caso de las viviendas de *Tipo “C”*, el 86.7% no han sufrido daño; mientras que, el 13.3% presentaron daños leves (nivel 1).

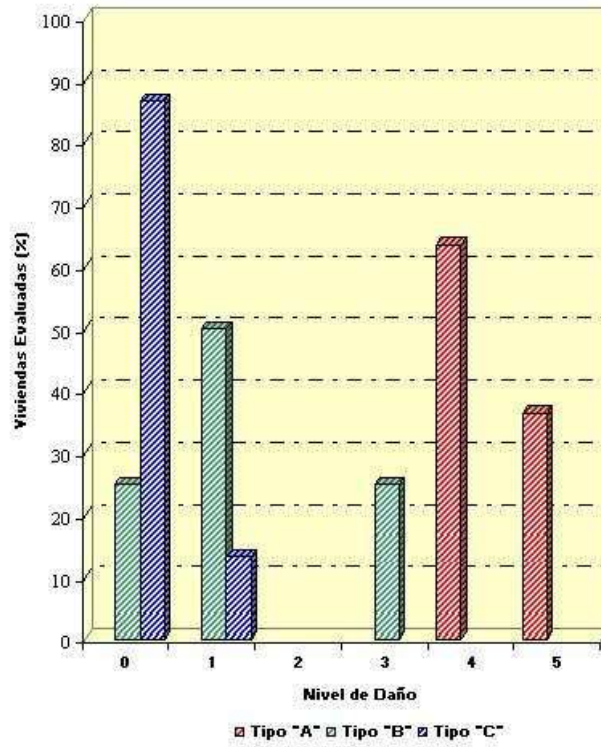


Figura 3.- Histograma de la Frecuencia de Daños en función del porcentaje de cada tipo de vivienda evaluada en la Ciudad de Pisco.

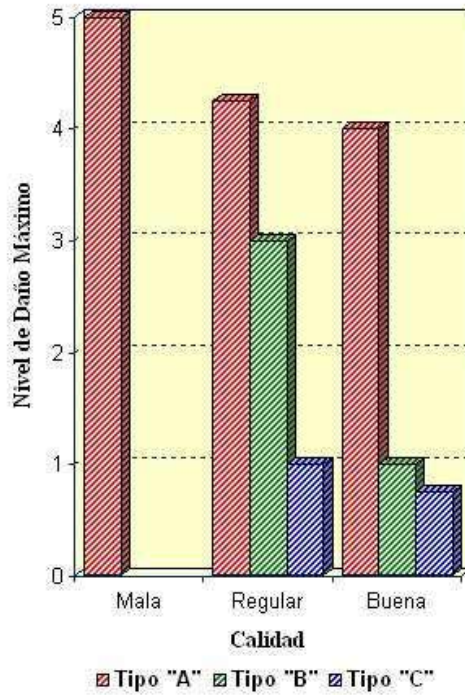


Figura 4. Representación del nivel de daño máximo en función de la calidad de vivienda de uno o dos pisos evaluada en la Ciudad de Pisco.

En la Figura 4 se presenta el nivel de daño máximo en función del tipo y calidad de vivienda evaluada. En las viviendas de *Tipo "A"*, el nivel de daño máximo es 5 (colapso) en las de mala calidad; 4⁺ (destrucción parcial) en las de regular calidad. En las viviendas de *Tipo "B"*, el nivel de daño máximo alcanza a clase 3 en las de regular calidad; mientras que, las de buena calidad no sufrieron daño. En las viviendas evaluadas de *Tipo "C"*, el nivel de daño máximo es 1⁻ en las de buena calidad y nivel de daño 1 en las de regular calidad.

Influencia de la Antigüedad de las Viviendas

Un factor que también es muy importante tomar en cuenta es la antigüedad de las viviendas durante la evaluación e interpretación de daños. Con el transcurso de los años, las viviendas están expuestas a las inclemencias de los fenómenos meteorológicos, como la lluvia, el viento, el intemperismo, la humedad, etc., las mismas que influyen en el deterioro de los materiales de las construcciones.

El rango de antigüedad, entre las viviendas evaluadas de uno y dos pisos de tipo A y B es amplio, habiéndose evaluado viviendas de *Tipo "A"* hasta con 100 años y de *Tipo "B"* hasta con 41 años de antigüedad. Este rango no se observa en las viviendas *Tipo "C"* ya que estas no sobrepasan los 25 años de antigüedad. A la antigüedad de las construcciones se le otorga hasta cuatro denominaciones, las mismas se describen en la Tabla 1. Según esta clasificación, en la ciudad de Pisco se ha evaluado viviendas recientes y medianamente antiguas; es decir, hasta 25 años y entre 25 a 50 años respectivamente. Las viviendas antiguas presentan edades entre 50 a 100 años y corresponden a las de *Tipo "A"*.

Tabla 1.- Denominación de las viviendas de la ciudad de Pisco, según la antigüedad y número de sismos que han soportado, con intensidad igual ó superior a VI grados MM.

Denominación	Años	Número de Sismos Soportados
Reciente	0 – 25	2
Medianamente Antigua	25 – 50	7
Antigua	50 – 100	11

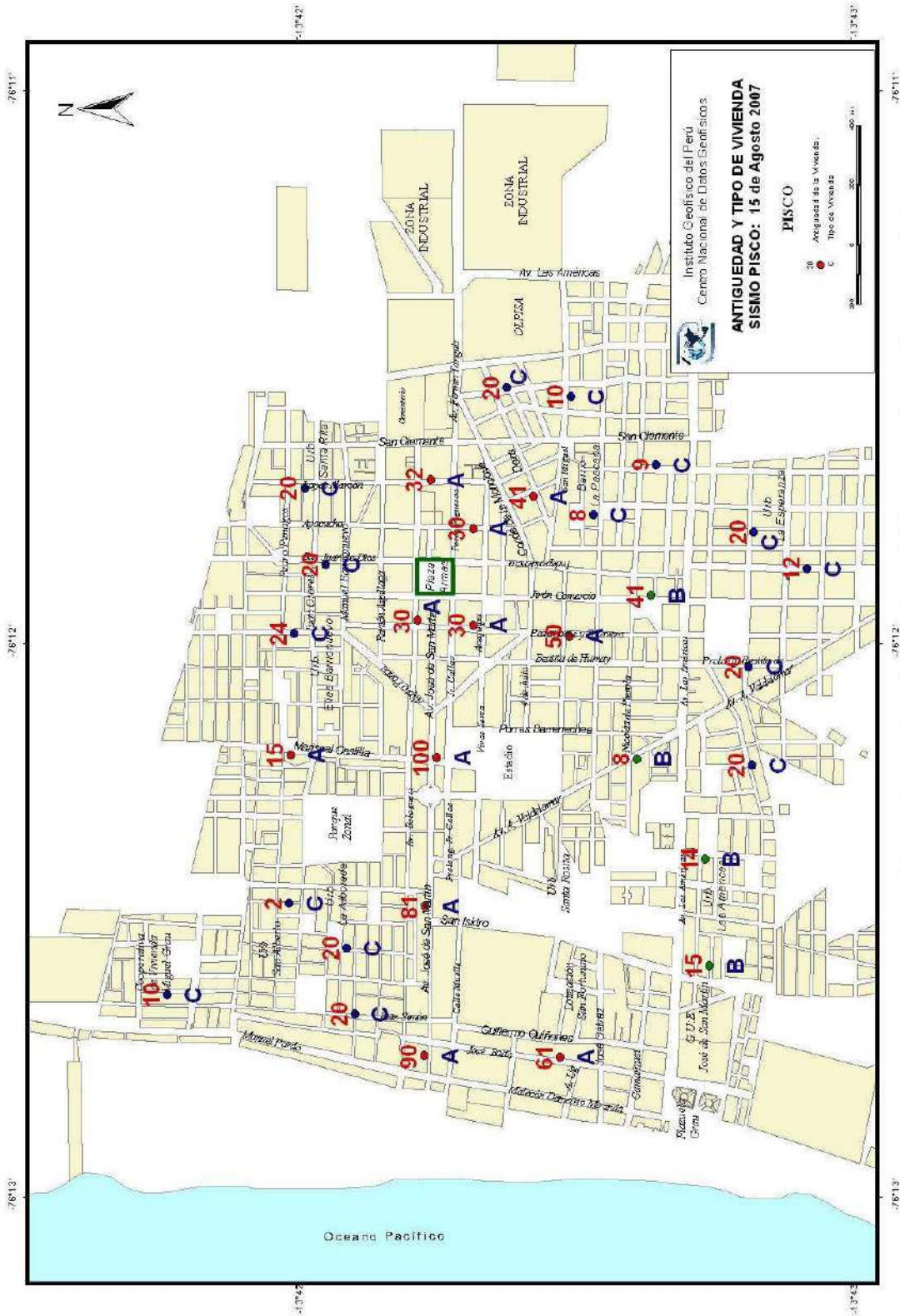


Figura 5.- Distribución del tipo de vivienda evaluada en la ciudad de Pisco en función de su antigüedad

La distribución del tipo de vivienda evaluada en la ciudad de Pisco en función de su antigüedad, se presenta en la Figura 5 y en ella se observa que las viviendas de *Tipo "A"* se encuentran en el centro de la ciudad. Las viviendas de *Tipo "B"* predominan al Sur de la ciudad. Las viviendas de *Tipo "C"*, se encuentran en las urbanizaciones nuevas ubicadas en los alrededores de la ciudad.

Las edades de las viviendas evaluadas, en términos de porcentaje, se representan en la Figura 6 y en ella se observa que el 9.2% de las viviendas *Tipo "A"* son recientes (menor a 25 años), el 45.4% son medianamente antiguas (25 a 50 años) y el 45.4% son antiguas (50 a 100 años). No se han evaluado viviendas muy antiguas. En relación con las viviendas de *Tipo "B"*, el 75% son recientes, el 25% son medianamente antiguas. En las viviendas de *Tipo "C"*, el 100% son recientes.

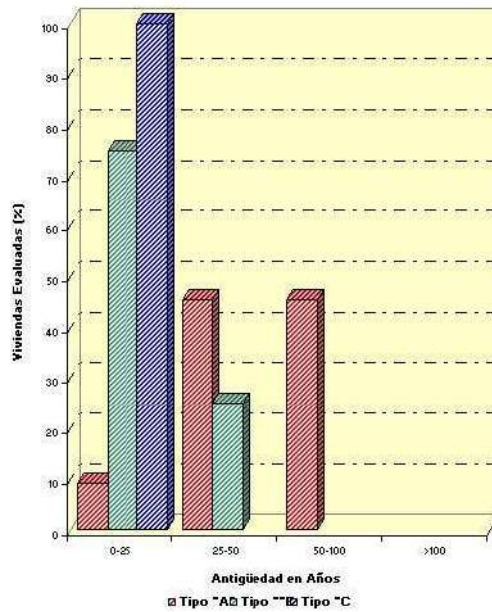


Figura 6.- Histograma del porcentaje de viviendas evaluadas en función de la antigüedad y tipo de vivienda en la Ciudad de Pisco.

La antigüedad de las viviendas, sumado a la frecuencia de sismos con intensidad elevada, ocasiona superposición de daños en las mismas. Según la historia sísmica, la ciudad de Pisco ha sido afectada por varios terremotos que han generado intensidades del orden de VI - VII grados MM. Entre los sismos importantes ocurridos en los últimos 100 años, se pueden indicar los ocurridos el 24 de Mayo de 1940 (8.4 Ms), sismo que alcanzó intensidades de VII-VIII MM afectando seriamente las localidades de Chíncha y Pisco; el 24 de Agosto de 1942 (8.6 M) que causó gran

destrucción en las viviendas de Ica, Chincha y Pisco; el 30 de Setiembre de 1946 (7.0 M) sismo destructor en la ciudad de Pisco con intensidad de VI- VII grados en la escala MM, el 70 % de las construcciones de tipo "A" , sufrieron agrietamiento en los muros y un 20 % daños moderados; el 10 de Diciembre de 1950 (6.0 M) se produjo un sismo en la ciudad de Ica con grado VII MM de intensidad máxima; el 01 de Marzo de 1958 (7.0 Ms) sismo en Pisco con intensidad VI MM que causo pánico y agrietamiento de un centenar de edificaciones; el 15 de Enero de 1960 (6.0 mb) sismo sentido fuertemente en Lima que provoco el derrumbe de casas en Nazca, Ica, Pisco y Huancavelica; el 28 de Enero de 1961 (5.5 M) con intensidad VI MM, sismo ligeramente destructor en Pisco, Chincha, San Luis de Cañete e Ica el 28 de Setiembre de 1968 (6.0 Ms) con intensidad de VI MM que afectó a las construcciones antiguas de Pisco, Chincha e Ica; el 03 de Octubre de 1974 (7.5 Ms) fuerte sismo que tuvo efectos destructores en Ica, Chincha, Pisco; el 05 de Abril de 1991 (5.8 mb) a horas 15:50:35 (GMT) fuerte sismo con intensidad VI MM en Ica; el 12 de Noviembre de 1996 (7.7 Ms), con intensidad máxima grado VII MM con daños en Ica y Pisco.

Distribución de Daños

Los valores de los niveles de daño y la calidad de construcción de las viviendas evaluadas en la ciudad de Pisco, son presentados en el mapa de la Figura 7. Las viviendas de *Tipo "A"*, presentan niveles de daño 4 (destrucción parcial) hasta grado 5 (colapso) en la zona central de la ciudad.

En las viviendas de *Tipo "B"*, el nivel de daño 3 se presentó en la Avenida Valdelomar; mientras que, en el Jr. Comercio, viviendas de igual tipo no sufrieron daños. Las viviendas de *Tipo "C"* se caracterizan porque no han sufrido daño alguno, y el nivel de daño 1 se presentó al oeste de la ciudad cerca a la playa.

CONCLUSIONES - PISCO

En la ciudad de Pisco, el valor máximo de intensidad ocasionado por el terremoto fue de 8⁺ M.S.K, hacia el Oeste de la Av. San Martín; mientras que, el valor mínimo de 6⁺ M.S.K.

El nivel de daño máximo en viviendas de *Tipo "A"* fue de 5, equivalente al colapso de la vivienda y esto se presentó a lo largo de la Avenida José de San Martín.

En viviendas de *Tipo "B"* de manera puntual, los daños máximos observados son de nivel 3, en la parte este de la ciudad (Av. Valdelomar); mientras que, en las de *Tipo "C"* el nivel de daño máximo fue de nivel 1; es decir, fisuras en los revestimientos. Esto se presentó al oeste de la ciudad.

Las viviendas de *Tipo "A"* y *"B"*, han sufrido mayores daños que las de *Tipo "C"*. En el caso de las viviendas de *Tipo "A"*, los mayores efectos son debidos a la antigüedad de las viviendas y porque han soportado otros sismos que dañan sus estructuras siendo reparadas utilizando materiales diversos muchas veces de mala calidad y sin técnicas de construcción. En el caso de las viviendas de *Tipo "B"*, el factor predominante es la falta de técnica de construcción que sumada su antigüedad, han ocasionado el deterioro progresivo de las viviendas, antes del terremoto.

FOTOS



Viviendas de adobe y quincha ubicadas entre las Avenidas José de San Martín con Manuel Pardo, Pisco Playa; con daño nivel 5 (colapso) y nivel 4 (destrucción parcial)



Hotel severamente dañado, ubicado en la Calle Manuel Pardo, Pisco Playa, construcción de adobe y quincha estructuras con rigidez diferente.



Av. José de San Martín, Pisco Playa



Av. José de San Martín, Pisco Playa



Av. José de San Martín



Av. José de San Martín



Av. José de San Martín



Av. José de San Martín



Av. José de San Martín



Av. José de San Martín



Av. José de San Martín



Av. José de San Martín



Av. José de San Martín



Esquina Calle Puno con Avenida San Francisco



Intersección Av. San Francisco con Calle Alipio Ponce



Esquina Av. San Francisco con Calle Progreso (Frente a la Plaza de Armas)



Catedral de Pisco



Catedral San Clemente de Pisco



Catedral San Clemente de Pisco



Catedral San Clemente de Pisco



Esquina. Av. San Francisco con Calle San Juan de Dios



Av. San Francisco (Frente a la plaza de Armas)



Av. San Francisco (Frente a la Plaza de Armas)



Esquina Jr. Comercio con Jr. Callao



Esquina Jr. Comercio con Jr. Callao



Esquina Jr. Comercio con Jr. Callao



Esquina Jr. Comercio con Jr. Callao



Esq. Calle Puno con Av. San Martín



Iglesia de La Compañía



Calle Ayacucho (Detrás de la Catedral San Clemente de Ica)



Calle Pérez Figuerola



Vivienda Tipo "C" no sufrió daños, las de tipo "A" adobe colapsaron. Pisco



Viviendas de Tipo "C" no sufrieron daño. San Andrés - Pisco

DISTRIBUCION DE INTENSIDADES EN LA CIUDAD DE ICA

La distribución de los valores de intensidad en la ciudad de Ica se muestra en la Figura 1 y ellos se encuentran formando, tres agrupamientos uno colindante con el río Ica y con valores de 7⁻ a 7 grados MSK, desde el Barrio San Martín (Urb. Pedreros), hasta la Urb. Los Rosales; otro por la parte central de la ciudad con valores de intensidad 6⁺ MSK, desde la Asoc. Vivienda Temistocles Rocha Rebata, (Cercado de la ciudad) hasta la Urb. Santo Domingo de Guzmán y el último presente al oeste de la ciudad de Ica, con valores de intensidad de 7 MSK, desde las Urbanizaciones La Angostura y Las Dunas hasta la C.P. Santa Rosa de San Joaquín. En términos generales, la ciudad de Ica soporto intensidades máximas de 7 grados MSK y como mínimo 6 grados M.S.K.

Características de las Viviendas

Las características de las viviendas de uno y dos pisos evaluadas en la ciudad de Ica, clasificadas según la escala M.S.K. Las características de cada tipo de vivienda ya fueron descritas anteriormente y solo se añadir que las **Viviendas de tipo "A"** se encuentran distribuidas en el centro de la ciudad de Ica; las **de tipo "B"** en los extremos de la ciudad y los **de tipo "C"** en toda la ciudad.

Evaluación de la Calidad de Viviendas

Los daños ocasionados por el terremoto de Pisco en las viviendas de uno y dos pisos, fueron evaluados a partir de datos de campo recopilados en el formato "Efectos en Construcciones" (ver Anexo 1, intensidades de Pisco) y para tal efecto es 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 no han tenido supervisión técnica, ó el material es pobre o de mala calidad. La evaluación de daños se ha realizado sobre la base de criterios de la escala sísmica de intensidades M.S.K. y de la tabla de cuantificación de niveles de daño propuesta por Ocola (1979), interpretar los datos y determinar el nivel de daño.

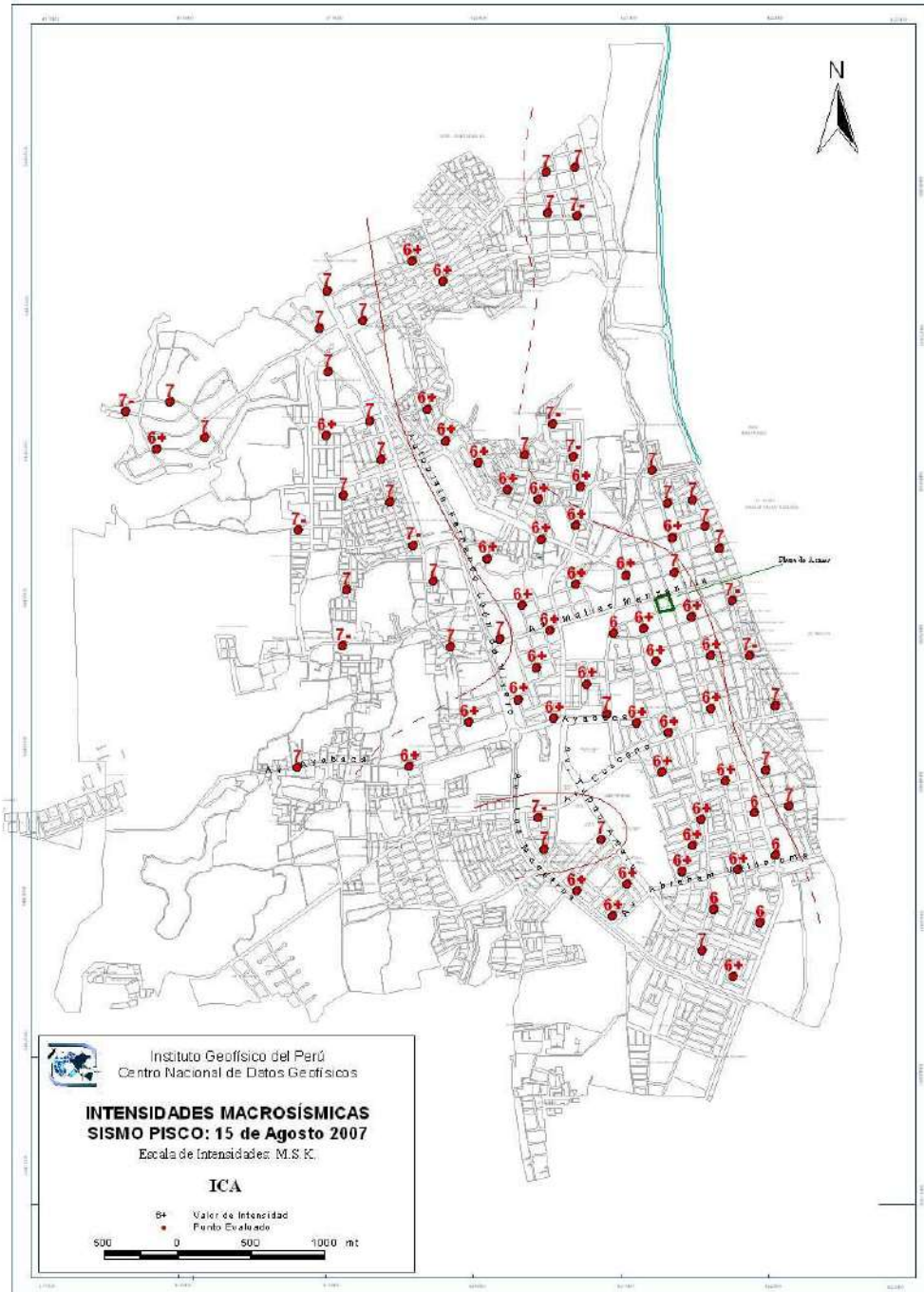


Figura 1.- Mapa de distribución de Intensidades Macrosísmicas en la ciudad de Ica debidas al sismo del 15 de Agosto de 2007

El número de viviendas evaluadas fue 91 y en términos de porcentaje la calidad de construcción y los tipos de viviendas evaluadas, se muestra en la Figura 2. Para las viviendas de Tipo “C”, se observa que el mayor porcentaje 85.5% corresponde a viviendas de buena calidad y el 14.5% de regular calidad. No se ha evaluado viviendas de mala calidad. En las viviendas de Tipo “B”, el 14.3% corresponde a viviendas de buena calidad, el 57.1% de regular calidad y el 28.6% a viviendas de mala calidad. Para el caso de las viviendas de Tipo “A”, las de regular calidad predominan con el 78.9%, seguidas por las de mala calidad con el 21.1% . No se han evaluado viviendas de buena calidad.

Frecuencia de Daños

El nivel de daño se obtiene del análisis y evaluación de la información contenida en el formulario “Efectos en las Construcciones” (ver Anexo 1, intensidades Pisco). En la Figura 3, se muestra en términos de porcentaje el número de viviendas evaluadas de uno y dos pisos en función de los niveles de daño observado para cada tipo de vivienda. En general, las viviendas de tipo “A” son las que se ha dañado más en comparación con las viviendas de tipo “B” y “C”.

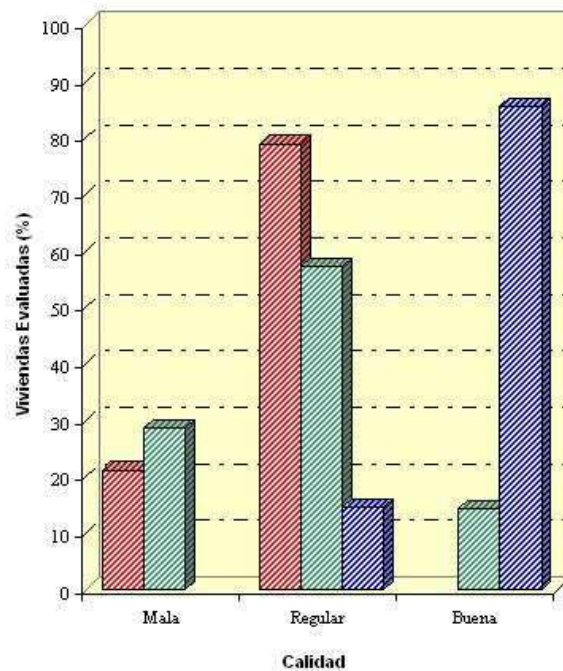


Figura 2.- Representación del porcentaje total de viviendas evaluadas en la Ciudad de Ica, considerando el Tipo y la Calidad de construcción.

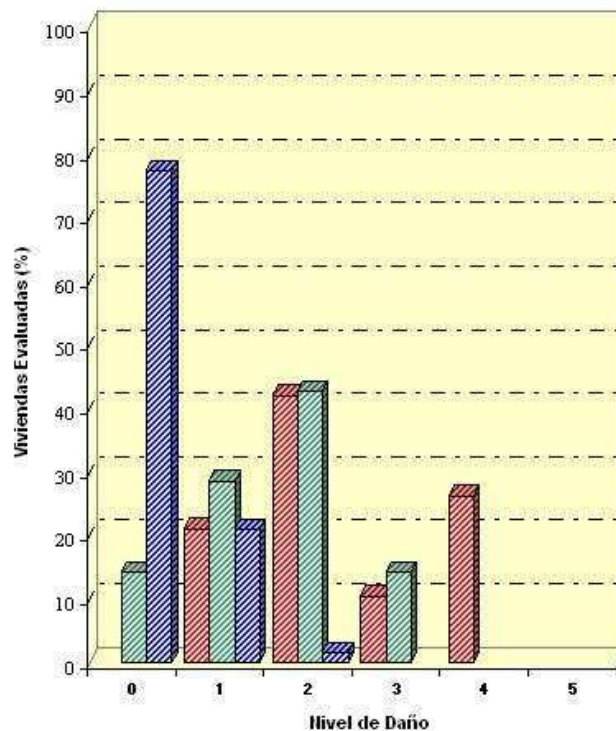


Figura 3.- Histograma de la Frecuencia de Daños en función del porcentaje y tipo de viviendas evaluadas en la Ciudad de Ica.

En el caso de las viviendas de *Tipo "A"*, el 26.3 % sufrieron destrucción parcial (nivel de daño 4), el 10.5% daños severos (nivel 3), el 42.1% daños moderados (nivel 2) y el 21.1% daños leves (nivel 1).

Las viviendas de *Tipo "B"*, el 14.3% sufrió daños severos (nivel 3), el 42.8% daños moderados (nivel 2), el 28.6% leves (nivel 1) y el 14.3% de las muestras tomadas no sufrieron daños.

Las viviendas de *Tipo "C"*, el 1.6% corresponde a daños moderados (nivel 2), el 21% han sufrido daños leves (nivel 1) y el 74.4% no han sufrido daños.

En la Figura 4 se presenta el nivel de daño máximo en función de la calidad y tipo de vivienda. En las viviendas evaluadas de *Tipo "A"*, el nivel de daño máximo es 4 (destrucción parcial) para las viviendas de mala y regular calidad.

En las viviendas de *Tipo "B"*, el nivel de daño máximo es 3 (daños severos) en las de mala calidad y en las de regular calidad el nivel de daño es 2 (daños

moderados) y en buena calidad el nivel de daño fue de 2- (daños son de leves a moderados).

En las viviendas de *Tipo "C"*, el nivel de daño máximo en las viviendas de buena calidad llego al nivel 2- (daños leves a moderado).

Influencia de la Antigüedad de las Viviendas

A la antigüedad de las construcciones se le otorga hasta cuatro denominaciones, estas se describen en la Tabla 1. El rango de antigüedad de las viviendas evaluadas en la ciudad de Ica, de uno y dos pisos, varía de 2 a 101 años, en su mayoría las mas antiguas corresponden a las de *Tipo A*.

Tabla 1.- Denominación de las viviendas de la Ciudad de Ica, según su antigüedad y número de sismos con intensidad igual ó superior a VI grados MM que han soportado en el tiempo.

Denominación	Años	Número de Sismos Soportados
Reciente	0 – 25	3
Medianamente Antigua	25 – 50	9
Antigua	50 – 100	14

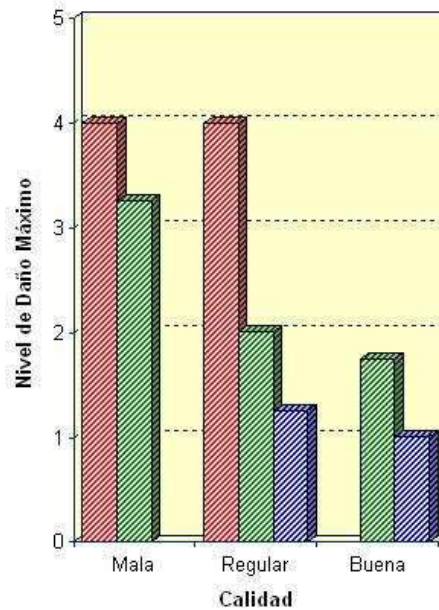


Figura 4.- Representación del nivel de daño máximo en función de la calidad de vivienda evaluada en la ciudad de Ica.

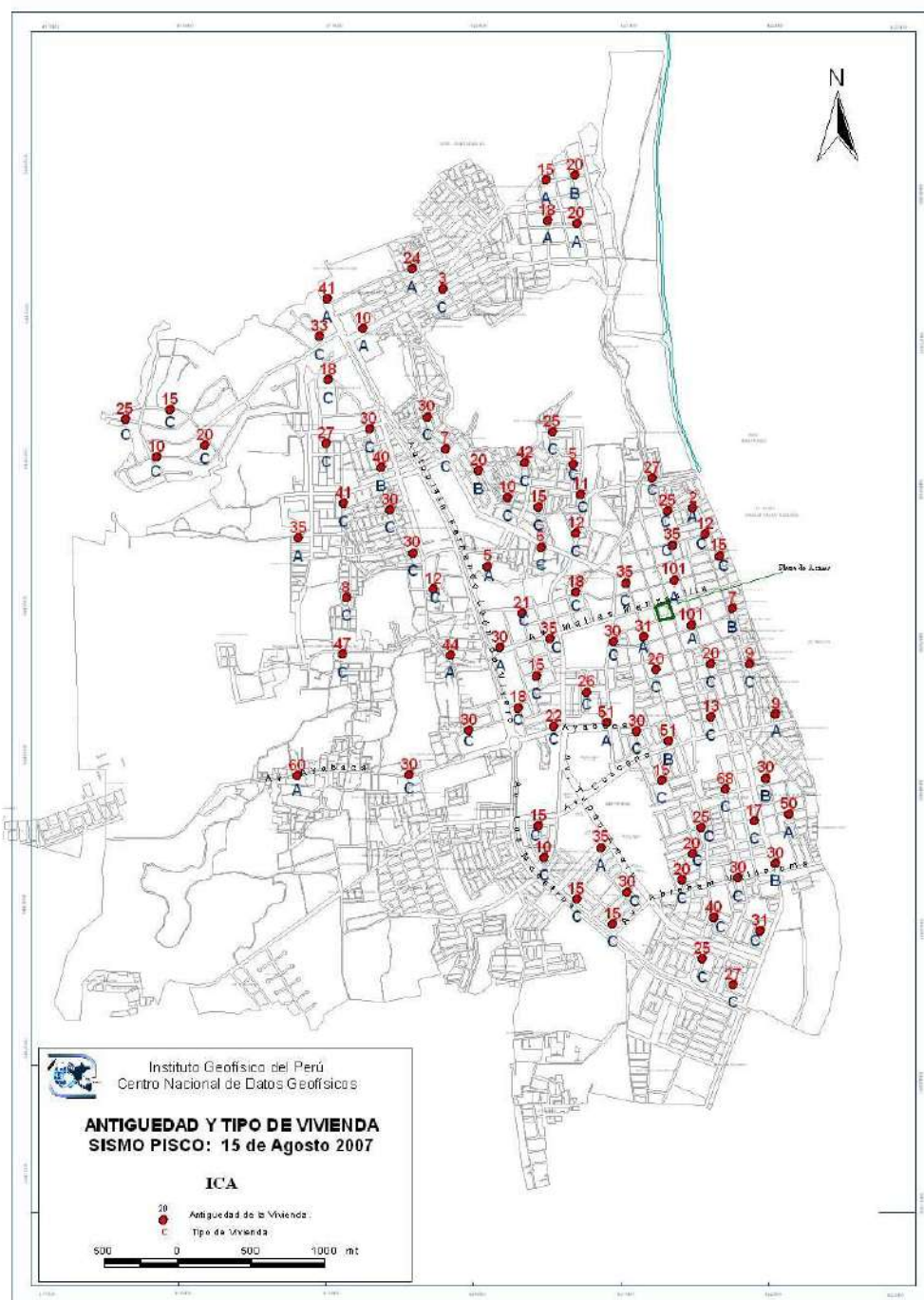


Figura 5.- Mapa de distribución del tipo de vivienda evaluada en la ciudad de Ica en función de su antigüedad.

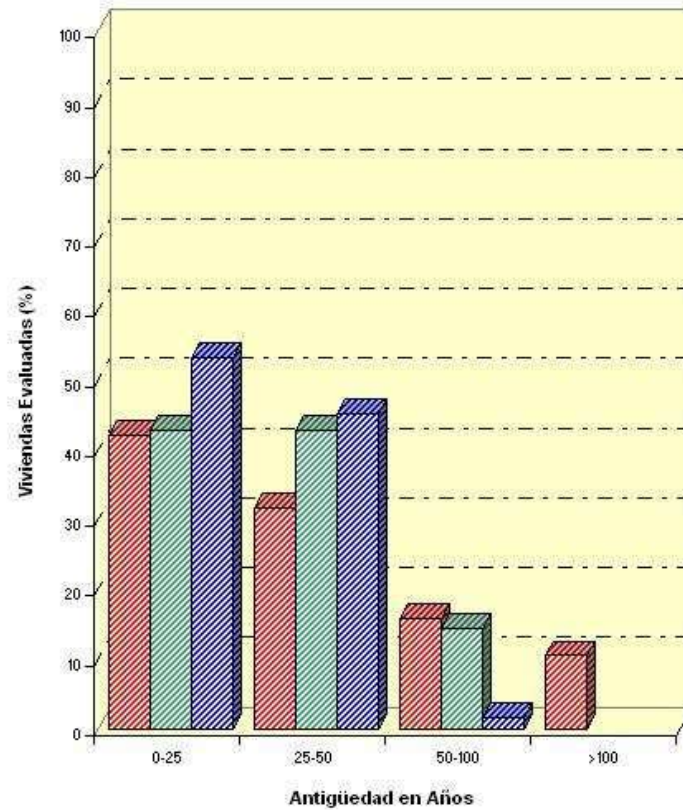


Figura 6.- Histograma del porcentaje de viviendas evaluadas en función de la antigüedad y tipo de vivienda en la Ciudad de Ica.

La distribución del tipo de vivienda evaluada en la ciudad de Ica en función de su antigüedad, se presenta en la Figura 5 y en ella se observa que las viviendas antiguas y medianamente antiguas se encuentran en la zona central de la ciudad, las recientes predominan en la zona periférica al cercado de la ciudad de Ica y en urbanizaciones nuevas. Se ha evaluado viviendas de *Tipo "A"* hasta con 102 años, de *Tipo "B"* hasta con 51 años de antigüedad para las viviendas de tipo *"C"* las edades varían de 3 a 60 años.

En términos de porcentaje, las edades de las viviendas evaluadas se representan en la Figura 6. Para el caso de las viviendas de tipo *"A"*, el 42.1% son recientes (menores a 25 años), el 31.6% medianamente antiguas (25 a 50 años), el 15.8 son antiguas (50 a 100 años) y el 10.5% son muy antiguas (mayores de 100 años). En relación con las viviendas de *Tipo B*, el 42.8% son recientes, el 42.8% medianamente antiguas y el 14.4% antiguas. En las viviendas de *Tipo "C"*, el 53.2% son recientes, el 45.6% son medianamente antiguas y el 1.6% antiguas.

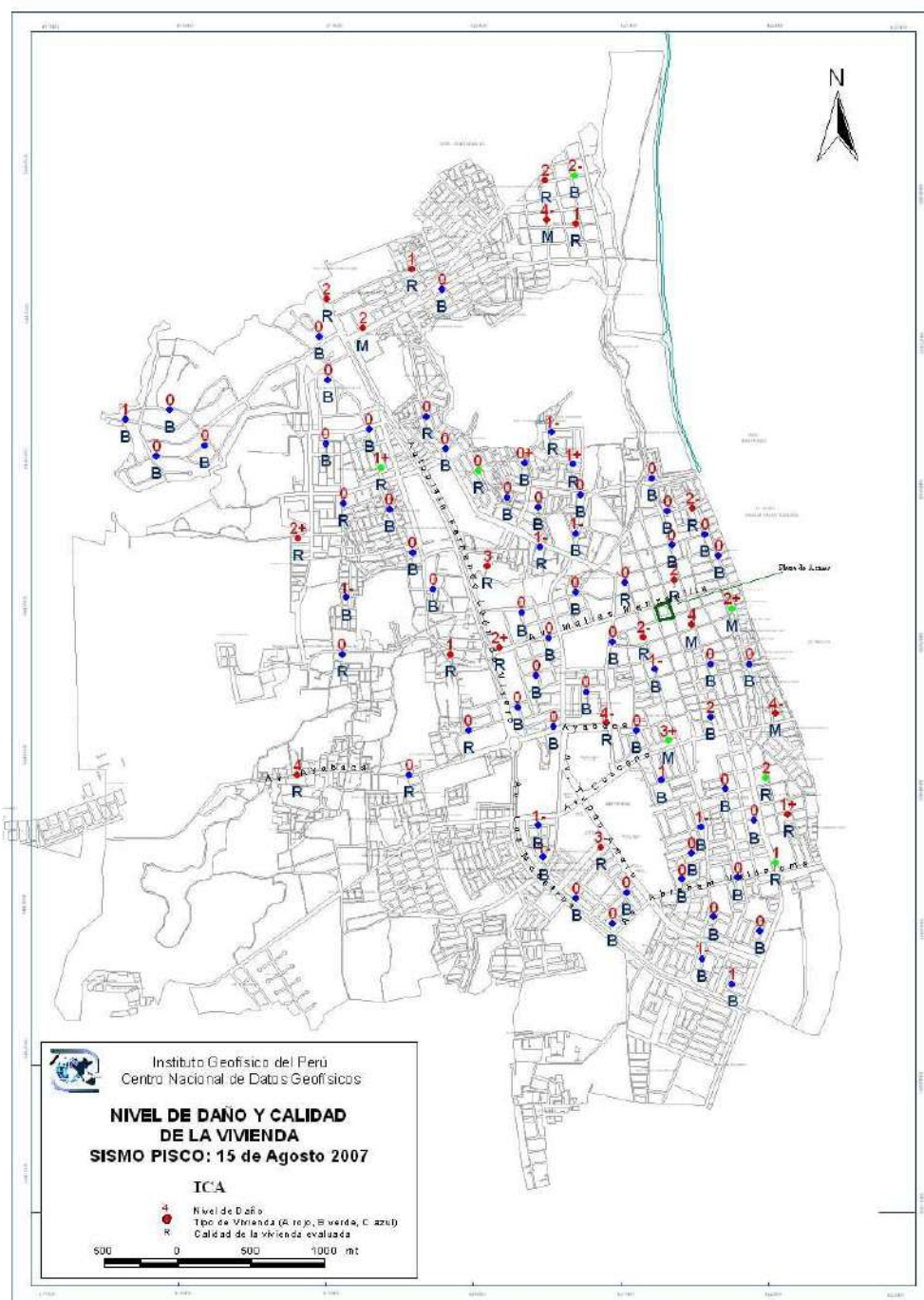


Figura 7.- Mapa de distribución del nivel de daño en función de la calidad de las vivienda evaluada en la ciudad de Ica.

Distribución de Daños

Los valores de los niveles de daño y la calidad de construcción de las viviendas evaluadas en la ciudad de Ica, se presentan en la Figura 7. Las viviendas de *Tipo "A"*, alcanzaron nivel de daño 4 (destrucción parcial) en el cercado de la ciudad, también; hacia la margen del río Ica, estas viviendas presentan construcción de mala calidad.

Las viviendas evaluadas de *Tipo "B"*, alcanzaron hasta niveles de daño 3+ (daños severos) por la Residencial San Martín debido a su mala calidad; mientras que, las viviendas evaluadas de buena calidad no presentaron ningún daño. Las viviendas de *Tipo "C"* se caracterizan porque la mayoría no han sufrido ningún tipo de daño. Las viviendas presentaron daños leves (nivel 1) se encuentran en los alrededores de la ciudad. Estas viviendas son de regular calidad de construcción.

CONCLUSIONES - ICA

En la ciudad de Ica el terremoto del 15 de Agosto produjo intensidades máximas de grado 7 M.S.K. y en general la intensidad promedio fue de 6+ M.S.K.

Los daños mayores fueron en viviendas de los Tipos "A" y "B". En el caso de las viviendas de *Tipo "A"* fue por su antigüedad y la deficiente calidad de construcción. En el caso de las viviendas de *Tipo "B"*, el factor predominante fue la falta de técnicas de construcción que sumadas a su antigüedad ocasionaron el deterioro progresivo de las viviendas, antes del terremoto. Los daños en las viviendas de *Tipo "C"*, son leves (nivel 1) y presentó en los alrededores de la ciudad de Ica, siendo estas de regular calidad.

FOTOS



Vivienda de adobe ubicada en la Calle Loreto, nivel de daño clase 4.



Vivienda de adobe ubicada en la calle Loreto, con daños severos



Vivienda de adobe colapsada, ubicada cerca de la Iglesia del Señor de Luren



Vivienda de adobe dos pisos, ubicada en la Calle La Mar.



viviendas en la calle Loreto, las de adobe son las que se dañaron más los efectos del sismo.



Vivienda de adobe ubicada en la calle Loreto, sin refuerzo en el encuentro de muros.



Vistas de la Iglesia del Señor de Luren – Vista Lateral



Vista de la Iglesia San José, esquina de la calles Tacna con Lima.



Vista de la Catedral de Ica, ubicada en la esquina de Jr. Bolívar con Libertad



Iglesia de Guadalupe, Ica

DISTRIBUCION DE INTENSIDADES EN LA CIUDAD DE CHINCHA

La ubicación de los puntos evaluados y la distribución de los valores de intensidades en la ciudad de Chíncha se presentan en la Figura 1. De manera puntual el valor máximo de intensidad fue de 7 grados M.S.K y corresponde al Barrio Chavalina, la Avenida Faustino Sánchez Carrión y en Pueblo Nuevo. Asimismo, se puede observar que de manera general predominan los valores de intensidad 6⁺ M.S.K., en los alrededores a la Plaza de Armas, en la Urb. Magisterial, Pueblo Nuevo y de manera general por toda la ciudad de Chíncha. Estos valores de intensidad son coherentes con el tipo de suelo de la ciudad de Chíncha, material areno limoso con gravas y con una napa freática que se encuentra aproximadamente a 10 m. de profundidad.

Características de las Viviendas

Las características de las viviendas de uno y dos pisos evaluados en la ciudad de Chíncha, clasificadas según la escala M.S.K.- 64. Las características de cada tipo de vivienda ya fueron descritas anteriormente y solo se añadir que las **Viviendas de tipo “A”** se encuentran distribuidas por toda la ciudad de Chíncha; las de tipo **“B”** solo fueron considerados los de la Av. Lima y los de tipo **“C”** no han sido evaluadas.

Evaluación de la Calidad de Viviendas

Los daños ocasionados por el terremoto de Pisco en las viviendas de uno y dos pisos, fueron evaluados a partir de datos de campo recopilados en el formato “Efectos en Construcciones” (ver Anexo 1, Intensidades de Pisco) y para tal efecto es 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 no han tenido supervisión técnica, ó el material es pobre o de mala calidad. La evaluación de daños se ha realizado sobre la base de criterios de la escala sísmica de intensidades M.S.K. y de la tabla de cuantificación de niveles de daño propuesta por Ocola (1979), interpretar los datos y determinar el nivel de daño.

Para el caso de las viviendas de *Tipo "A"*, en términos de porcentaje se representa en la Figura 2 el número de viviendas evaluadas y la calidad de la construcción. En esta Figura se puede apreciar que el 25% de viviendas son de mala calidad, el 64% son de regular calidad y el 11 % de buena calidad. No se ha considerado a las viviendas de *Tipo "B"*, debido a que solo se dispone de información para una vivienda.

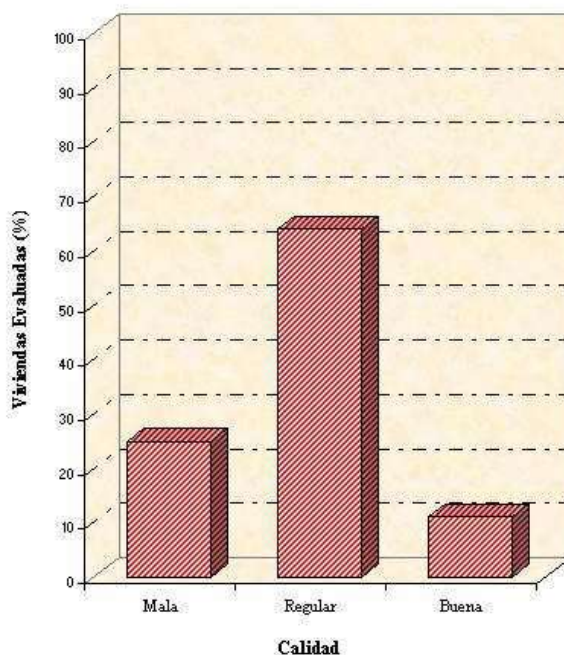


Figura 2.- Considerando el tipo y la calidad de construcción, porcentaje total de viviendas evaluadas en la ciudad de Chincha.

Frecuencia de Daños

El nivel de daño se obtiene del análisis y evaluación de la información contenida en el formulario "Efectos en las Construcciones" (ver Anexo 1 en Intensidades en Pisco).

En la Figura 3, los niveles de daño se muestran en términos de porcentaje para las viviendas evaluadas de *Tipo "A"* de uno y dos pisos. Se observa que 11.1% de este tipo de viviendas sufrieron colapso (nivel 5); mientras que el 3.7% sufrieron daños severos (nivel 3), el 33.4% de viviendas sufrieron daños moderados (nivel 2) y el 7.4% daños leves (nivel 1).

Según la calidad de las viviendas evaluadas en la ciudad de Chincha (Tipo "A") y los niveles de daño, el nivel máximo 5 (colapso) corresponde a las de mala calidad, nivel de daño 4+ (destrucción parcial) a las de regular calidad y el nivel 2 (daños moderados) a las viviendas de buena calidad.

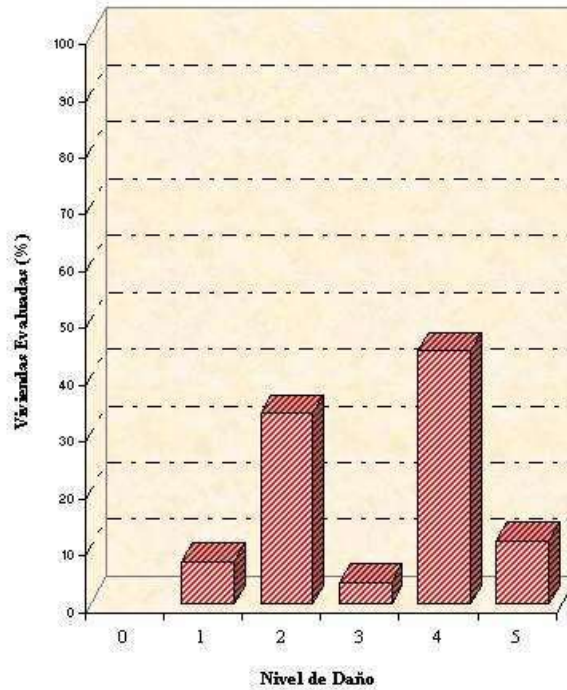


Figura 3.- Histograma de la frecuencia de daños en función del porcentaje de vivienda evaluada en la Ciudad de Chincha (Tipo "A").

Influencia de la Antigüedad de las Viviendas

El rango de antigüedad, entre las viviendas evaluadas de uno y dos pisos de tipo "A" es amplio, habiéndose evaluado viviendas de Tipo "A" hasta con 80 años. A la antigüedad de las construcciones se le otorga hasta cuatro denominaciones, las mismas se describen en la Tabla 1. Según esta clasificación, en la ciudad de Chincha se ha evaluado viviendas recientes, medianamente antiguas y antiguas con edades que van de 1 hasta 25 años, de 25 a 50 años y 50 a 80 años respectivamente.

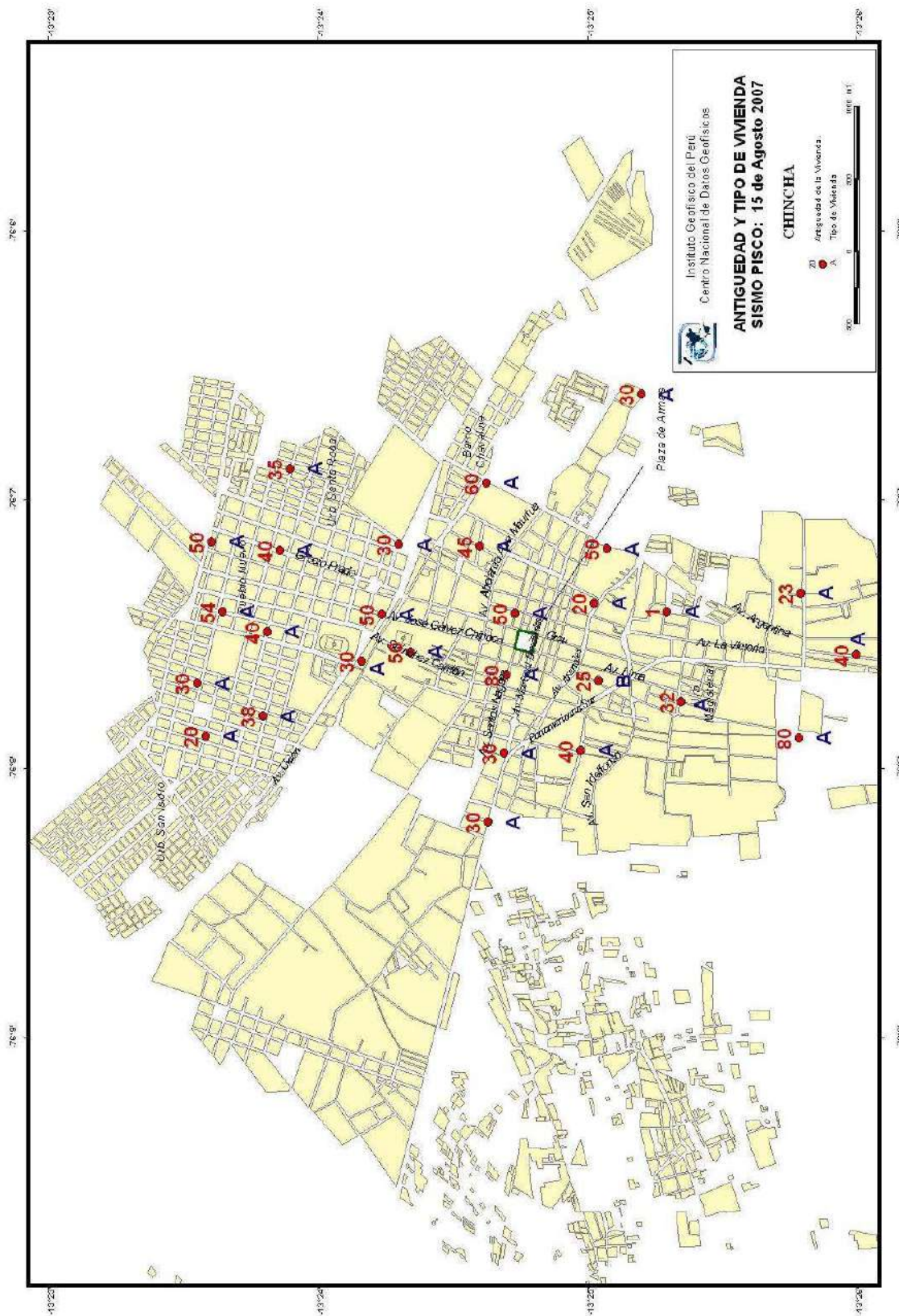


Figura 4.- Distribución del tipo de vivienda evaluada en la ciudad de Chincha en función de su antigüedad.

Tabla 1.- Denominación de las viviendas de la ciudad de Chincha, según la antigüedad número de sismos que han soportado, con intensidad igual ó superior a VI grados MM.

Denominación	Años	Número de Sismos Soportados
Reciente	0 – 25	1
Medianamente Antigua	25 – 50	4
Antigua	50 – 100	8

La distribución del tipo de vivienda evaluada en la ciudad de Chincha, según su antigüedad se presenta en la Figura 4 y en ella se observa que las viviendas de Tipo “A” se encuentran distribuidas en toda la ciudad y las más antiguas están en la parte central de la misma.

Las edades de las viviendas evaluadas de Tipo “A”, en términos de porcentaje, se representan en la Figura 5 muestra como resultado que el 18.5% son recientes (menor a 25 años), el 66.7% son medianamente antiguas (25 a 50 años) y el 14.8% antiguas (50 a 80 años). No se han evaluado viviendas muy antiguas; sin embargo, según los resultados que se muestran, continúan construyendo viviendas de Tipo “A”.

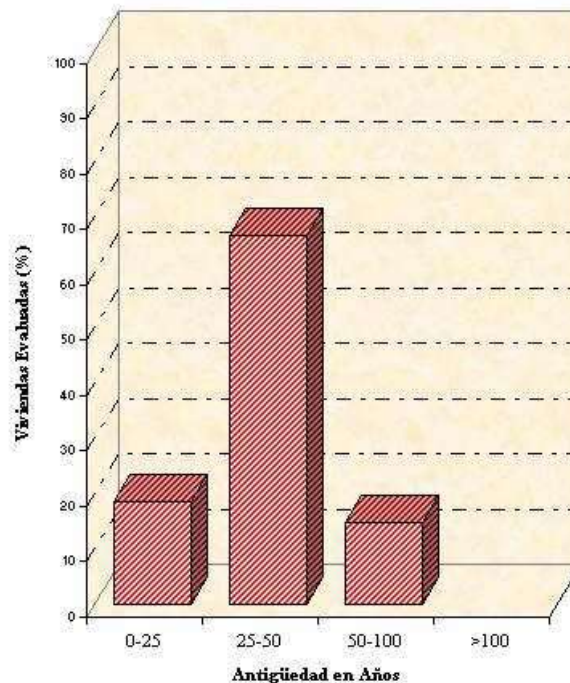


Figura 5.- Histograma del porcentaje de viviendas evaluadas (Tipo “A”) en función de la antigüedad en la Ciudad de Chincha.

La antigüedad de las viviendas, sumado a la frecuencia de sismos con intensidad elevada, ocasiona superposición de daños en las mismas. Según la historia sísmica, la ciudad de Chíncha ha sido afectada por terremotos importantes que han generado intensidades del orden de VI - VII grados MM, entre los sismos mas importantes ocurridos en los últimos 100 años, se pueden señalar a los siguientes: el 23 de Febrero de 1907 (7.7 M), sismo sentido con intensidad VI en Chíncha Alta; el 24 de Mayo de 1940 (8.4 M), sismo que alcanzó intensidades de VII-VIII MM, afectó 75

FOTOS



Vivienda de adobe colapsada en la Ciudad de Chíncha por el sismo de Pisco 15/08/07



Techos típicos de las viviendas tipo "A" en la ciudad de Chíncha



Vivienda de adobe con techos livianos de estera y cañas, dinteles de madera; colapsadas por diversos factores constructivos y antigüedad.



Vivienda de adobe ha fallado por los muros largos y sin restricciones transversales. Ubicada en Chíncha Alta



Muro colapsado, hospital de Chíncha.



Edificio fallado debido a problemas de diseño estructural (Av. Unión de la ciudad de Chíncha).

RECOMENDACIONES GENERALES

La historia sísmica de Pisco, Ica y Chíncha confirma que estas ciudades se encuentran en una de las zonas sismogénicas más importantes del Perú. Esta característica y las condiciones del suelo deben de tenerse en cuenta para la expansión urbana, lo que hace urgente contar con estudios de planificación, dando énfasis a los programas de microzonificación sísmica de la ciudad.

Los programas de prevención y asesoría técnica para el mantenimiento, reparación ó reconstrucción de viviendas deben ser permanentes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a los pobladores de Pisco, Ica y Chíncha, en especial a los entrevistados que a pesar de las circunstancias en que se encontraban permitieron el acceso a sus viviendas para ser evaluadas. Asimismo, a las autoridades de la ciudad de estas ciudades que nos facilitaron el trabajo de campo. A la Dirección Técnica del Instituto Geofísico del Perú por el apoyo brindado para la ejecución del presente estudio, tanto en el trabajo de campo como de gabinete.

BIBLIOGRAFIA

Silgado E. (1978): Historia de los Sismos mas Notables Ocurridos en el Perú, 1513 -1974.

Ocola L. (1996): Efectos Macrosísmicos del sismo de Nazca del 12 de Noviembre de 1996. Informe inédito.

Ocola L. (1996): Severidad de Sacudimiento del Sismo de Nazca. Informe inédito.

Fernández E., Agüero C., Ccallo F., Heras H., Carpio J. y Julia A. (2001): Intensidades Macrosísmicas en el Área Urbana de la Ciudad de Arequipa ocasionados por el Sismo del 23 de Junio de 2001. En Tavera H. (Ed): El terremoto de la Región Sur del Perú del 23 de Junio 2001, Instituto Geofísico del Perú, 207 - 220 pág.

ANEXO

Evaluación de Intensidades Macrosísmicas. Escala M.S.K. – 64 Versión Adaptada para el Perú (Ocola, 1979)

Metodología y Procedimiento

La intensidad es una medida subjetiva, no instrumental de los efectos causados por el terremoto y tiene como propósito cuantificar el nivel de sacudimiento del suelo por acción de un sismo en un lugar determinado de la superficie terrestre, así como evaluar su atenuación con la distancia. La intensidad de un sismo está íntimamente relacionada con los efectos producidos en superficie y en las estructuras, con el impacto y conducta de las personas durante y después del sismo, así como con el estado de los objetos dentro de las viviendas y con el comportamiento de los animales. Esta información es esencial para evaluar su efecto sobre las construcciones y el peligro que impone el sismo. Para tal efecto, la información a utilizarse se obtiene en una serie de tres formularios especiales diseñados para este tipo de estudio y cuyos datos se interpretan en términos de valores de grados con la escala sísmica de intensidad M.S.K., versión adaptada para uso en el Perú por Ocola (1979).

Escala de Intensidades MSK-64

La escala sísmica de intensidades M.S.K. fue propuesta en 1964 por S. V. Medvedev, W. Sponheuer y V. Karnik para su uso en Europa; sin embargo, hoy en día se ha extendido en todo el mundo. En el Perú, la escala M.S.K. fue utilizada por primera vez 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 fue utilizada para evaluar los efectos del terremoto de Arequipa del 16 de Febrero de 1979 (6.2 mb). Ocola (1979) adapta la escala M.S.K. para su aplicación en el Perú.

Tipos de Construcción

De acuerdo a la nueva versión de la escala MSK-64, 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 M.S.K. - 64. Definir estos términos no es fácil numéricamente, razón por la cual en la escala M.S.K. estos son definidos en términos de porcentaje:

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

Efectos que definen el Grado de Intensidad

La escala de intensidad consiste es una serie de descripciones de los efectos que causa un sismo sobre las viviendas, elementos u objetos que se encuentran en un ambiente cotidiano. Estos elementos pueden considerarse como sensores y su respuesta a los efectos ocasionados por los terremotos, 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. El uso de esta información es de gran ventaja porque no se requiere de instrumentos especiales para medir el sacudimiento del suelo.

Los efectos que definen los grados de la escala M.S.K., son agrupados tomando en cuenta a los sensores naturales que históricamente se han venido utilizando, y estos son:

- Efectos sobre las personas y como fue percibido en su entorno.
- Efectos producidos en las construcciones según el tipo de vivienda.
- Efectos sobre el terreno y cambios advertidos en la naturaleza.

Clasificación de los daños en las Construcciones

Por lo general, los efectos en cualquier tipo de construcción se traducen en grados de daño; por lo que, la escala de intensidades M.S.K. considera y define cinco grados o niveles de daño, los mismos que se ilustran en la Tabla 1.

Asimismo, con el propósito de uniformizar criterios, basándose en el grado o nivel de daño en las construcciones, Ocola (1979,1988 y 2005) propuso una tabla de valores que permiten cuantificar los diferentes niveles de daño en función del porcentaje mínimo de fisuras ó grietas en la vivienda. Se considera como “fisura” a la resquebrajadura del revestimiento, estuco 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 1.20 m. En general y según las Tabla 2a y 2b, las construcciones con niveles de daño igual o mayor a 3⁺ no son reparables.

NIVEL DE DAÑO	ANCHO DE FISURAS O GRIETAS (mm)			% MÍNIMO
	(-)	(=)	(+)	
1	0.33 - 0.77	1	1.5 - 2.5	10
2	2.5 - 4.17	5	6.3 - 9	25
3	9	14	16.0	50
4	>20			75

Tabla 2a. Valores cuantificados para la clasificación del nivel de daño, en base al ancho de las fisuras ó grietas con un mínimo de porcentaje. La longitud mínima de grieta debe ser mayor ó igual a 1.20 m.

Tabla 1.- Clasificación de los grados ó niveles de daño en las viviendas.

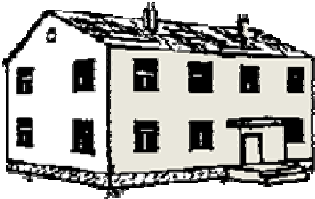
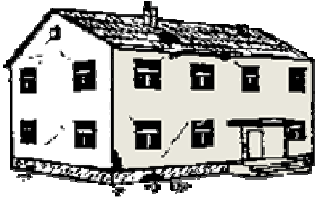
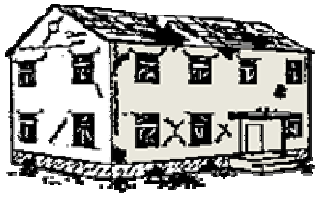


Clasificación de Daños en las Construcciones	
<p>Grado 1: Daños Leves. Fisuras en los revestimientos y en muy pocos muros. En pocos casos se producen caída de pequeños trozos de revoques y de tejas sueltas de las partes altas de las viviendas.</p>	
<p>Grado 2: Daños moderados. Grietas pequeñas en muchas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

Tabla 2b. Valores para los niveles de daño 4 y 5 en base al derrumbe de muros.

Nivel de Daño	Derrumbe de Muros		
	4	hasta 1/3 muro	½ muro
5	2	3	4

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 los 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).

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. Los líquidos se derraman en pequeñas cantidades de recipientes abiertos. 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, 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; y pueden 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 enturbia 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 hasta 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 y daño considerable en los muebles. Los animales corren despavoridos, "gritan", mugen, etc.
- b). Muchos edificios de *Tipo C* sufren daños de *nivel 3*, algunos de *nivel 4*; muchos edificios del *Tipo B* muestran daños de *nivel 4*, 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, 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 10 cm. y aún mayores en riberas y pendientes, desprendimientos en despeñaderos, numerosos deslizamientos y caída de material rocoso e inconsolidado de las pendientes rocosas. Se observan grandes olas sobre el agua.

Grado 10. Destrucción Total de Edificios

- a). Muchos edificios de *Tipo C* sufren daños de *nivel 4*, 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 desplazamientos verticales y horizontales grandes. Desprendimiento de rocas y deslizamientos en riberas sobre grandes extensiones. Aparecen nuevos lagos y cascadas, los ríos cambian de curso.

Formatos para adquisición de Datos

En general, para la adquisición de datos de campo se requiere contar con el plano catastral de la ciudad o localidad en estudio, 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 cuadra de 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 también considerar los datos personales 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 regla, wincha y brújula para determinar las dimensiones y orientación de las viviendas, además de la dirección de caída de objetos y muros.

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 realizan 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 cuadra o celda y que preferentemente sean viviendas de uno o dos pisos.

Interpretación de los Datos

Los datos recolectados en el campo son vaciados en tablas conteniendo toda la información tal como se muestra en la Tabla 3.0. La interpretación de los datos obtenidos se realiza en función de la descripción de los grados de la escala sísmica de intensidad M.S.K.-64 (Ocola, 1979) y en base a las tablas descritas anteriormente. Para ello, se agrupa los indicadores del grado de sacudimiento del suelo en función de los efectos que definen los grados de intensidad descritos en el punto 2.3. De la interpretación y evaluación de cada indicador: efectos sobre las personas y como fue percibido en su entorno, efectos producidos en las construcciones según el tipo de vivienda y efectos sobre el terreno y cambios advertidos en la naturaleza se obtiene un valor de intensidad y el promedio de estos valores, representa la intensidad o nivel de sacudimiento obtenido en ese punto de observación.

INTENSIDADES Y DAÑOS DEL TERREMOTO DE PISCO DEL 15 DE AGOSTO DEL 2007

Maximiliano Astroza
Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Chile
Misión CERESIS/UNESCO

INTRODUCCION

La inspección de daños se realizó desde la tarde del día jueves 23 de agosto hasta el día domingo 26 de agosto. Las 28 localidades visitadas se indican en la Tabla 1, destacando el Departamento y la Provincia al que pertenecen y sus coordenadas geográficas junto con la altura con respecto del nivel del mar.

Tabla 1.- Localidades visitadas y ubicación geográfica.

	Pueblo	Departamento	Provincia	Ubicación Geográfica		
				Latitud [°]	Longitud [°]	m.s.n.m.
1	Lurín	Lima	Lima	-12,283	-76,867	4
2	Pucusama	Lima	Cañete	-12,483	-76,800	44
3	Chilca	Lima	Cañete	-12,533	-76,733	88
4	Mala	Lima	Cañete	-12,650	-76,633	130
5	Asia	Lima	Cañete	-12,783	-76,567	47
6	Coayllo	Lima	Cañete	-12,733	-76,467	363
7	Lunahuana	Lima	Cañete	-12,967	-76,133	975
8	Cerro Azul	Lima	Cañete	-13,033	-76,483	2
9	Pauyo	Lima	Cañete	-13,033	-76,183	655
10	San Vicente de Cañete	Lima	Cañete	-13,083	-76,400	33
11	Chincha Alta	Ica	Chincha	-13,450	-76,133	72
12	Tambo de Mora	Ica	Chincha	-13,467	-76,200	1
13	Chincha Baja	Ica	Chincha	-13,467	-76,167	28
14	San Clemente	Ica	Pisco	-13,667	-76,150	72
15	Pisco	Ica	Pisco	-13,700	-76,217	9
16	San Andrés	Ica	Pisco	-13,733	-76,233	1
17	Paracas	Ica	Pisco	-13,867	-76,267	23
18	Pozo Santo	Ica	Pisco	-13,900	-76,083	156
19	Guadalupe	Ica	Ica	-13,967	-75,767	453
20	Parcona	Ica	Ica	-14,048	-75,698	467
21	Ica	Ica	Ica	-14,068	-75,726	447
22	Tate de la Capilla	Ica	Ica	-14,152	-75,707	459
23	Santiago	Ica	Ica	-14,189	-75,714	407
24	Pachacutec	Ica	Ica			
25	Ocucaje	Ica	Ica	-14,348	-75,669	326
26	Palpa	Ica	Palpa	-14,534	-75,186	422
27	Nazca	Ica	Nazca	-14,833	-74,950	588
28	San Juan	Ica	Nazca	-15,365	-75,162	24

En la Figura 1 se muestra con diferentes colores los recorridos realizados durante cada día, destacando en azul el recorrido realizado el día jueves, en verde el día viernes y en rosa los días sábado y domingo.

Las localidades visitadas se ubican principalmente cercanas a la costa, zona de daño del terremoto. Las localidades visitadas más al interior son Coayllo y Lunahuana. No se visitaron en esta inspección pueblos ubicados en la sierra debido al tiempo disponible para realizar la inspección y considerando que los daños debían ser menores por su mayor distancia a la zona epicentral del evento.

TIPOS DE EDIFICIOS

En la zona visitada se pudo comprobar la existencia de construcciones de adobe, quincha, albañilería y de hormigón armado.

De acuerdo con los antecedentes del Instituto Nacional de Estadística e Informática del Perú, el número de viviendas por tipo de material en el Departamento de Ica corresponde al indicado en la Tabla 2. Como se aprecia en esta tabla, los tipos de vivienda que más abundan en la zona afectada por el terremoto son las viviendas de adobe y albañilería de ladrillos o bloques.

Tabla 2.- Número de viviendas por material en el Departamento de Ica

Material	Número	%
Ladrillo o bloques	66 445	45.19
Piedra o sillar	168	0.11
Adobe o tapial	69 946	47.57
Quincha	4 382	2.98
Piedra con barro	171	0.12
Madera	536	0.36
Estera	5 021	3.41
Otras	364	0.25
Total	147 033	100

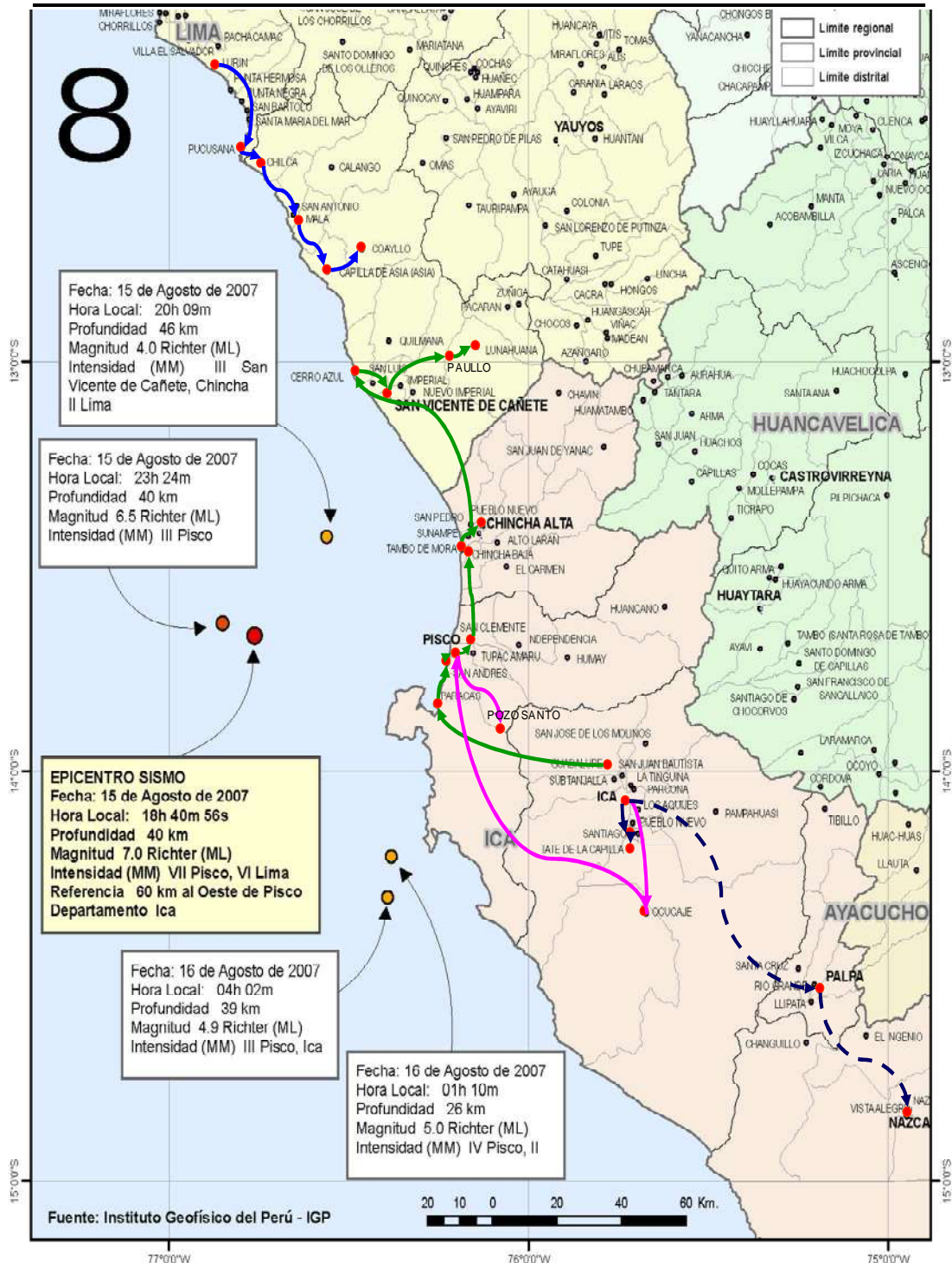


Figura 1.- Mapa con la ubicación de las localidades visitadas

Viviendas de Adobe

Características de las viviendas de adobe

Durante la inspección se pudo comprobar que este tipo de vivienda es mayoritariamente de un piso y se construye con unidades de barro secadas al sol, fabricadas con una tierra limosa con un contenido importante de arena sin incluir paja en su composición, estos adobes se unen con un mortero de barro fabricado con el mismo tipo de suelo al cual se agrega más arena. El resultado es una albañilería de baja adherencia entre las unidades y el mortero, como se comprueba al observar el estado de los adobes en los muros que han sufrido vaciamiento, ver Figura 2.



Figura 2.- Muestra de la baja adherencia en las construcciones de adobe.

Además de la baja adherencia de la albañilería de adobe, se pudo comprobar que las viviendas de adobe se construyen sin ningún tipo de refuerzo que permita conservar la integridad de la estructura una vez que se produce el agrietamiento de los muros o del encuentro entre muros, produciendo inevitablemente el colapso parcial o total de la vivienda. Este colapso parcial o total de los muros fue la causa del derrumbe de los sistemas de piso y de las techumbres, los que se encuentran apoyados directamente sobre los muros. El colapso de los muros y el derrumbe de las techumbres fueron las principales causas del número de las víctimas de este terremoto.

En las Figuras 3 y 4 se muestran viviendas de adobe de las zonas urbanas de las ciudades con mayor número de habitantes y de las zonas rurales o de las

localidades de menor número de habitantes de la zona visitada. En la Figura 5 se muestran algunos detalles que pueden considerarse como típicos de estas viviendas de adobe.



Figura 3.- Viviendas de adobe en sectores urbanos



Figura 4.- Viviendas de adobe en sectores rurales



Detalle encuentro de muros- Sin conexiones dentadas entre sí.



Detalle encuentro tabique interior-muro



Detalle apoyo techumbre



Detalle apoyo envigados

Figura 5.- *Detalles de las viviendas de adobe*

Daños de las viviendas de adobe

Los daños de las construcciones tanto de adobe como de otros materiales es necesario clasificarlos ya que de acuerdo con los niveles de daño alcanzados y con la distribución de ellos, es posible estimar el grado de la intensidad sísmica en un lugar determinado (Monge y Astroza, 1989).

Con este propósito los daños en la zona afectada se clasificaron de acuerdo con la Escala Sísmica de Intensidades MSK-64 (IGP, 1979), reconociendo 5 niveles o clases, cuya descripción se entrega en la Tabla 3.

En la Figura 6 se muestran algunos de los daños observados en las viviendas de adobe de las localidades visitadas.

Tabla 3.- Clasificación de los daños (IGP, 1979)

Clase	Nivel	Descripción
1	Daños Leves	Fisuras en los revestimientos, caídas de pequeños trozos de revoque.
2	Daños Moderados	Grietas pequeñas en los muros, caída de grandes trozos de revoque, caída de parapetos, grietas en las chimeneas e incluso derrumbamientos parciales en las mismas.
3	Daños Severos	Grietas grandes y profundas en los muros, caída de chimeneas.
4	Destrucción Parcial	Brechas en los muros, derrumbamiento parcial de la edificación; agrietamiento entre distintas partes o secciones de la edificación; desmoronamiento (Colapso) de paredes interiores y muros.
5	Colapso	Destrucción total de las edificaciones o de sus partes vitales.



Daño Clase 5 - Pisco



Daño Clase 4 - Coayllo



Daño Clase 2 - Ocucaje



Clase 1- Pachacutec

Figura 6.- Daños en viviendas de adobe

Viviendas de Quincha

Aun cuando el porcentaje de viviendas de quincha en la zona es reducido según los datos estadísticos de la Tabla 2, es conveniente destacar sus características y comportamiento por corresponder a un tipo de construcción muy abundante en la región en el pasado y por lo mismo es conveniente analizar su comportamiento en el contexto actual.

Estas edificaciones corresponden a edificaciones flexibles de madera y caña y de poco peso, y por lo mismo el efecto sísmico y los daños sobre ellas son mucho menores que las pesadas y débiles construcciones de adobe. Las construcciones de este tipo están conformadas por paredes que son una combinación de postes y vigas de madera, tejidos con caña, cubiertos con mortero de barro como acabado. Los techos tienen vigas de madera o cañas gruesas, cubiertas con cañas o planchas fabricadas con material más noble.

En la Figura 7 se muestran algunas viviendas de este tipo y en la Figura 8 de muestran algunos detalles característicos de este tipo de vivienda.



Figura 7.- Viviendas de Quincha en Ocucaje



Detalle pared de quincha



Detalle apoyo viga interior sobre pared



Detalle estructura postes y vigas



Detalle de techumbre

Figura 8.- Detalles de vivienda de Quincha



Vista del segundo piso



Pared de quincha



Vista techumbre



Detalle de quincha

Figura 9.- Construcción con segundo piso de quincha.

En el sector antiguo de la ciudad de Ica se encuentran edificios de dos pisos cuyo segundo piso está construido con quincha y el primer piso de adobe. Una de estas construcciones se muestra en la Figura 9 con algunos de los detalles de su segundo piso.

Durante la inspección realizada se pudo comprobar que las viviendas de quincha permanecieron en pie con muy poco daño, no así construcciones vecinas de adobe, por lo cual se puede aceptar que este tipo de construcción corresponde a una clase de vulnerabilidad diferente a las viviendas de adobe. En la medida que estas construcciones se encuentren en un buen estado de conservación y cuando se hayan utilizado en su construcción maderas resistente a la humedad y a la acción de insectos, pueden corresponder a una clase de vulnerabilidad del Tipo C (IGP, 1979, Monge y Astroza, 1989).

Viviendas de Albañilería

En la zona visitada se encuentra un número importante de viviendas de albañilería construidas principalmente con ladrillos cerámicos de fabricación artesanal.

Albañilería reforzada

La mayor parte de estas viviendas son de uno y dos pisos y cuentan con refuerzos de hormigón armado que enmarcan los paños de albañilería sin cumplir con las disposiciones y limitaciones que establecen las normas de diseño y cálculo de edificios de albañilería confinada, especialmente en lo relacionado con los refuerzos de aberturas. Esta situación se produce debido a que en la mayoría de los casos estas viviendas han sido construidas por sus propietarios sin una asesoría técnica.

En la Figura 10 se muestran algunos ejemplos de estas construcciones, comprobándose que muchas de ellas no han sido terminadas debido que sus propietarios las van construyendo por etapas a medida que reúnen los recursos económicos necesarios.



Vivienda Albañilería - Ocucaje



Vivienda Albañilería – Pachacutec



Vivienda Albañilería - Mala



*Construcción de Albañilería de 3 pisos-
Paraca*



Vivienda Albañilería - Ica



Vivienda Albañilería – Guadalupe

Figura 10.- Muestra de viviendas reforzadas de albañilería

El uso de estos elementos de refuerzo es una cualidad destacable ya que con ello se logra que la estructura conserve su integridad una vez que se produce el agrietamiento de los paños de albañilería, en la medida que no se presenten defectos en los empalmes y anclajes de las armaduras de los elementos de confinamiento de hormigón armado y en el tratamiento de las juntas de construcción de los elementos de confinamiento. Algunos de estos defectos, se observaron en edificios ubicados en la zona epicentral, como se muestra en las fotos superiores de la Figura 11.

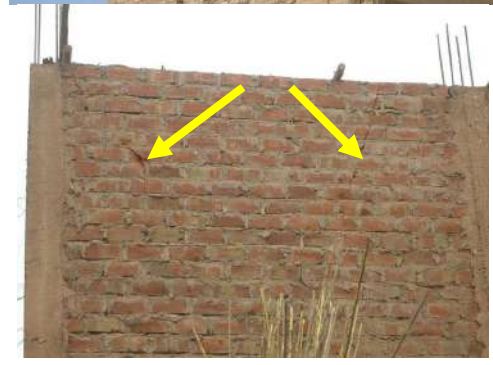


Figura 11.- Daños en edificios de albañilería reforzada

Otro daño observado se debe a la falta de la cadena o viga collar (Collarín) en el borde superior de los muros del último piso, normalmente el segundo piso de las viviendas del tipo unifamiliar. Debido a la falta de este elemento, el paño se agrieta producto de las acciones perpendiculares a su plano, como se muestra en las fotos inferiores de la Figura 11.

Teniendo en cuenta el comportamiento observado en este tipo de construcción, se puede considerar que su clasificación corresponde a un Tipo C de acuerdo con la escala sísmica de intensidades MSK-64 (IGP, 1979), lo cual se confirma si se considera que en la zona epicentral la mayor parte de los daños en este tipo de edificios fueron de la Clase 2 y 1 de la Tabla 3.

Una característica preocupante de los edificios de albañilería reforzada es su reducida densidad de muro, especialmente en la dirección paralela a la fachada, esta situación se produce por el escaso frente que poseen los sitios donde se construyen estas viviendas. Esta limitación puede ser crítica en la medida que aumente el número de piso, como es el caso de la construcción ubicada en la ciudad de Ica que se muestra en la Figura 12.



Ica

Figura 12.- *Ejemplo de edificio de albañilería con reducida densidad de muro en la dirección de su fachada*

Albañilería sin refuerzo

Este tipo de albañilería no es muy frecuente de encontrar en la zona visitada, debido a que las construcciones de los barrios más antiguos están construidas con adobe y quincha.

Este tipo de albañilería se utiliza principalmente en los tabiques de albañilería existentes en las fachadas de edificios con voladizo, ver Figura 13. En la zona epicentral, especialmente en la ciudad de Pisco se pudo comprobar que un número importante de estos tabiques se dañaron severamente, como se muestra en la Figura 14. El daño observado lo producen las acciones sísmica que actúan perpendicular al plano de la fachada y se debe a que estos tabiques, por lo general, se apoyan contra tabiques perpendiculares a través de una conexión dentada, como se aprecia en la Figura 13, la que resulta insuficiente para evitar el vaciamiento del tabique.



Tabique de fachada en voladizo - Ica



Tabique de fachada en voladizo - Ica

Figura 13.- Muestra de tabiques de fachada en voladizo

La situación anterior se hace más crítica a medida que aumenta el número de pisos, como se pudo comprobar en la ciudad de Pisco y Chíncha Alta al presentarse estos daños en los pisos superiores de los edificios.

Aún cuando estas fachadas en voladizo no forman parte de la estructura sismorresistente, es conveniente que se utilice alguna técnica de refuerzo de modo de evitar su vaciamiento considerando los riesgos que ello representa para los transeúntes.



Chinchá Alta



Pisco



Pisco



Pisco

Figura 14.- Daños en tabiques de fachada en voladizo

Edificios de Hormigón Armado.

En la zona de daño del terremoto, se pudo constatar la presencia de edificios de hormigón armado en las ciudades con mayor población, destacando entre ellas las ciudades de Pisco e Ica.

Los edificios de hormigón armado están estructurados con un sistema de marcos o pórticos con tabiques de relleno de albañilería, construidos después que se desmolda la estructura de hormigón armado con lo cual se logra una interfase débil entre la albañilería y el pórtico.

Como se pudo comprobar durante la visita, la presencia de estas tabiquerías fue fundamental en muchos casos para garantizar la estabilidad del edificio, mientras los tabiques no presentaron destrucción total o parcial. En aquellos casos en los que

los tabiques sufrieron destrucción parcial o total, se produjeron serios daños en las columnas de hormigón armado, lo que significó el colapso de alguno de los pisos en los casos más extremos al producirse una falla del tipo “piso blando”. Algunos de los edificios de hormigón armado dañados se muestran en la Figura 15.

En algunos edificios de hormigón armado, la situación destacada se vio favorecida por la falta de vigas en una de las direcciones de la planta, especialmente en los edificios con losas prefabricadas construidas con viguetas y bovedillas. En estos casos, las vigas en la dirección paralela a las viguetas no tienen más altura que el espesor de la losa, disminuyendo con ello la rigidez del edificio en esta dirección y aumentando en forma considerable las demandas de deformación de las columnas producto de sus dimensiones, más bien reducidas, y de su orientación (ejes más débil), situación que generó daños que se pueden clasificar como “destrucción parcial” según la descripción de la Tabla 3.



Pisco



Pisco - Hotel Embassy

Figura 15.- Daños en edificios de Hormigón Armado

Teniendo en cuenta el daño observado en los edificios de hormigón armado de la ciudad de Pisco, es necesario revisar el uso este tipo de sistema estructural como estructura sismorresistente. Lo anterior se destaca debido a que de acuerdo con los daños observados su comportamiento fue inferior al observado en las viviendas de albañilería construidas por sus propietarios.

De acuerdo con lo observado en la visita, el uso de muros o pantallas de hormigón armado puede ser el camino a seguir, ver Figura 16.



Pisco

Figura 16.- *Uso de muros de Hormigón Armado*

Otro tipo de daño observado en estos edificios se produjo por choque con edificios vecinos, como se muestra en la figura 17.



Pisco



Pisco

Figura 17.- *Choque entre edificios*

INTENSIDADES E ISOSISTAS EN LA ZONA DE DAÑO

Las intensidades en las localidades visitadas se determinaron por **inspección visual del comportamiento de las viviendas de adobe y albañilería**, considerando la distribución de las Clases de Daño de la Tabla 3 y su relación con la intensidad sísmica para las clases de vulnerabilidad A y C de la Tabla 4 (Monge y Astroza, 1989).

Los valores de la Tabla 4 corresponden a los establecidos en la escala sísmica de intensidad MSK-64 (Kárník et al., 1984). Esta escala ha sido utilizada tanto en Perú como en Chile para determinar las intensidades de los terremotos ocurridos en los últimos 30 años.

Para establecer las intensidades de acuerdo con este método se ha aceptado que las construcciones de adobe pertenecen a la Clase A de vulnerabilidad y las de albañilería sin diseño sismorresistente a la Clase C (IGP, 1979, Monge y Astroza, 1989).

Tabla 4.- Distribución del daño en función del grado de intensidad sísmica para cada Clase de Vulnerabilidad.

Grado de Intensidad	Clase A	Clase B	Clase C
5	5% Clase 1 95% Clase 0	100% Clase 0	100% Clase 0
6	5% Clase 2 50% Clase 1 45% Clase 0	5% Clase 1 95% Clase 0	100% Clase 0
7	5% Clase 4 50% Clase 3 35% Clase 2 10% Clase 1	50% Clase 2 35% Clase 1 15% Clase 0	50% Clase 1 50% Clase 0
8	5% Clase 5 50% Clase 4 35% Clase 3 10% Clase 2	5% Clase 4 50% Clase 3 35% Clase 2 10% Clase 1	5% Clase 3 50% Clase 2 35% Clase 1 10% Clase 0
9	50% Clase 5 35% Clase 4 15% Clase 3	5% Clase 5 50% Clase 4 35% Clase 3 10% Clase 2	5% Clase 4 50% Clase 3 35% Clase 2 10% Clase 1
10	75% Clase 5 25% Clase 4	50% Clase 5 35% Clase 4 15% Clase 3	5% Clase 5 50% Clase 4 35% Clase 3 10% Clase 2
11	100% Clase 5	75% Clase 5 25% Clase 4	50% Clase 5 50% Clase 4

Las intensidades se han determinado considerando los daños en los sectores más afectados de cada localidad, por lo que cualquier efecto local que reduzca los efectos del terremoto no ha sido considerado.

Las intensidades que resultan al aplicar el método descrito, se indican en la Tabla 5. Considerando estas intensidades y la información reportada por Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI, 2007), se han trazado las isosistas para la zona de daño del terremoto del 15 de agosto del 2007, las que se muestran en la Figura 18. En esta figura se destacan con rojo las localidades visitadas.

De acuerdo con la Tabla 4, la zona de daño del terremoto corresponde a la región encerrada por la isosista del grado 6, la cual se extiende aproximadamente entre los paralelos $-12,5^{\text{a}}$ y -15° de latitud sur. Además se observa que el daño se atenúa rápidamente hacia el sur, lo que puede ser consecuencia de la presencia de la dorsal de Nazca, la que podría estar representando una barrera para los efectos de propagación del daño.

Tabla 5.- Intensidades sísmicas en las localidades visitadas (Escala MSK-64)

Localidad	I _{MSK}	Localidad	I _{MSK}	Localidad	I _{MSK}
Lurin	5.5	San Vicente de Cañete	7.0	Guadalupe	7.5
Pucusama	5.5	Chincha Alta	7.5	Ica	7.0
Chilca	6	Tambo de Mora	7.0	Tate de la Capilla	6.5
Mala	6.5	Chincha Bajo	7.5	Santiago	7.0
Asia	6.5	San Clemente	7.5	Pachacutec	6.0
Coayllo	7.0	Pisco	8.0	Ocucaje	6.0
Lunahuana	7.0	San Andrés	7.5	Palpa	< 6.0
Cerro Azul	6.5	Paracas	7.5	Nazca	< 6.0
Pauyo	6.0	Pozo Santo	7.5	San Juan	< 6.0

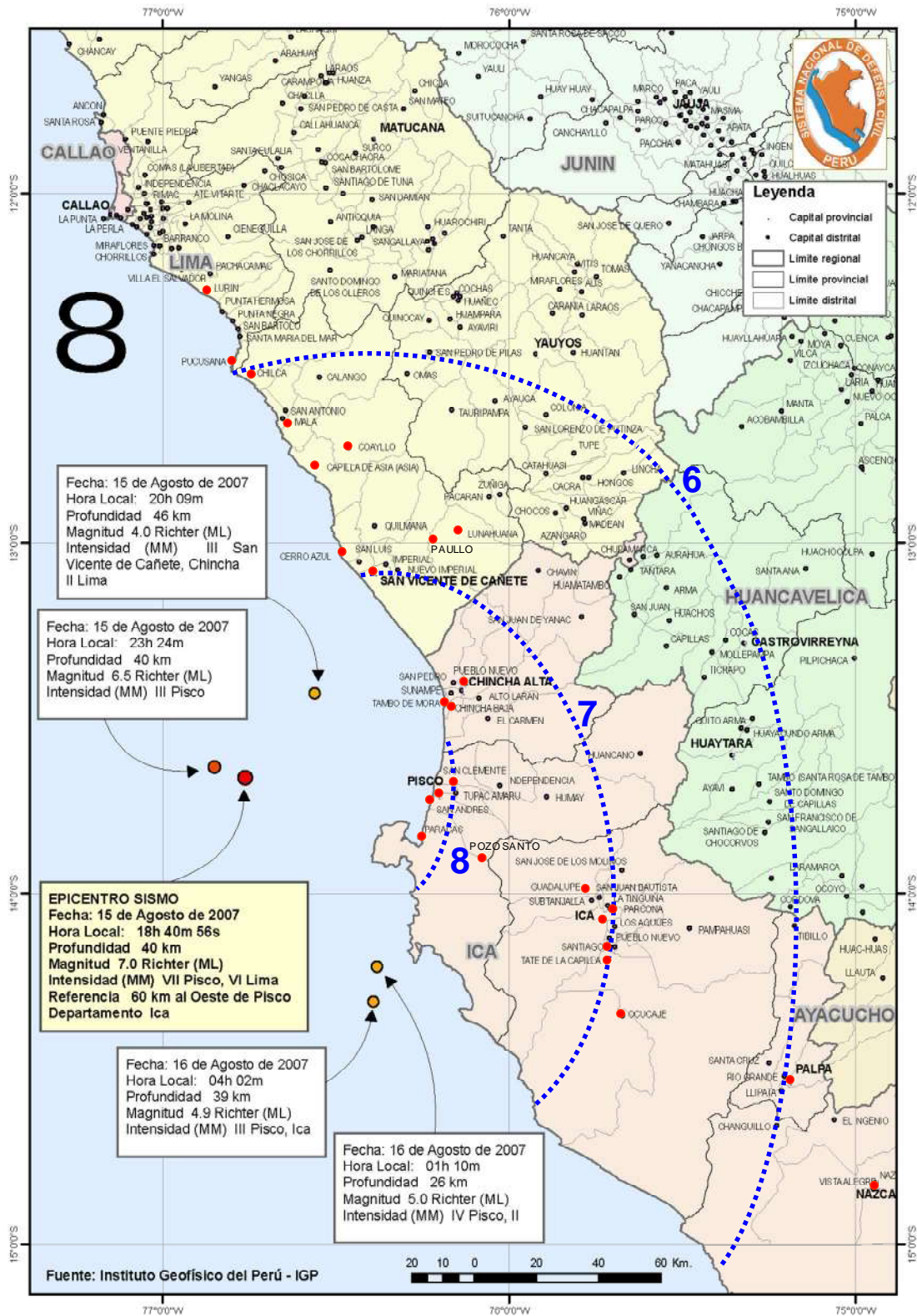


Figura 18.- Isosistas en la zona de daño del terremoto del 15 de agosto del 2007.

ATENUACIÓN DE LAS INTENSIDADES

La atenuación de las intensidades con la distancia hipocentral se determina con las intensidades obtenidas de la inspección de los daños y con las intensidades reportadas por el Instituto de Geofísica del Perú (Tavera et al., 2007). Estas últimas se obtuvieron a partir de una comunicación telefónica a dos o tres personas de cada ciudad, utilizando la escala de Mercalli Modificada para interpretar la información obtenida.

En la Tabla 7 se detallan las intensidades para 54 localidades y en la Figura 19 se grafican estas intensidades en función de la distancia hipocentral, aceptando que la escala de Mercalli Modificada es equivalente a la escala MSK-64 (Barrientos, 1980, Levret and Mohammadioun, 1984) y que los parámetros del hipocentro son los reportados por el IGP (Tavera et al., 2007), los que se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6.- Parámetros hipocentrales del sismo del 15 de agosto del 2007 (IGP, 2007b).

PARAMETROS	
Latitud Sur	-13.67°
Longitud Oeste	-76.76°
Profundidad	40 km
Magnitud	7.0 M_L , 7.9 M_W

En la Figura 19 se dibuja la curva de atenuación de la intensidad que resulta al ajustar por mínimos cuadrado una ecuación del tipo:

$$I = A + B \cdot \log_{10}(R) + C \cdot R$$

donde: R = distancia hipocentral

Esta ecuación es de la forma de la fórmula de atenuación de intensidades propuesta por Barrientos para terremotos chilenos (Barrientos, 1980), resultando para el terremoto del 15 de agosto del 2007:

Tabla 7.- Intensidades del sismo del 15 de agosto del 2007

	Pueblo	Departamento	Provincia	Intensidad	Distancia Hipocentral [km]
1	Lurín	Lima	Lima	5,5	159,69
2	Pucusama	Lima	Cañete	5,5	137,94
3	Chilca	Lima	Cañete	6	132,61
4	Mala	Lima	Cañete	6,5	121,07
5	Asia	Lima	Cañete	6,5	108,43
6	Coayllo	Lima	Cañete	7	116,10
7	Lunahuana	Lima	Cañete	7	111,25
8	Cerro Azul	Lima	Cañete	6,5	86,63
9	Pauyo	Lima	Cañete	6	102,69
10	San Vicente de Cañete	Lima	Cañete	7	85,85
11	Chincha Alta	Ica	Chincha	7,5	82,38
12	Tambo de Mora	Ica	Chincha	7	75,97
13	Chincha Baja	Ica	Chincha	7,5	78,88
14	San Clemente	Ica	Pisco	7,5	77,13
15	Pisco	Ica	Pisco	8	71,11
16	San Andrés	Ica	Pisco	7,5	69,91
17	Paracas	Ica	Pisco	7,5	70,14
18	Pozo Santo	Ica	Pisco	7,5	87,24
19	Guadalupe	Ica	Ica	7,5	119,33
20	Ica	Ica	Ica	7	126,82
21	Tate de la Capilla	Ica	Ica	6,5	132,06
22	Santiago	Ica	Ica	7	133,12
23	Ocucaje	Ica	Ica	6	145,58
24	Palpa	Ica	Palpa	5	199,46
25	Nazca	Ica	Nazca	5	237,93
26	San Juan	Ica	Nazca	5	258,69
27	Talara	Piura	Talara	2	1123,02
28	Chiclayo	Lambayeque	Chiclayo	2	836,85
29	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	3	748,74
30	Chachapoyas	Amazonas	Chachapoyas	2	838,03
31	Moyobamba	San Martin	Moyobamba	2	848,46
32	Trujillo	La Libertad	Trujillo	3	665,68
33	Chimbote	Ancash	Santa	4	548,78
34	Huaraz	Ancash	Huaraz	4	469,43
35	Huanuco	Huanuco	Huanuco	4	423,23
36	Cotobamba	Loreto	Ucayali	3	730,35
37	Pucallpa	Ucayali	Coronel Portillo	3	636,25
38	Barranca	Lima	Barranca	5	344,72
39	La Merced	Junin	Chanchamayo	4	332,90
40	Canta	Lima	Canta	5	249,11
41	Matucana	Lima	Huachichirí	5	210,45
42	Lima	Lima	Lima	5	187,16
43	Huancayo	Junin	Huancayo	4	246,72
44	Huancavelica	Huancavelica	Huancavelica	5	221,04
45	Calango	Lima	Cañete	6	134,64
46	Ayacucho	Ayacucho	Huamanga	4	283,08
47	Puquio	Ayacucho	Lucanas	4	309,02
48	Chala	Arequipa	Caraveli	4	367,30
49	Abancay	Apurimac	Abancay	3	421,20
50	Cusco	Cusco	Cusco	3	518,68
51	Cotahuasi	Arequipa	La Union	3	454,10
52	Camana	Arequipa	Camana	3	548,36
53	Arequipa	Arequipa	Arequipa	2	642,23
54	Mollendo	Arequipa	Islay	3	635,11

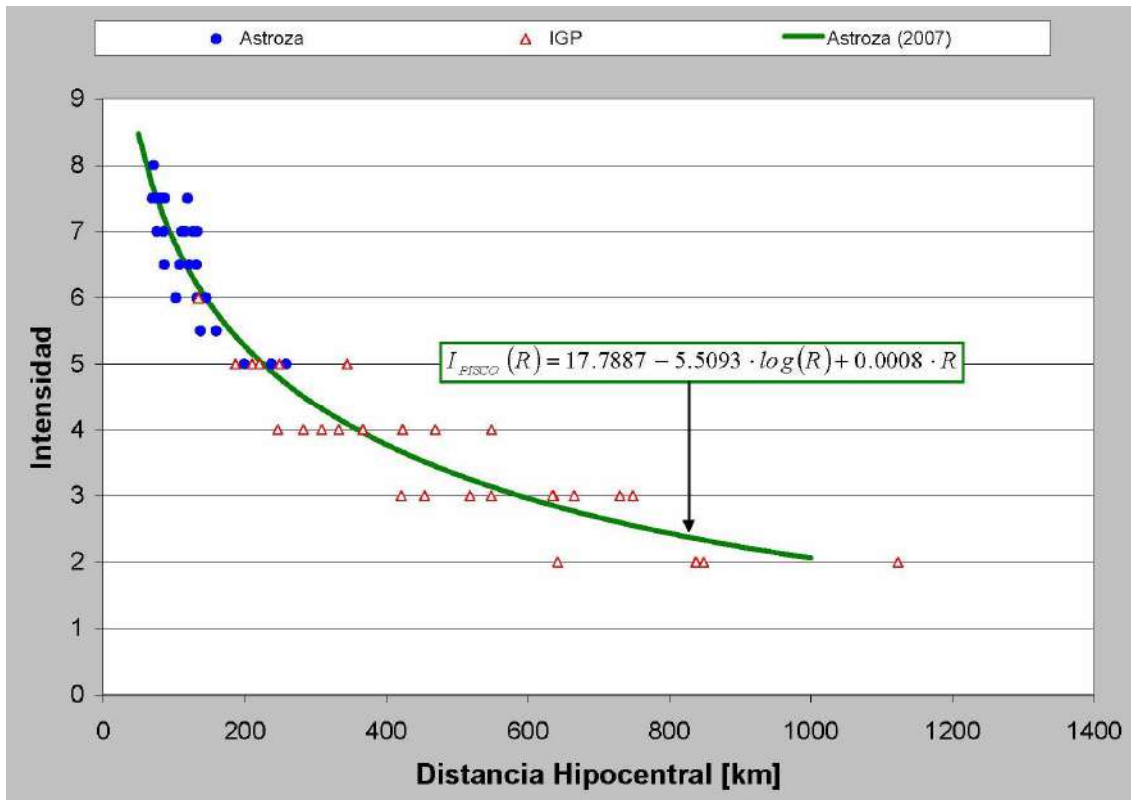


Figura 19.- Intensidades del terremoto del 15 de agosto del 2007 en función de la distancia hipocentral.

$$I_{PISCO-07} = 17.7887 - 5.5093 \cdot \log_{10}(R) + 0.0008 \cdot R$$

Al revisar la Figura 19 se observa que la intensidad de la localidad de Barranca debiera revisarse ya que su valor debiera ser menor por su distancia hipocentral.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Dr. Daniel Huaco Oviedo y a CERESIS por la oportunidad de colaborar en el reconocimiento del área afectada por el sismo de Pisco del 15 de agosto del 2007. Igualmente se agradece la compañía del Profesor Francisco Giuliani de Argentina, con quien se intercambiaron opiniones y apreciaciones sobre los daños y efectos observados. Además se agradece la colaboración del Sr. Rodrigo Astroza E., Magíster en Ingeniería Sísmica de la Universidad de Chile, en la preparación de este informe.

REFERENCIAS

- Barrientos S., 1980, Regionalización Sísmica de Chile, Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias con Mención en Geofísica, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.*
- I.G.P., 1979, Escala Sísmica de Intensidades. MSK-64. Versión Adaptada I.G.P. 1979, Lima, Perú.*
- INDECI, 2007, Movimiento Sísmico Afecta Severamente Departamentos de ICA y Sur de Lima, Informe de Emergencia N° 286, 17/08/2007, Instituto Nacional de Defensa Civil, Lima, Perú.*
- Kárník V., Z. Schenková and V. Schenk, 1984, Vulnerability and the MSK Scale, Engineering Geology, 20, pp 161-168.*
- Levret A. and B. Mohammadioun, 1984, Determination of Seismic Reference Motion for Nuclear Sites in France, Engineering Geology, 20, pp 25-28.*
- Monge J. y M. Astroza, 1989, Metodología para determinar el grado de intensidad a partir de los daños, 5as Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Vol. 1, pp 483-492, Santiago, Chile.*
- Tavera H., I. Bernal y H. Salas, 2007, El sismo de Pisco del 15 de Agosto, 2007 (7.9 Mw). Departamento de Ica-Perú, Instituto Geofísico del Perú, Informe Preliminar, Agosto, Lima, Perú.*

DAÑOS POR EL TERREMOTO DEL 15 DE AGOSTO DEL 2007

Julio César Cuenca Sánchez

*Universidad Nacional Autónoma de México
Intitulo de Ingeniería, Coordinación Ingeniería Sismológica
jccsa@pumas.iingen.unam.mx*

RESUMEN

El 15 de agosto del 2007, en la costa central peruana ocurrió un fuerte terremoto con epicentro muy cerca de Pisco (Perú), siendo una de las más devastadas de las ciudades, principalmente sus iglesias y casas de adobe y pueblos afectados en la costa (Ica, Chincha y Cañete) y algunas de la sierra. Los daños han alcanzado a las regiones de los Departamentos de Ica, Lima, Ayacucho, Huancavelica, Junín, Abancay y Arequipa.

INTRODUCCION

Una gran cantidad de edificaciones con daños son las de adobe construidas con varillas de caña, madera y barro, muchos techos de mismo material con cobertura de barro, tejas y en algunos con lámina, sostenidos con vigas de madera de huarango, generándose el colapso de techos y paredes. Entre ellas están las iglesias, templos, casas y casonas, museos, puntos arqueológicos que formaban patrimonio cultural de los pueblos principalmente de los Departamentos de Ica y Lima. También, se dañaron las casas de albañilería con agrietas, con colapso o hundimiento, por mal diseño, por asentarse en suelos blandos y por falta de adecuadas técnicas constructivas. La debilidad de las paredes sin refuerzos, sin columnas, sin sobrecimientos o contrafuertes hizo que ante el fuerte y prolongado movimiento sísmico colapsaran y por ende sus techos.

Varios factores han contribuido a generar efectos desastrosos, entre ellos tenemos: su antigüedad, la falta de mantenimiento, la falta de refuerzos adecuados, no seguir las normas constructivas y autoconstrucción, la amplificación sísmica provocada por suelos blandos cercanos a la costa, aunado a la directividad y cercanía de la fuente sísmica, así como la licuefacción de suelos. Asimismo, algunas construcciones de albañilería y otras con adobe, quincha y madera soportaron el movimiento sísmico sin o con daños ligeros.

Los daños fueron en iglesias, templos, viviendas, hospitales, hoteles, colegios, universidades y centros arqueológicos, museos, reserva natural, infraestructura

carretera, eléctrica, hidráulica, de riego y de agua potable. Sin llegar a realizar una completitud, se presenta una sucinta descripción de los daños en algunas ciudades con información disponible: Lima, Callao, Cañete, Yauyos, Chincha, Pisco, Paracas, ciudad de Ica, Huancavelica, Ayacucho, Huancayo, Andahuaylas, Caravelí y Camaná.

CIUDAD DE LIMA

En la ciudad capital, a 95 kilómetros del epicentro, la población mostró un temor generalizado y algunos daños a la infraestructura privada con derrumbe de algunas casas. En varias zonas de la capital se cortó la electricidad por algunas horas. Se cerraron escuelas públicas porque los edificios pudrían ser inseguros. Varias estructuras con grietas y caída de vidrios al suelo de ventanas de edificios. Los bomberos tuvieron 104 emergencias en Lima y Callao. Los celulares y las líneas telefónicas estuvieron colapsados posterior al sismo y la conexión a Internet siguió funcionando.

Casas:

- Dos casonas presentan mayores daños en los locales principales de la Escuela de Bellas Artes del Perú, edificadas de adobe y quincha y tienen más de un siglo de antigüedad (Figura 1).
 - o Una está ubicada en la cuadra siete del jirón Áncash, conocido como Casa Canevaro, a poca distancia del Congreso de la República. Allí se dictaban las clases de la Pre Bellas Artes, en promedio a 200 personas diariamente entre alumnos y profesores.
 - o Uno de los muros principales se ha inclinado como consecuencia del sismo. La situación del inmueble es de alto riesgo y se aconsejó su evacuación (según la administración del centro de estudios y evaluación de Defensa Civil).
 - o La otra casona de la Escuela de Bellas Artes de la cuadra seis, donde dictan la mayor parte de los cursos, en dos aulas se observaron rajaduras en sus vigas y muros, las cuales fueron clausuradas.
 - o Una antigua estatua de yeso de alrededor de 150 años con más de 2 metros de alto y de cerca de media tonelada cayó al piso partiéndose en pedazos.
- En el cercado de Lima antiguas casonas construidas con adobe se derrumbaron (La República).

- En Lince una casa de dos pisos en estado ruinoso, mostró grietas en su fachada comprometiendo su estabilidad (Figura 2).
- Se registraron muchos incendios, siendo el de mayor magnitud en el distrito de El Rimac (Figura 3), en el segundo piso de un edificio ubicado en el asentamiento humano Mariscal Cáceres, debido a un corto circuito. Los bomberos apagaron un fuego en un centro comercial.
- En San Juan de Lurigancho, en el sector Bayobar, se desplomó muro de contención y aparición de grietas bajo el piso de viviendas localizadas en la ladera del cerro (Figura 4).
- En San Juan de Lurigancho, un edificio de cuatro pisos en la Urbanización Caja de Agua con daños en voladizo y parapetos y en la Urbanización Los Jardines otro edificio de ocho pisos con daños en su último piso.
- Rajaduras verticales en fachada del edificio del Ministerio de Trabajo entre el bloque central más alto de 11 pisos y el bloque adjunto lateral de menor altura, clausurándose su acceso (Figura 5).
- En Barrios Altos (Figura 6), antiguas casas con paredes altas de adobe y combinados con ladrillo en su base colapsaron ante falta de columnas, como la vivienda antigua ubicada en la cuadra 8 del jirón Andahuaylas.
- Las lunas del cuarto piso del edificio de Ripley, en San Miguel, se rompieron y la gente asustada salió hacia la avenida La Marina (La República).
- Cerca de 400 casonas del Centro Histórico de Lima han sido declaradas “ruinosas” por INDECI, las zonas con mayor riesgo en el Centro de Lima son Barrios Altos, El Rímac y Monserrate.



Figura 1.- Casona, Bellas Artes.



Figura 2.- Incendio en Rimac.



Figura 3.- Casa en Lince

Iglesias:

- La torre de la Iglesia de San José (Lima) ha sido dañada y el antiguo templo del Santo Cristo, tuvo grietas (Capellanía de Padres en Lima-El Cercado), reportado por la Orden de Carmelitas Descalzos.
- La capilla del colegio N. S. de Guadalupe sufrió rajadura en su techo.
- El templo del convento Santa Clara, con desprendimiento de parte interna del techo abovedado.
- En una iglesia adventista en Villa El Salvador colapsó techo metálico con planchas de eternit (El Comercio, Peru21) sobre la Av. Pastor Sevilla y José Olaya (y demolida para su reconstrucción).



Figura 4- Lurigancho, Bayobar.

Figura 5.- Ministerio Trabajo

Figura 6.- Barrios Altos

Carreteras

- En Pantanos de Villa grietas en la pista asfáltica de carretera Huaylas-Chorrillos y hundimiento por humedales.
- En la carretera central a la altura del kilómetro 65, hubo derrumbes (aproximadamente 8 metros de alto) que interrumpieron el paso de vehículos hacia Huanuco, Pasco y Junín.
- Inundación y algunos derrumbes de materiales sueltos sobre la pista de la Costa Verde, interrumpiéndose el tráfico, sobre Barranco y Miraflores.

Colegios

- En el Rimac, los colegios José Granda y Miguel Grau, pertenecientes a la UGEL-2, presentaron serios daños en su infraestructura.
- El colegio N. S de Guadalupe con daños en su segundo piso.

CALLAO

Se recuerda que en 1746 un devastador tsunami sacudió el Callao entero y originó que el mar llegara hasta Carmen de la Legua. En el Callao, muchos vecinos se refugiaron en el parque Yahuarhuaca por miedo al tsunami, pero luego todos regresaron a sus casas.

- Las lanchas de pescadores en la zona costera de la Punta y en Chuchito.
- Inundaciones de agua de mar en calles de la zona de La Punta y en barrio Siberia.
- Caída de barda entre las avenidas Buenos Aires y Paz Soldan.

CAÑETE

En Cañete, provincia de Lima, (a 150 Km al sur de Lima) este terremoto causó daños en muchas viviendas en San Vicente, Las Viñas, San Luís e Imperial.

En Cañete, los más graves son los templos de **San Pedro de Coayllo**, **San Antonio de Padua** y **San Luís**, y con daños moderados el templo de **Pacarán** y **Santiago Apóstol de Lunahuaná**.

Iglesias

- El templo de San Pedro de Coayllo del siglo XVI, construida de adobe ya tenía serios daños en su nave, aberturas en la unión pared con la bóveda encima del altar y grietas verticales en sus paredes, su torre derecha con dos cuerpos estaba conservada a diferencia de la torre izquierda solo tenía un cuerpo (Figura 7).
 - o Con el terremoto colapsó toda su nave conformada por la bóveda y su cúpula.
 - o Quedó intacto su frontis central al igual que su torre derecha.
 - o Parte de la torre izquierda se derrumbó hacia el frente.
 - o La parte superior del altar hecha de adobe se vino abajo.
 - o El techo abovedado encima del altar quedó al descubierto.
- En las Carmelitas Descalzas de San Vicente de Cañete, se derrumbó parte de muro externo y una pared del monasterio. Un depósito de agua en una azotea

reventó e inundando el convento. En la iglesia se cayó la imagen de San Juan de la Cruz.

- La iglesia Nuestra Señora del Carmen (Imperial), (Figura 8).
 - o Encima de la puerta de entrada tiene grietas cruzadas en su parapeto o frontis, con riesgo de caerse.
 - o Sus torres están adelante respecto a la puerta de entrada y por ello se generaron grietas verticales entre el cuerpo de las torres y el frontis.
 - o Sus dos torres de dos cuerpos permanecieron sin daños aparentes.
- En San Luís, la capilla de la única Santa Negra del Perú, Santa Ifigenia o Santa Ifigenia, con fuertes daños y colapso de su estructura (Figura 9).
 - o Parte de su fachada quedo en pie.
 - o Cayó techo y algunas vigas de madera.
 - o Sus paredes estas resquebrajadas y grietas.
 - o El altar totalmente dañado.



Figura 7.- Templo Coayllo.



Figura 8.- Templo en Imperial



Figura 9.- Templo Santa Ifigenia



Figura 10.- San Luís Tolosa



Figura 11.- San Antonio de Padua



Figura 12.- San Vicente de Cañete

- La iglesia Virgen de la Asunción de la población de Chilca (provincia de Cañete):
 - o con daños serios en uno de sus campanarios por el terremoto, y sus paredes presentan una serie de grietas.

- Esta iglesia fue construida en el año 1,734 y hace un año se hicieron labores de restauración con caña y yeso, y por ser monumento histórico (el Instituto Nacional de Cultura impide la utilización de otros materiales para su reconstrucción).
- El templo San Luís Tolosa, con dos torres de dos cuerpos (Figura 10):
 - Se observan grietas en la fachada hecha de quincha con desprendimiento de recubrimientos.
 - Grietas diagonales encima de la puerta de entrada, producto del choque entre las torres y el frontis.
 - Fuertes daños en su nave y bóveda.
- En el templo San Antonio de Padua (Figura 11), con dos torres de un cuerpo, los daños son de consideración:
 - Su fachada se conservó, pero tienen grietas verticales entre las torres y su fachada, producto del movimiento en forma de péndulo invertido.
 - La bóveda construida de carrizo, con arcos de madera (en U invertida) y con cobertura de barro colapsó en su parte central.
 - Están agrietadas las claves de sus arcos de ambas torres.
- En la catedral San Vicente Mártir fue ligeramente afectada (Figura 12):
 - Principalmente se dañó su fachada con algunas fisuras.
 - Grietas en parte del ala izquierda.
 - Rajaduras de su infraestructura en el interior.
- En la iglesia de Ramadilla (Cañete) con dos torres:
 - Su fachada sin daño aparente, pero de su altar se desprendieron tres pedestales o nichos (elementos no estructurales) los cuales cayeron totalmente al piso.
 - La pared del altar esta dañada con grietas diagonales producto de esfuerzos de corte.

Casas

- La casa histórica O'Higgins, construida en 1787 y localizada en la hacienda Montalván (Figura 13), se ubica al margen derecho de la entrada a San Vicente Km. 144 de la Panamericana Sur, patrimonio cultural el 15 de octubre de 1974.
 - Fue destruida algunas paredes de adobe y quincha, además del techo de caoba en una habitación.

- Hay grietas en las paredes, que comprometen su estructura por lo que necesita ser restaurada.
- Caída de una pileta y grietas en bardas.
- En Cañete en la Av. 2 de mayo colapso de techo y paredes de casas de adobe, sin columnas ni sobrecimiento en su fachada (Figura 14).
- Casas de adobe en Hualcarán (Figura 15).
 - Caída de acabados y separación de paredes ortogonales y en esquina.
 - Algunas casas de adobe tienen un buen sobrecimiento (por encima de la calle), que permitió estabilidad de altas paredes de adobe.
- En el Jr. Ohiggins y Jr. Bolognesi casas de adobe se derrumbaron en sus paredes de adobe hacia la calle. Los techos aligerados con madera y lámina quedaron al descubierto y en otros casos colapsaron.
- En la calle San Agustín, en edificio de tres pisos de albañilería con daño en paredes y en elementos no estructuras de los dos pisos superiores, por falta de columnas y necesitan ser reforzadas.



Figura 13.- Hda. Montalván.



Figura 14.- Av. 2 de Mayo



Figura 15.- Daños en Hualcarán.

Hospitales

- En el Rezola con daños estructurales en la morgue y en laboratorios.

YAUYOS

En Yauyos, provincia de Lima, ubicada al noreste de Cañete. Con daños en Tupe, Laraos y Yauyos.

Carreteras

- La carretera Cañete-Lunahuaná, con dirección al centro turístico en deportes de aventura, se ha destruido.

Casas

- En Yauyos, daños en viviendas de adobe y otras construidas con piedra:
 - o Casas con sobrecimientos de piedra no colapsaron, pero si tuvieron grietas verticales entre muros ortogonales (Figura 16).
 - o Techos de láminas sostenidos con vigas de madera permanecieron aunque afectados.
- Otras casas hechas con piedra y barro colapsaron en parte debido a su antigüedad (Figura 17).
- Laraos en la provincia de Yauyos, Dpto. de Lima, a 3,310 m.s.n.m., con daños en casas de adobe y de piedra por no tener refuerzos de columnas.
 - o Colapso de muros de piedra y adobe, con caída de su cobertura.
 - o Caída de paredes quedando techos con vigas de madera.
 - o Grietas entre esquinas y caída de paredes de adobe, pese a tener una base de piedra.
 - o Algunas casas con buen sobrecimiento de piedra soportaron el terremoto.
 - o Colegio con agrietamientos del tipo de tensión (Figura 18).
- Jaqaru es hablado por unos miles de personas en Distrito de Tupe, en la provincia de Yauyos, Departamento de Lima. La altura de Tupe es de 3 mil metros sobre el nivel del mar, y se reportó:
 - o El 95% de las casas colapsaron en Tupe (Figura 19).
 - o En Tupe hubo casas con colapso de paredes, por falta de soporte encima de puertas.
 - o Por estar en laderas muchas casas de adobe se abrieron grietas verticales entre paredes y ante la falta de amarre, algunas no colapsaron debido a su sobrecimiento de piedra.



CHINCHA

Chincha, es un pueblo pequeño a 32 kilómetros al norte de Pisco. Este terremoto lo dejó muy dañado. En informe se registraron más de 16 mil viviendas destruidas en la provincia de Chincha (Ica) (INDECI).

En Chincha, los templos de **Santiago de Almagro y Santo Domingo** tienen daños graves y con daños moderados el templo de la **casa-hacienda San José, de El Carmen y la casa-hacienda de San Regis**.



Iglesias

- En Chincha Baja, los daños mostraron la estructura de abobe por la caída de cobertura exterior de sus torres y fachada.
- El templo Santiago Apóstol, con dos altas torres de dos cuerpos, mostró daños (Figura 20):
 - o En su fachada se desprendieron recubrimientos de barro.
 - o Sus dos altas torres fueron remecidas y desprendiéndose la cobertura de adobe y enchape exterior.

- La torre derecha con más daño, pero ambas no llegaron a colapsar.
- El templo de la Virgen del Carmen (Figura 21), frente a la plaza:
 - Su fachada con ligeras grietas.
 - Colapsó la parte superior de la torre derecha.
 - Su torre izquierda permaneció sin daño aparente, esto es producto de etapas constructivas y al efecto de péndulo invertido.
- Los templos Santiago de Almagro y Santo Domingo construidos con adobe, ya habían tenido daños anteriores.
- El Templo de Santo Domingo con fuerte daño:
 - Antes del terremoto conservaba una torre derecha de un solo cuerpo.
 - Este sismo hizo colapsar su torre derecha, techo, y parte superior de su frontis.
 - Quedó la estructura de entrada a una altura por encima de su puerta de ingreso (Figura 22).
- La Iglesia junto a la Hacienda San José:
 - Tuvo daños con grietas en sus torres de un solo cuerpo y en la parte superior de la torres.

Hospitales

- El hospital San José con daños parciales.
- El hospital básico de EsSalud con daños parciales.

Casas

- El edificio del Municipio de Chincha con grieta vertical en su fachada, aparentemente de unión constructiva.
- En la Av. Mariscal R. Benavides una casa mostró agrietamientos del tipo de corte (en equis).
- Casas de albañilería en cuatro pisos en esquina con otra construcción más moderna sufrieron agrietamientos, producto de efecto de sitio y por el golpeteo.
- Muchas de casas hechas con bloques del adobe se derrumbaron, ante la falta de sobrecimiento y columnas, en algunos casos dejando al descubierto sus techos.
- En la municipalidad de Pueblo Nuevo daño no estructural en la parte superior de la fachada de su segundo piso, donde tiene elementos no estructurales.

- En Grocio Prado, el segundo piso de edificio de 4 pisos de albañilería, colapsó al romperse columnas por demasiado peso y larga, con serios daños estructurales.
- La casa religiosa de la Beata Melchorita, colapsó su interior, se salvó cama y efectos personales.
- En Sunampe, muchas casas de adobe colapsaron sus techos y paredes.
- En Chincha Baja casas de adobe y varillas de caña colapsaron totalmente (Figura 23). Casas de albañilería con grietas horizontales y hundimiento diferencial debajo del nivel de la calle, debido a un suelo blando (Figura 24). En Tambo de Mora caída de bardas y daños en casas de la costa.
- Coches y casas hundidos en arena (licuefacción). Otras casas de adobe colapsadas paredes y techos.
- El emblemático monumento de Chincha: **La Hacienda San José** de construcción colonial que sirve como posada de turistas fue severamente dañada (Figura 25):
 - o Muchas de sus paredes y techos quedaron derruidos, incluyendo la bella capilla con un altar de estilo barroco, las cuales han quedado prácticamente inhabitables.
 - o Parte del mobiliario también fue afectado (El Comercio).



Figura 23.- Chincha Baja.



Figura 24.- Casa en la costa.



Figura 25.- Hacienda San José.

Colegios

- La G.U.E. José Pardo y Barreda, construida con adobe sufrió daños en su estructura con la caída de recubrimiento en sus paredes de sus ambientes y es los espacios entre las puertas y ventanas.

Sitios Arqueológicos

- En Chincha, en total son seis sitios afectados.
- Con daños el complejo piramidal La Centinela a 18 m.s.n.m.

Carreteras

- La carretera Chincha-Huancavelica quedó destruida, con lo que la provincia de Castrovirreyna perdió comunicación con la ciudad de Chincha.
- La capa asfáltica de la Carretera Panamericana Sur, tuvo colapsos y agrietamientos en varias zonas, en los kilómetros 80-100.
- El puente San Clemente (Chincha) colapsó y en varios tramos de la carretera se hundió impidiendo el tránsito.
- En Chincha Baja con agrietamiento de la carpeta asfáltica.

PISCO

El casco urbano de la ciudad de Pisco fue gravemente afectado, se estima que un 80% de casas de su Centro cayó por efectos del sismo (incluyendo iglesias, tiendas, hoteles), quedando sin luz, agua, comunicaciones y sus distritos cercanos también fueron afectados.

Más de 11,000 viviendas de Pisco afectadas deben ser demolidas por encontrarse en calidad de inhabitables (INDECI) y más de 8,000 viviendas presentan daños en su infraestructura que podrán recuperarse previa una adecuada reparación.

En Pisco fueron declarados con fuertes daños en pérdida total los templos de **San Clemente, La Compañía y Fray Ramón Rojas** en Pozo Santo; con daños graves están **La catedral** así como los templos **Santa María del Socorro y San Juan Bautista**, y con daños leves el templo de Belén.



Iglesias

- La Iglesia de San Clemente de Pisco, del siglo XVIII, colapsó (Figura 26), sepultando en los escombros a los feligreses que asistían a misa a la hora del terremoto, (actualmente es un terreno baldío donde se levantan únicamente sus torres).
 - o Sólo quedo en pie las dos torres de 2 cuerpos de igual ancho y un tercer cuerpo más angosto coronado por una cruz.
 - o La cúpula del altar quedo en pie y todas las paredes laterales colapsaron.
 - o Tanto la nave o bóveda constituidas con varillas de carrizo, madera, barro y bloques de adobe, se vieron abajo por el fuerte desplazamiento sísmico y a la falta de contrafuertes en paredes laterales.
 - o La parte central superior de la fachada colapso (parapeto con falta de apoyo), pero su parte inferior de ingreso fue soportada por dos columnas y torres a ambos lados, pero debido a grietas en la puerta de entrada fue demolida.
- El antiguo Templo del Socorro sufrió daños en su infraestructura, con más de 300 años de antigüedad y valor histórico, está ubicada junto a un hospital del mismo nombre en la avenida Castrovirreyna. INDECI la calificó de alto riesgo.
- El templo de la Compañía de Jesús construida de adobe con daño total (Figura 27):
 - o El techo y sus paredes laterales colapsaron totalmente.
 - o Permaneció las fachas y puertas.
 - o No tenía suficientes contrafuertes, y no resistió el fuerte y largo movimiento sísmico.
 - o La antigüedad y la falta de contrafuertes contribuyó a su derrumbe.

- El templo de Belén con colapso en parte central de su nave.
- El templo de la Beatita de Humay, se desplomó.
 - o La torre central con dos cuerpos permaneció sin daño por ser más moderna.
 - o Las paredes con desprendimiento del enchape apareciendo el adobe a la vista.
 - o Caída de parapetos y techo. Habitaciones adjuntas tuvieron grietas.

Carreteras

- El Puente San Clemente, localizado en San Clemente (Pisco) y parte de la carretera Panamericana Sur fueron dañados, cortando en tránsito hacia el Norte con Lima y hacia el Sur con Nazca. El puente Huamaní (km 228 de la carretera Panamericana Sur), registró problemas de inclinación del estribo sur, corto el tránsito de acceso o salida de la ciudad de Pisco (Ica).

Casas

- El Hotel “Embassy” tuvo irreparables daños estructurales con colapso (Figura 28). La Municipalidad Provincial de Pisco, manifestó que la propiedad pertenecía a la familia Castro Capurro, y luego por herencia a hijo como administrador:
 - o Situado en esquina, con el colapso total del primer piso, con falla piso blando.
 - o Rotura de columnas de hormigón.
 - o No tuvo las varillas de mayor grosor adecuadas para dicha construcción de esa magnitud y sólo tenía autorización para construir dos pisos (El Correo).
 - o Se cuestionó sobre los pisos y la altura del mismo, es decir la base fue hecha para soportar dos pisos y no para cinco como tuvo.
 - o Se consideró el colapso debido a la antigüedad del hotel y al tipo del suelo.
- Muchas casas de adobe sin refuerzos en paredes y sin sobrecimientos de piedra o ladrillo colapsaron, así como sus techos de varillas de caña y madera (Figura 29).

- Antiguas casas de dos pisos y en esquina, resistieron el terremoto debido al tipo de materiales y a su estructura de madera y quincha (Figura 30).
- La Municipalidad de Pisco con agrietamientos en parte superior debajo de mástil de bandera.
- El cementerio tuvo graves daños, bloques de 6 pisos de nichos con colapso en sus extremos.



Figura 29.- Casa de adobe.



Figura 30.- Pisco.



Figura 3.- Hospital Skrabonja.

Hospitales

- El Hospital San Juan de Dios sufrió daños moderados en un 80%.
- El hospital Antonio Skrabonja (ESSALUD) con daño total (Figura 31).
 - o Grietas en su fachada en columnas en esquina.
 - o Ambientes agrietados
 - o Algunas columnas rotas por falla de piso blando.

Colegios

- La Institución Educativa N° 22471 del distrito de Túpac Amaru Inca, con población estudiantil de mil 150 alumnos del nivel primario, sería demolido por encontrarse inhabitable, por lo que se instalaron ocho aulas prefabricadas y supervisado por la autoridad educativa.

Sitios Arqueológicos

- En Pisco, tres sitios con daños, especialmente **Tambo Colorado**, con desprendimientos de adobones.
- Se rescataron cerámicas pre-incas del museo San Martín (Pisco).

PARACAS

La ciudad de Paracas es centro de atracción turística, arqueológica y donde se encuentra la bahía de Paracas.

Casas

- La zona costera urbana con daños (Figura 32) y en el área pesquera del puerto.
- Caída de parte del embarcadero.
- Derrumbes en la infraestructura hotelera del Hotel “El Libertador” en Paracas (Figura 33), quedando en ruinas este famoso recinto de turistas que visitaban la bahía.
- Daños por la inundación del tsunami en terrenos y al interior de casas.

Sitios y Museos Arqueológicos

- En la bahía de Paracas al lado del mar y dentro de la Reserva Natural de Paracas, “La Catedral” y “La Bóveda” (Figura 34), las cuales son estructuras naturales construidas por la erosión eólica, colapsó. Los vientos de Paracas y el mar demoraron siglos en formarlas y era visitada diariamente por decenas de turistas nacionales y extranjeros.
- Las Líneas de Nazca, Patrimonio Cultural de la Humanidad, no se han visto afectadas.
- El museo de sitio de Paracas perdió parte de su cerco perimétrico, cayó parte del techo (los bienes arqueológicos serán trasladados).



Figura 32.- Costa de Paracas



Figura 33.- Daños en Hotel.



Figura 34.- La Catedral.

CIUDAD DE ICA

La ciudad de Ica está a 306 Km. al sur de Lima, y se encuentra a 306 m.s.n.m. En el Departamento de Ica existen unos 2.800 monumentos arqueológicos provenientes de diversas culturas pre incaicas como La Paracas, Nazca y Wari.

El terremoto cortó electricidad, agua, teléfono y la telefonía móvil entre la capital y la zona del desastre. Los postes de las líneas eléctricas se inclinaron peligrosamente en las calles.

En Ica, los daños moderados están presentes en el **Templo de Luren, La Tinguña y el claustro de La Compañía.**

Iglesias

- Catedral de la Ciudad de Ica en la Plaza de Armas (Figura 34), edificación histórica inicialmente conformaba parte del conjunto monumental de la Compañía de Jesús (perteneció a los Jesuitas hasta 1,767 y más adelante, en 1,874 fue restaurada conservando su estilo barroco y neoclásico). La construcción original data del siglo XVIII, fue refaccionada en 1814. La iglesia tiene dos estilos, en el exterior el neoclásico representado en su portada y en el interior, el barroco del púlpito y los altares.
 - o Su fachada presentó grieta horizontal encima de puerta principal, en su frontis o remate triangular de la fachada que no llegó a caer.
 - o Caída de estatua derecha.
 - o En las torres agrietadas en su segundo cuerpo, con caída de recubrimientos.
- El Templo Santuario del Señor de Luren en la Calle Ayacucho cdra 10 (Figura 35), data del siglo XVI de estilo neoclásico, el templo presenta tres portales con arquería de ladrillo y una gran torre central puntiaguda en cuya base se apreciaba un reloj. En Ica es el patrón de la ciudad desde tiempos coloniales, donde miles de devotos se reúnen en procesión en Semana Santa y en la tercera semana de Octubre.
 - o Fue gravemente dañado y parcialmente destruido, ocasionando víctimas mortales participando en una celebración eclesial.

- Se cayeron imágenes, excepto la de la Virgen del Carmen y la del venerado Cristo.
- En la fachada del templo han caído hacia el parque las cuatro torres pequeñas.
- Su parte frontal superior o torre central fue destruida destruyendo parte de su bóveda.
- Cayó la torre principal sobre la nave del santuario, rajando también la cúpula del santuario. El techo del Coro colapsó.
- Hay desprendimiento de enchape y grietas transversales en su bóveda.
- También grietas en la clave de la bóveda.
- Se han derrumbado algunos portales que rodean el santuario, la tapia del convento.
- La imagen del Señor de Luren quedó intacta.
- Daños en el monasterio de las Carmelitas como en el convento-santuario del Cristo de Luren.
- La Iglesia San Francisco, la única abierta a la feligresía local en el cercado de Ica.
 - Varias de las imágenes se vinieron abajo y algunas se rompieron,
 - El Santísimo de color dorado, se mantuvo en pie y permaneció intacto sobre su pedestal como en tantos otros terremotos. Mide aproximadamente 80 cm.
 - Pasado el terremoto se robaron la Custodia de Cristo, según R.P. Pedro Cubillo Martínez, Párroco de la iglesia San Francisco, entre 14:30 y 15:00 horas. Sin valor monetario por que era bastante sencilla, parecía que estaba bañada en oro.
- Los daños de la Iglesia San Juan de Dios tiene especial atención para su reconstrucción.
- La parroquia de Santa María del Socorro que sufrió daños en 50%, en el momento del terremoto se celebraba la novena de la Virgen del Tránsito. Colapsó su bóveda.
- La iglesia en San José de los Molinos con colapso de techo y grietas en su fachada (Figura 36).
- La iglesia de San José, esquina Tacna y Lima con ligero daño en la parte superior de sus dos torres.



Casas

- La Municipalidad de Ica (Figura 36), tuvo desprendimiento del enchape dejando al descubierto el adobe en su escalera principal, grietas verticales en la unión de dos paredes ortogonales, en la unión con el techo y encima de ventanas, en la clave de arco al su interior y en los portales en su exterior.
- Alrededor de la laguna Huacachina (a 5 Km. de Ica) con dos inmuebles colapsados.
- La casa Víctor Villagarcía Martínez, de la época republicana sufrió daños en su estructura, siendo bagaje histórico y patrimonio cultural, está en peligro de ser derruida por el INC Ica.
- Fachadas de casas colapsaron hacia la calle con la consecuencia del derrumbe de sus techos ante la falta de columnas o vigas.
- Los poblados Tierra Prometida y la zona de Los Molinos, centenas de casas colapsaron y quedaron no habitables, dichas comunidades prácticamente han desaparecido. Similarmente en el asentamiento humano 'Los Pollitos', terreno invadido hace 7 años cerca del centro de Ica.
- Colapso de nichos en el cementerio.
- Daños y colapsos de paredes en casas de adobe en San Clemente y en Guadalupe.
- Las zonas más afectadas por los derrumbes fueron la Plaza de Armas, en la calle Bolívar (a cuatro cuadras de la Plaza) casas de adobe colapsadas y otras construcciones derruidas en la calle Lima 1ra cuadra, en las avenidas San Martín, Ayabaca, el pasaje Andahuaylas y centro de la ciudad. Daños leves en edificaciones de albañilería con daños leves (Figura 38) en la Av. Grau y calle Ayacucho.



Figura 36.- *Palacio Municipal*



Figura 37.- *UNICA.*



Figura 38.- *Ica.*

Hospitales

- El Policlínico José Matías Manzanillo colapsado.
- El hospital Regional con daños parciales, algunos daños en su estructura y un tanque colapsado.

Sitios y Museos Arqueológicos

- Se dañó el museo de Ica, como en el de Paracas (Instituto Nacional de Cultura de Ica).
- El Museo Regional de Ica tiene graves daños en sus muros perimetrales, cayeron anaqueles con objetos patrimoniales.
- En el Museo Adolfo Bermúdez Jenkins de Ica se rompieron varias vasijas, así como otras piezas arqueológicas pre incaicas.
 - o Las momias sufrieron un gran daño, no obstante a su mantenimiento científico, las momias con el tiempo se van volviendo como polvito,
 - o El movimiento sísmico hizo que se deterioraron con mucha facilidad.
- El complejo arqueológico “Cerritos” sufrió daños.
- Se estima que un 32% de los monumentos histórico-culturales de Ica esta perdido, el 23% se encuentra en estado grave, el 26% en riesgo moderado y el 19% presentan daños leves (INC).

Colegios

- Daños en el colegio San José.
- Algunos ambientes de la Universidad San Luís Gonzaga (UNICA),
 - o Agrietamientos en aulas, caída de paredes en aulas del segundo piso.

- Daños estructurales en aulas de falla de columna corta y colapso de techos y pared de adobe.
- Daños en facultades y en sus ambientes de otras ciudades cercanas.
- Una construcción de adobe de un solo piso, colapsó una pared y parte de su techo (Figura 37).
- Daños en: facultad de ingeniería química (agrietamiento en columnas), farmacia (falla de columna corta), medicina veterinaria (caída de bardas), pesquería (grietas en la base del edificio y en unión con bloque de escaleras), medicina humana (grietas diagonales en paredes).
- En toda la ciudad existen 75 instituciones educativas, con un total de 622 aulas, de las cuales 360 se dañaron, se instalaron 101 aulas prefabricadas para el retorno a clases escolares.

HUANCAVELICA

En el Departamento de Huancavelica al este de Lima, los daños fueron en las provincias de Castrovirreyna y Huaytará.

En los distritos de Ticrapo y Tantará se tuvieron afectación por el fuerte movimiento sísmico, sin reportar víctimas mortales. La ciudad de Huancavelica quedó sin electricidad.

Se reportan 650 casas afectadas o destruidas y un aproximado de 2,000 damnificados (Oficina de Consejo Regional de Defensa Civil).

Iglesias

- En Huaytará (Figura 39) daños en la iglesia:
 - En la torre derecha el campanario de un solo cuerpo, su base esta agrietada
 - Dos grietas diagonales en la clave, la cual es coronada con techo de lámina.
- En el Cercado de Huancavelica, la iglesia de San Francisco con Fisuras.

Casas

- Daños en casas de adobe en los pueblos de:
 - o Cocas, Arma, Mollepampa (casa adobe con grietas verticales), Huaytará, Santa Rosa (Figura 40) colapso de casas de adobe, techos con tejas y láminas, Tantará (casa de adobe de dos pisos con vigas de madera, agrieta pero en pie, paredes de adobe de casas colapsadas), Ticrapo (Figura 41) casa de dos pisos con agrietas de tensión, vertical en esquina y diagonales entre sus ventanas.
- En la provincia de Huancavelica:
 - o Santa Bárbara, Ascensión, San Cristóbal y Santa Ana y en el Cercado con casas con grietas y fisuras.
- En la provincia de Castrovirreyna:
 - o Cochabamba, Sinto, Esmeralda con casas derrumbadas.
 - o En Tantará (Figura 42), San Juan de Castrovirreyna, Villa de Arma, Cotas, Aurahuará, Chupamarca, de 30% a 50% casas derrumbadas.
- En Huaytará
 - o Huaytará, Córdoba: casas dañadas y colapsadas.



Carreteras

- Aurahuá y Quito, Arma, en Huancavelica, quedaron incomunicados. La ruta norte (San Juan) igualmente se destruyó.

AYACUCHO

En las provincias de Parinacochas, Páucar del Sarasara y Lucanas, (Departamento de Ayacucho) el terremoto se sintió fuerte. Se corto los servicios de luz y comunicaciones, restableciéndose el día 17 el alumbrado público.

- Tuvo daños fueron en casas y edificaciones.
- En Coracocra (3,115 m.s.n.m.) capital de la provincia de Parinacochas, en el Colegio Nacional 9 de Diciembre de dos pisos (Figuras 43, 44 y 45) con daños:
 - o El terremoto de Nazca de 1996 afectó el segundo pabellón. Con el terremoto del 2001 se dañaron más las columnas de dicho pabellón quedando prácticamente inutilizable.
 - o Con este último sismo los daños a la infraestructura se agravaron seriamente.
 - o Presenta grietas en paredes, fallas en ventanas por tipo de “columna corta”.
 - o Fisuras y grietas en paredes y en acceso a segundo piso.



Figura 43.- C. 9 de Diciembre.

Figura 44.- Coracocra.

Figura 45.- Coracocra.

HUANCAYO

En la ciudad de Huancayo, (Departamento de Junín) se sintió fuerte y recordó al fuerte terremoto de 1968.

- En el centro de Huancayo, se reportaron daños:
 - o El terremoto causó que en varios edificios públicos y privados.
 - o Se rompieran algunos vidrios rotos y ligeras rajaduras debido a la intensidad del movimiento, sin llegar a daños de consideración.

- 23 instituciones educativas resultaron afectadas en su infraestructura en sus techos y paredes.
- Daños considerables fue en la IE. 30239 de la municipalidad de San Agustín de Cajas:
 - Desprendimiento del cielo raso (Figuras 46), de un vetusto pabellón de 7 aulas y declarado en estado de emergencia.
- El IE. Alfonso Ugarte de Huari, en Huancán,
 - Se derrumbó un muro de material rústico de aprox. 30 metros, junto a baños.
 - Se deterioró una motobomba de agua y los pabellones quedaron con rajaduras leves.
- La IE. N°30012 ex 518 de Chilca,
 - Dañado desde antes del 2004,
 - Presenta serias rajaduras en las paredes y columnas.
- En la IE. N°30001 Santa Rosa de Lima de la Cooper ativa Santa Isabel, en Huancayo,
 - Originó el resquebrajamiento severo de 6 aulas, temiendo por el colapso.
- Las instituciones con mayor población escolar en Huancayo como:
 - Rosa de América, Sebastián Lorente, Santa Isabel, Politécnico, Túpac Amaru y otros también presentaron rajaduras leves.
- En otras instituciones se detectaron agrietamiento en sus techos (Figuras 47 y 48).



ANDAHUAYLAS

El terremoto fue sentido en Andahuaylas el cual pertenece al Departamento de Abancay (localizado al este entre los Departamentos de Ica y Arequipa).

Algunas instituciones educativas sufrieron rajaduras y otras colapsaron por ser de material rustico, causando la suspensión de las labores escolares. También, algunos domicilios particulares sufrieron rajaduras de consideración:

- En casas de adobe con grietas verticales (Figuras 49) en Andahuaylas.
- Grietas en sus marcos de puerta (Figura 50)
- Desprendimientos en techos (Figura 51).



CAMANÁ y CARCAVELÍ

Pertenecientes al Departamento de Arequipa, en cuya ciudad capital solo se reportaron rajaduras. En muchos casos llevan el deterioro de los sismos pasados.

- **En Camaná:**
 - o Caída que gran parte de los parapetos de varias aulas de la institución educativa 40233, en el distrito de El Cardo.



- o Otra estructura afectada fue la I.E. de niños especiales, con presentó rajaduras en paredes y columnas, a ser arregladas.
- o La I.E. 40246 del anexo de El Monte las columnas y paredes de 3 aulas fueron afectadas, al igual que toda la pared del cerco perimétrico del patio principal.

- En la Institución Inicial de Huacapuy, se pudo observar que todo el cerco perimétrico, aulas y baños fueron gravemente afectados.
- En la provincia de Caravelí daños en infraestructura:
 - Se dañaron diversas instituciones educativas (IE)
 - El 10% (60) se reportan con daños en infraestructura.
 - Fisuras en muros y resquebrajamiento de columnas.

En resumen podemos decir que:

1.- *Este terremoto causó 595 fatalidades humanas (331 en Pisco, 129 en Chincha y 114 en Ica), 318 desaparecidas (129 en Ica, 64 en Pisco y 54 en Chincha), heridos leves 19,025, heridos graves 2,771, no afectados 684,073, para una población total de 705,869, según Censo de las áreas afectadas por el Sismo del Sur, Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI).*

2.- *De aproximadamente 250 mil viviendas afectadas en los Departamentos de Ica, Lima y Huancavelica, fueron 52,154 viviendas destruidas y 23,632 muy afectadas (ambas requieren reconstrucción); y con daño leve más de 23 mil y sin daño más de 59 mil (son habitables). Los pobladores en viviendas destruidas fueron 243,489 y 76,397 en aquellas muy afectadas (INEI). Más de 11 mil casas tienen que ser derribadas. Se tuvo 103 hospitales afectados, 14 de ellos destruidos.*

3.- *Iglesias y templos, casonas coloniales, objetos de valor religioso y una serie de monumentos arqueológicos, históricos, naturales y museos de Ica y Paracas.*

4.- *Nueve carreteras se vieron afectadas por derrumbes. El puente Huamaní (ubicado en el kilómetro 228 de la carretera Panamericana Sur), impidió el tránsito de acceso o salida de la ciudad de Pisco (Ica).*

5.- *Infraestructura hidráulica y de riego afectada (pozos, bocatomas, canales, drenes) en Pisco, Ica, Chincha y Cañete (INRENA). Más del 40% de áreas de cultivo bajo riego fueron afectadas por sismo.*

6.- *El colapso de 360 aulas fueron sustituidas con 101 módulos de aulas prefabricadas en Pisco (INDECI), y 116 aulas prefabricadas en Pisco. Fueron 11 centros*

de salud derrumbados y 103 afectados, 112 colegios destruidos, y 507 colegios necesitan reparación.

CONCLUSIONES

El terremoto del 15 de agosto del 2007, causó fuertes daños frente a la costa del Departamento de Ica, así como en las regiones de los Departamentos de Lima, Ayacucho, Huancavelica, Junín, Abancay y Arequipa. Los techos y paredes de una gran cantidad de casas de adobe colapsaron, asimismo las antiguas iglesias y templos con adobe. Soportaron este terremoto sin o con daños moderados algunas casas de adobe, quincha y madera y las de albañilería siguiendo modernas normas de construcción.

Los factores que han contribuido a generar efectos desastrosos son: las condiciones locales donde se encuentran asentadas estas ciudades como es suelos blandos, por la debilidad de las paredes sin refuerzos, sin columnas, sin sobrecimientos, sin contrafuertes, hizo que ante el fuerte y prolongado movimiento sísmico colapsaran sus techos, su antigüedad, la falta de mantenimiento, no seguir las normas constructivas y la autoconstrucción, la amplificación sísmica provocada por suelos blandos cercanos a la costa (entrando en resonancia periodos de vibrar del suelo con las edificaciones), la licuefacción de suelos, y por ende la gran magnitud, la directividad y cercanía de la fuente sísmica.

Es necesaria la enseñanza de técnicas de construcción y reforzamiento a casas de adobe, seguir las modernas técnicas constructivas y realizar estudios de micro-zonificación sísmica, lo que contribuirá a salvar más vidas y el patrimonio.

AGRADECIMIENTOS

A las personas locales y al pueblo en general, particulares y de instituciones quienes publicaron sus fotos durante y después del terremoto. A las muchas páginas de Internet nacionales e internacionales (particulares y de instituciones) con gran cantidad de fotos y videos de la realidad de los daños de las ciudades cercanas al epicentro y de muchos pueblos olvidados. A todos los periódicos nacionales que dieron la nota escrita, grafica y digital en los días posteriores, a los informes de las instituciones de gobiernos a nivel local y nacional. Gracias a Todos.

INGENIERIA SISMICA

ACELERACIONES MAXIMAS REGISTRADAS EN LA CIUDAD DE LIMA: SISMO DE PISCO DEL 15 DE AGOSTO DE 2007

Isabel Bernal y Hernando Tavera
Dirección de Sismología-IGP

RESUMEN

El 15 de Agosto del 2007 (06h 40min, hora local) en la región central del Perú ocurrió un sismo de magnitud 7.0 ML con epicentro en 13.49° Sur y -76.85° Oeste; es decir, 74 km al oeste de la ciudad de Pisco. El sismo fue registrado por un total de 14 acelerómetros que operan en la ciudad de Lima y cuyos registros muestran claramente el desarrollo de un proceso complejo de ruptura formado por dos fuentes (R1 y R2) separadas por 60-65 segundos. La máxima aceleración registrada en la ciudad de Lima fue de 115.2cm/seg² en la Urb. La Rinconada del distrito La Molina ubicada en dirección NO a 155 km del epicentro del sismo. Los periodos asociados a la máxima aceleración espectral se presentan entre 0.1 a 0.4seg en RIN y MOL, ambas ubicadas en el distrito La Molina; para ANC, CSM y MAY ubicadas en los distritos de Ancón, Rímac y Ate Vitarte el rango es de 0.1-0.6seg.; para CER, ANR, PUCP y CLD-CIP ubicadas en los distritos de San Borja, Santiago de Surco, San Miguel y San Isidro, el rango es de 0.1-1.2seg. y para CAL en el Callao es de 0.1-1.6seg.

Las frecuencias/periodos predominantes tienen valores próximos a 0.1seg en los distritos de La Molina y San Miguel, de 0.2 seg en Ate Vitarte y Rimac, de 0.3seg en La Molina, Rimac, Ate Vitarte y Ancón, y de 0.5 seg en Santiago de Surco. En el distrito La Molina, las dos estaciones acelerométricas están ubicadas a distancias menores a 2 kilómetros, y presentan periodos predominantes próximos a 0.1 y 0.3 seg respectivamente, lo que implica la variación de las propiedades físicas del suelo a distancias cortas. A partir del método unidimensional, en MOL, MAY y ANC las velocidades para la onda de corte en la primera capa es de 80 m/s (con espesores menores a 2 metros), para la segunda de 200 m/s (con espesores menores a 9 metros) y para el semi-espacio de 690 m/s, valores que sugieren un suelo compacto respecto al resto de estaciones. Las estaciones de CAL y RIN presentan velocidades, para la primera capa de 60 m/s (con espesores de 11 y 3 metros respectivamente), la segunda de 140 m/s (con espesores de 12 y 7 metros) y un semi-espacio de 450 m/s. La velocidad en estas dos estaciones es baja para las capas de considerable espesor, lo que indicaría que el suelo es poco compacto.

INTRODUCCION

La ciudad de Lima, como cualquiera que se localice en la zona costera, es afectada por los sismos con origen en la principal fuente sismogénica del Perú; es decir, los debidos al proceso de convergencia y subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana. Estos sismos presentan diversas magnitudes y ocurren a niveles superficiales de profundidad. Según la historia sísmica de Lima, el sismo de mayor magnitud que causó destrucción en la ciudad de Lima y Callao ocurrió el 28 de Octubre de 1746 (8.4 M). Posteriormente, ocurrieron sismos de menor magnitud como los de 1940 (Imax=VIII MM), 1966 (Imax=VII MM), 1970 (Imax=VII MM) y 1974 (Amax=VIII MM) todos con magnitudes entre 7.0>Ms<8.0 (magnitud de ondas superficiales). Todos estos sismos produjeron tsunamis con olas que alcanzaron alturas de hasta 4 metros sin producir daños mayores. Durante estos años en Lima no se disponía de estaciones acelerométricas en número suficiente como para realizar estudios detallados del sacudimiento del suelo ante la ocurrencia de sismos; por lo

tanto, no se conocía bien las características físicas del suelo en sus diferentes distritos.

Recientemente, en la región Central del Perú el 15 de agosto del 2007 ocurre un sismo de gran magnitud (7.0 ML) que a diferencia de los anteriores se caracterizó por presentar gran duración en el registro de la fase P (aproximadamente 210 segundos) y un proceso complejo para la propagación de la energía en dirección SE, con la ocurrencia de dos rupturas (Tavera et al. 2007), siendo la segunda la que liberó mayor energía. Este sismo, a diferencia de otros ocurridos en la costa del departamento de Ica (1942 y 1996), produjo daños parciales en algunas viviendas e edificios del Callao y Lima, lo cual puede ser debido al modo heterogéneo de propagación de la energía, fuertemente influenciada por la presencia de la Dorsal de Nazca y la Península de Paracas que pudieron comportarse como una barrera que facilitaron la propagación de la energía en mayor cantidad en dirección NNO.

Para este sismo, en la ciudad de Lima se ha tenido en operatividad hasta 14 acelerómetros y sus registros son analizados en tiempo/frecuencia a fin de conocer las características físicas del terreno en términos de sus frecuencias dominantes, amplificaciones relativas, espesores y velocidades de corte para las capas superficiales.

GEOLOGIA Y GEOMORFOLOGIA

El suelo de la ciudad de Lima refleja los acontecimientos más importantes de la orogenia andina ocurridos en el pasado, además de observarse la presencia de unidades geomorfológicas como las Estribaciones de la Cordillera Occidental con una topografía abrupta y constituida principalmente por rocas intrusivas del Batolito de la Costa disectados por numerosas quebradas y por los ríos Rímac y Chillón. Además, existen lomas y colinas litológicamente formadas por rocas volcánicas que subyacen a capas sedimentarias de tipo caliza y lutitas intercaladas con derrames volcánicos eventualmente constituidas por cuerpos graníticos, tal como se observa en las cercanías de la fábrica de cemento Atocongo. Las lomas presentan un desarrollo de vegetación estacional. Asimismo, se tiene la presencia de valles y quebradas como los tramos inferiores de los ríos Rimac y Chillón que también involucran a las quebradas tributarias que permanecen secas por la escasa precipitación pluvial que no favorece a la erosión de los suelos y rocas, pero si a la acumulación de material

coluvial (escombros de talud). Finalmente, existen conos de deyección que constituyen la llanura aluvial cubierta por material de acarreo transportado por los ríos y muestran una topografía moderada con zonas planas, y localmente la presencia de algunas lomadas en forma de abanico cuyo vértice se inicia en Ate-Vitarte, además de otros presentes en el Morro Solar y en la ex-hacienda Bocanegra. Sobre esta llanura aluvial, el río ha sufrido divagaciones y cambios de cursos periódicos en diferentes épocas geológicas hasta alcanzar su actual posición, constituyendo así en su conjunto, el terreno sobre el cual se encuentra el área de Lima Metropolitana. Esta última unidad se desarrolla a lo largo de una faja limitada al oeste por la ribera litoral y al este por una cadena de cerros de baja altura pertenecientes a los primeros contrafuertes andinos con un ancho promedio de 30 km (GNLLC, 2004). Desde el punto de vista hidrológico, las cuencas bajas de los ríos Rímac y Chillón cruzan el área de estudio asentados sobre rocas de origen ígneo y sedimentario. En general, Lima metropolitana se encuentra ubicada sobre suelo sedimentario procedente de las cuencas de estos ríos con diversos grados de compactación.

INSTRUMENTACION Y DATOS

En este estudio se hace uso de los registros de aceleración obtenidos de los acelerómetros que operaron en Lima Metropolitana durante el sismo de Pisco ocurrido el 15 de Agosto del 2007 con una magnitud de 7.0 ML (Figura 1). En la ciudad de Lima operaron 14 estaciones acelerométricas que pertenecen a instituciones como el IGP, CERESIS, PUCP, CISMID y SEDAPAL, todas distribuidas en los distritos de La Molina (LMO, MOL y RIN), Santiago de Surco (ANR), San Borja (CER), San Isidro (CDL-CIP), Ate-Vitarte (MAY), Santa Anita (E1 y E2), Rímac (CSM), San Miguel (PUCP) y en los distritos de Ancón y Ñaña (ANC y NNA). En la Figura 2, sobre un mapa con la geomorfología y suelos para Lima metropolitana (Mártinez, 1975) se muestra la ubicación de estas estaciones, las mismas que en mayor número se encuentran sobre suelos de grava aluvial (CSM, PUCP, CLD-CIP, CER, E1, ANR y ANC) y areno-limoso con diferente espesor (MAY, MOL y RIN). La estación CAL se ubica sobre arcillas blandas y las estaciones E2, LMO y NNA sobre roca.

Estos acelerómetros constan de un sensor GURALP de tres componentes con una sensibilidad de hasta 0.1G. El registro de la información se realizó en formato binario con una resolución a 100 muestras/segundo. En general, la data obtenida en cada acelerómetro es transferida a una estación de trabajo para el cambio de formatos

y para la corrección instrumental y por línea base (offset) sin utilizar filtros a fin de no alterar la señal para su posterior análisis. De las estaciones indicadas, la señal registrada en LMO sólo fue posible visualizarla y las obtenidas de E1 y E2 no serán analizadas en este estudio por la peculiaridad de su sistema de registro, pero serán analizadas de manera especial en un futuro informe.

METODOLOGIA

El estudio del movimiento del terreno en términos de series de tiempo (aceleración, velocidad y desplazamiento) permite describir las características básicas del fenómeno sísmico en el punto de registro. En tal sentido, cada sismo analizado permite disponer de información importante al momento de la toma de decisiones dentro del campo de la ingeniería sísmica (Chávez M. 1993, Aguilar et. al. 1997; Boroschek et. al. 2005; Bernal y Tavera, 2006). La metodología seguida para el estudio del sismo de Pisco considera el análisis de los registros de aceleración en tiempo/frecuencia para las 14 estaciones que operan en la ciudad de Lima. Para el primero se evalúa las características de la forma de onda y para la segunda, se elabora espectros de respuesta y razones espectrales. En el análisis, se considera en los registros de aceleración la existencia de dos frentes de ruptura definidos como R1 y R2, ambos asociados al complejo proceso de ruptura que experimentó el sismo de Pisco.

En general, los espectros de respuesta son de suma utilidad para pronósticos de ingeniería sísmica por ser la base de los reglamentos de diseño sísmico al permitir establecer las fuerzas de diseño asociadas a la rigidez y resistencia del punto donde se obtiene el registro (Ordaz et al. 1989). Estos espectros representan, la historia de respuesta de una serie de osciladores de un grado de libertad con un periodo determinado y amortiguamiento del 5% y para su obtención se utiliza herramientas del SAC (Signal Analysis Code) .

Las razones espectrales, fueron obtenidas aplicando las técnicas H/V y Estándar a fin de comparar los resultados obtenidos independientemente. Ambas técnicas permiten determinar el efecto de sitio para el punto donde se ubica la estación a partir de las frecuencias predominantes y amplificaciones relativas, las mismas que son afectadas por la topografía y en gran medida por las condiciones geológicas de las primeras decenas de metros de la superficie terrestre (Nakamura, 1989; Gutiérrez y

Singh, 1991; Lermo y Chávez-García, 1994; Kono y Tanaka, 1998; Bernal y Tavera, 2007). Debe entenderse que de acuerdo a la variación de las propiedades físicas del suelo, cualquier medio al ser afectado por una onda sísmica puede causar la amplificación o de-amplificación de la misma debido a la diferente composición geológica de las capas superficiales. La técnica H/V, consiste en calcular cocientes de los espectros de Fourier entre las componentes horizontales y la vertical de un registro obtenido en una estación triaxial. A diferencia de las componentes horizontales, la componente vertical (V) contiene principalmente el efecto de la fuente y por su modo de propagarse no es afectado por los estratos más superficiales. La técnica Estándar consiste en obtener los cocientes de los espectros de Fourier entre las componentes horizontales de registros obtenidos por diferentes estaciones respecto a una estación de referencia ubicada sobre suelo firme. De los cocientes espectrales (también llamados funciones de transferencia empíricas) elaborados para las diferentes estaciones, se obtiene sus promedios para ser utilizados en este estudio. Para definir la frecuencia predominante se considera tres criterios: a) El pico de frecuencia debe encontrarse en el rango de interés que fluctúa entre 0.3 a 10 Hz (Lermo y Chávez-García -1994; Lachet y Bard, 1994), b) Si existe una banda de frecuencias, debe presentar amplificaciones relativas de al menos 5 veces (se considera la amplitud de "1" como nivel de referencia) y c) Se selecciona el pico de frecuencias mas representativo.

Finalmente, una manera simplificada de explicar los efectos de sitio es idealizando las condiciones geológicas bajo cada estación como una capa plana sobre un semi-espacio; es decir, un modelo unidimensional. El efecto de este modelado está definido por dos parámetros, una frecuencia fundamental de resonancia mas sus múltiplos, y un valor de amplificación con respecto al movimiento sísmico en roca. A fin de obtener estos modelos, se aplica la técnica unidimensional de Haskell que consiste en calcular funciones de transferencia teóricas (FTT) para medios estratificados ante la incidencia de ondas SH en la base de los estratos (Sánchez-Sesma, 1985). En estas condiciones el método asume un modelo de velocidad inicial donde el comportamiento del suelo es lineal para cualquier nivel de excitación en el cual los estratos del suelo son horizontales y se extienden lateralmente hasta el infinito; por lo tanto, no se incluyen efectos de irregularidad lateral al descansar los estratos sobre un semi-espacio homogéneo (Thomson, 1950 y Haskell, 1962). Para obtener los modelos de velocidad se correlaciona la curva promedio de los cocientes espectrales/funciones de transferencia empírica con una función de transferencia teórica. Esta última se obtiene

a partir de un proceso iterativo considerando valores iniciales de espesor de capa, velocidad y densidad de los diferentes estratos. En general, los resultados que se obtienen deben ser convalidados con estudios de geotecnia.

ANALISIS Y EVALUACION DE REGISTROS DE ACELERACION

En la Figura 2 se presenta la distribución de las estaciones de aceleración en Lima Metropolitana con sus respectivos valores máximos registrados en sus tres componentes. Estos valores se presentan en orden descendente en la Tabla 1 indicando cada distrito.

Análisis de la Señal en Tiempo

En general, en todos los registros de aceleración disponibles se observa la complejidad del proceso de ruptura del sismo de Pisco; es decir, se identifica dos grupos de ondas denominados como R1 y R2 equivalentes a dos rupturas separadas por 60-65 segundos. A diferencia de los registros de aceleración obtenidos en Ica, en los de Lima, las máximas amplitudes se presentan en R2; es decir, para la segunda ruptura (Figura 3) y esto puede ser asociado a efectos de directividad en la propagación de la energía liberada por este sismo.

Tabla 1.- Valores de aceleración máxima (*A_{max}*) registrados por las diferentes estaciones acelerométricas distribuidas en Lima Metropolitana.

Estaciones		Aceleraciones máximas cm/seg ²			
Código	Distrito	Comp V	Comp NS	Comp EO	Amax
RIN (Rinconada)	La Molina	57.7	115.0	111.0	115.0
CAL (Callao)	Callao	31.6	95.8	101.0	101.0
ANR (A. Nac. R)	S. de Surco	73.5	65.2	85.3	85.3
MOL (Molina)	La Molina	56.8	69.1	78.7	78.7
CSM (Cismid)	Rímac	32.9	45.1	73.9	73.9
PUCP (U. Católica)	San Miguel	39.69	59.58	67.03	67.0
MAY (Mayorazgo)	Ate Vitarte	31.2	59.7	55.0	59.7
CLD-CIP	San Isidro	33.05	58.8	54.1	58.8
CER (Ceresis)	San Borja	37.3	58.0	58.7	58.7
ANC (Ancón)	Ancón	27.8	54.7	58.4	58.4
E1 (Estanque-1)	Santa Anita	30.38	49.98	54.88	54.8
LMO (La Molina)	La Molina	14.2	21.2	25.3	25.3
NNA (Naña)	Naña	21.6	18.7	22.1	22.1
E2 (Estanque-2)	Santa Anita	11.76	12.74	20.58	20.6

El sismo del 15 de agosto de 2007 registró aceleraciones máximas del terreno en la ciudad de Lima del orden de 115 cm/seg² en la Urb. La Rinconada del Distrito La Molina (RIN) y de 101.9 cm/seg² en el Callao (CAL). Las estaciones ANR, CSM, PUCP y MOL presentan aceleraciones máximas que fluctúan entre 67-85 cm/seg²; en las estaciones MAY, CLD-CIP, CER, ANC y E1 las aceleraciones varían entre 54-59cm/seg² y en las estaciones LMO, E2 y NNA entre 20-25 cm/seg².

Los valores de aceleración registrados en las estaciones RIN y CAL son coherentes con el tipo de suelo, limos y arcillas blandas; a diferencia de lo observado en LMO, E2 y NNA que presentan valores mínimos por encontrarse sobre roca en las zonas mas altas de la ciudad de Lima (lomeríos).

Análisis de la Señal en Frecuencia

En la Figura 3, se presenta los espectros de respuesta elaborados para la estación RIN y NNA que registraron el máximo y mínimo valor de aceleración en la ciudad de Lima. Estos espectros de respuesta obtenidos para R1 y R2 muestran similitud en su forma, con un relativo desplazamiento en las componentes horizontales para el periodo donde se registra la máxima aceleración espectral. La distribución espacial de los espectros de respuesta obtenidos para las diferentes estaciones se muestra en la Figura 4, y en la Tabla los valores máximos de aceleración espectral con su respectivo periodo, para R1 y R2 (las estaciones están ordenadas según la Tabla 1).

En las estaciones de RIN y CAL se registraron para R2 aceleraciones espectrales máximas de 500 y 379 cm/seg² a periodos de 0.32 y 0.65 segundos respectivamente, ambos en su componente Este-Oeste; es decir, perpendicular a la dirección del epicentro del sismo. En R1 se alcanzo valores de 310 y 240 cm/seg² a periodos de 0.22 y 0.6 segundos respectivamente (en su componente Este-oeste y norte-sur); osea, desplazados hacia periodos bajos.

Las estaciones de ANR, MOL, CSM y PUCP presentan para R2 aceleraciones espectrales máximas que fluctúan entre 202-374 cm/seg² a periodos de 0.48, 0.13, 0.26 y 0.52 segundos respectivamente, todos en sus componentes Este-Oeste. Para el caso de R1, estas estaciones registraron aceleraciones máximas que alcanzan valores de 140 a 290 cm/seg² para periodos de 0.4, 0.13, 0.09 y 0.75 segundos. Estos valores difieren de los obtenidos para R2, excepto para la estación MOL.

Asimismo, en la mayoría de los casos los periodos para R1 son menores respecto a R2 y se presentan de manera aleatoria en las componentes horizontales.

En las estaciones de MAY, CLD-CIP, CER y ANC las aceleraciones espectrales para R2 alcanzaron valores que fluctúan entre 175-220 cm/seg² a periodos de 0.21, 0.21, 0.19, 0.22 segundos respectivamente, todos en sus componentes Este-Oeste y para R1, entre 140-170cm/seg² a periodos de 0.1, 0.24, 0.21 y 0.22 segundos respectivamente. Finalmente, en la estación NNA, R2 alcanzó valores de 65 cm/seg² con un periodo de 0.2 segundos y R1 de 60 cm/seg² a 0.1 segundos.

Tabla 2. Valores de aceleración espectral máximos y periodos por estación acelerométrica en Lima. R1 y R2 indican los dos grupos de ondas predominantes en los registros para los cuales se elaboró sus espectros de respuesta.

Estación	Ruptura	Aceleración Espectral (cm/seg ²)	Periodo (seg.)	Componente del Registro
RIN	R1	310	0.22	Este-oeste
	R2	500	0.32	Este-oeste
CAL	R1	240	0.6	Norte-Sur
	R2	379	0.65	Este-Oeste
ANR	R1	250	0.4	Norte-sur
	R2	350	0.48	Este-oeste
MOL	R1	290	0.13	Este-Oeste
	R2	374	0.13	Este-Oeste
CSM	R1	220	0.09	Este-Oeste
	R2	252	0.26	Este-Oeste
PUCP	R1	140	0.75	Norte-sur
	R2	202	0.52	Este-oeste
MAY	R1	140	0.1	Norte-sur
	R2	220	0.21	Este-oeste
CLD-CIP	R1	110	0.24	Norte-Sur
	R2	175	0.21	Este-Oeste
CER	R1	150	0.21	Este-oeste
	R2	200	0.19	Este-Oeste
ANC	R1	170	0.22	Este-oeste
	R2	220	0.22	Este-oeste
NNA	R1	54	0.1	Norte-sur
	R2	65	0.2	Norte-sur

De acuerdo a la Figura 4 y Tabla 2, los espectros de respuesta obtenidos para las diferentes estaciones acelerométricas muestran variación en los máximos valores de aceleración espectral y periodos, tanto para R1 y R2, donde R1 tiende a periodos mas bajos debido posiblemente a efectos de no-linealidad. Los periodos asociados a la máxima aceleración espectral para las estaciones de CSM, MAY, CLD-CIP, CER y ANC tienden a 0.2 segundos (sin considerar periodos secundarios) y para el resto de estaciones la variación es mayor, lo que indica claramente que la rigidez y la

resistencia del material en ambas estaciones es diferente. Asimismo, los periodos asociados a la máxima aceleración espectral se presentan dentro de diferentes rangos que dependen de la respuesta de los suelo sobre el cual se encuentran estas estaciones; por ejemplo, para RIN y MOL el rango es de 0.1-0.4 segundos para el distrito La Molina; para ANC, CSM, MAY el rango es de 0.1-0.6 segundos para los distritos de Ancón, Rimac y Ate Vitarte; para CER, ANR, PUCP, CLD-CIP el rango es de 0.1-1.2 segundos en los distritos de San Borja, Santiago de Surco, San Miguel y San Isidro respectivamente; para CAL el rango es de 0.1-1.6 segundos y corresponden a la provincia constitucional del Callao (La Punta).

Según las razones espectrales obtenidas con la técnica H/V y Estándar (Figura 5) existe similitud en la frecuencia predominante y para el caso de la amplitud relativa, es algo mayor utilizando la técnica estándar, por lo que para su análisis se consideró la curva promedio entre las curvas obtenidas por ambas técnicas. De estos cocientes se obtiene los resultados presentados en la Tabla 3, donde se observa que la mayor amplificación se da en la estación CAL con valores de 10 veces para la frecuencia 0.8 Hz, seguida por la estación RIN que alcanza amplificaciones de 8 veces para la frecuencia de 3.3 segundos. Las estaciones de MOL, ANR, PUCP y ANC presentan suelos que amplifican hasta 7 veces las frecuencias de 7-8, 1.9, 1.2, y 3.2 Hz respectivamente, lo que implica que las capas mas superficiales bajo cada estación presentan diferentes características físicas (espesores, velocidades y densidades que definen la compacticidad de los estratos/suelos). Asimismo, utilizando la técnica H/V en las estaciones RIN y MOL se observa un segundo pico de frecuencia predominante a 1 Hz con amplificaciones de hasta 5 veces (Figura 5). Utilizando la técnica Estándar y la información de NNA como referencia, no se observa este segundo pico probablemente por que la estación base es afectada a la misma frecuencia. Estas observaciones sugieren que los resultados obtenidos con la técnica Estándar dependen principalmente de la estación considerada como referencia.

Finalmente, las estaciones que responden a periodos predominantes próximos a 0.1 segundos se ubican en los distritos de La Molina (MOL) y San Miguel (PUCP), a 0.2 segundos en los distritos de Rimac (CSM) y Ate Vitarte (MAY), a 0.3 segundos en los distritos de La Molina (RIN), Rimac (CSM), Ate Vitarte (MAY) y Ancón (ANC) y finalmente, a 0.5 segundos en el distrito de Santiago de Surco (ANR). Para el distrito La Molina, las dos estaciones acelerométricas ubicadas a distancias menores a 2

kilómetros, presentan periodos predominantes próximos a 0.1 y 0.3 segundos respectivamente, lo que implica la variación de la calidad del suelo a distancias cortas.

A fin de asociar las frecuencias predominantes y amplitudes relativas obtenidas en este análisis con las características físicas de los estratos superficiales que subyacen a las diferentes estaciones, se hace uso del método unidimensional (Haskell). Para la aplicación de este método se utiliza un modelo inicial de velocidad que considera diferentes espesores, densidades y velocidades para la onda P/S en cada estrato ante la incidencia de un sismo y así, obtener funciones de transferencia teóricas que se superponen a la curva promedio de los cocientes espectrales y/o funciones de transferencia empírica, tal como se observa en la Figura 6. A fin de contar con un buen modelo de velocidad, es importante ajustar la función de transferencia teórica en su primer modo de resonancia a la frecuencia predominante obtenida de los cocientes (curva promedio). Estos modelos de velocidad de dos capas que subyacen a un semi-espacio, son presentados en la Figura 7 para cada punto en donde se ubica un acelerómetro. De acuerdo a estos resultados, por debajo de las estaciones de CAL y PUCP, la primera capa del subsuelo presenta espesores de 11.8 y 10 metros con velocidades de 69 m/s y 140 m/s respectivamente, siendo estas mayores respecto a otros puntos donde se ubican las demás estaciones. Estas diferencias en las velocidades, indican claramente que a pesar que tengan similares espesores, el subsuelo bajo PUCP es más compacto respecto a CAL, lo que es evidenciado por su composición geológica, la primera sobre suelo de grava aluvial y la segunda sobre arcillas blandas.

Para las estaciones ubicadas en el distrito La Molina, RIN tendría espesores de 3.0 y 6.5 metros y velocidades que fluctúan entre 60 y 148 m/s; mientras que, en MOL los espesores serían de 1.0 y 4.2 metros con velocidades de 80 y 155 m/s, lo que indica que esta última estación está ubicada sobre suelo más compacto. Las estaciones de ANC y MAY, presentan espesores próximos a 2 y 9 metros para las dos primeras capas con velocidades de 80-160 m/s, evidenciando que ambas estaciones se ubican sobre suelo con similar compacticidad, aunque estén localizadas sobre suelos constituidos de grava aluvial y arena-limo respectivamente. En la estación de ANR, la capa más influyente en el comportamiento de el suelo presenta un espesor de 25.6 metros con una velocidad de 200 m/s y esta compuesta por grava aluvial presente en esta zona.

Tabla 3. Valores de las razones espectrales y/o funciones de transferencia empíricas obtenidas para el sismo de Pisco en diferentes estaciones distribuidas en la ciudad de Lima. *F*, es la frecuencia predominante, *To* es el periodo predominante y *Ar* la amplificación relativa. Los guiones indican que no se distingue un periodo/frecuencia dominante.

Estación	F (Hz)	To (seg)	Ar
RIN	3.3	0.3	8
CAL	0.8	1.25	10
ANR	1.9	0.5	7
MOL	7-8	0.14-0.125	7
CSM	3-4	0.25-0.3	5
PUCP	1.2	0.8	6
MAY	3-4	0.25-0.3	5
CLD-CIP	--	--	--
CER	--	--	--
ANC	3.2	0.3	7
NNA	--	--	--

RESULTADOS

Debido a la ocurrencia del sismo del 15/08/2007 (7.0 ML) en Lima Metropolitana se registraron aceleraciones máximas de 115 cm/seg² en la Urb. La Rinconada del distrito La Molina (155 km del epicentro del sismo en dirección NO) y de 101.9 cm/seg² en el distrito del Callao. Ambas estaciones se ubican sobre suelos poco compactos y compuestos de limo-arena y arcillas blandas respectivamente.

Para los dos grupos de ondas (R1 y R2), en la ciudad de Lima el correspondiente a R2 presenta mayor amplitud en sus registros de aceleración; es decir, contrario a lo registrado en las estaciones de Ica (ver informe sobre aceleraciones en Ica en este mismo volumen), lo cual puede ser asociado a efectos de directividad en la propagación de las ondas sísmicas.

En los espectros de respuesta para R1 y R2, la variación en los máximos valores de aceleración espectral y periodos indican que R1 presenta valores menores y puede deberse a efectos de la no-linealidad en la respuesta del suelo ante la incidencia de sismos de diferente tamaño y azimut.

Los periodos asociados a la máxima aceleración espectral se presentan dentro de diferentes rangos dependiendo de la ubicación de las estaciones. Por ejemplo, para RIN y MOL ubicadas en el distrito La Molina, el rango es de 0.1-0.4 segundos; para ANC, CSM, MAY ubicadas en los distritos de Ancón, Rimac y Ate Vitarte el rango de 0.1-0.6 segundos; para CER, ANR, PUCP, CLD-CIP ubicadas en San Borja, Santiago de Surco, San Miguel, San Isidro respectivamente el rango de 0.1-1.2 segundos y para CAL del Callao es es 0.1-1.6 segundos.

De acuerdo a las frecuencias predominantes expresadas en periodos dominantes se observan que los valores próximos a 0.1 segundo se encuentran en los distritos de La Molina (MOL) y San Miguel (PUCP), próximos a 0.2 segundos en los distritos de Rimac (CSM) y Ate Vitarte (MAY), próximos a 0.3 segundos en los distritos de La Molina (RIN), Rimac (CSM), Ate-Vitarte (MAY) y Ancón (ANC) y finalmente, de 0.5 segundos en el distrito de Santiago de Surco (ANR). En el distrito La Molina existe dos estaciones acelerométricas ubicadas a distancias menores a 2 kilómetros y ambos presentan periodos próximos a 0.1 y 0.3 segundos respectivamente, lo que implica la variación de las propiedades del suelo a cortas distancias.

A partir del método unidimensional, se obtiene modelos de velocidad para las diferentes estaciones, observando que MOL, MAY y ANC presentan espesores próximos a 2 y 4-9 metros para las dos primeras capas con velocidades de de 80-160 m/s y para el semi-espacio velocidades de 500 a 690m/s; indicando que, bajo estas estaciones el suelo sería muy compacto respecto al resto de estaciones. Las estaciones de CAL y RIN se ubican sobre suelos cuyas capas superficiales presentan bajas velocidades (menores a 140 m/s) indicando que se encuentran sobre suelos poco compactos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al personal de Redes Geofísicas y al Sr Henry Salas, por su apoyo en la pronta disponibilidad de los datos en este estudio. Al MsC. Julio Cuenca por sus sugerencias y comentarios y a la Srta. Bilha Herrera por su apoyo gráfico. Finalmente, se agradece a CERESIS, PUCP, CISMID y SEDAPAL por proporcionarnos los registros de aceleración para el sismo de Pisco.

BIBLIOGRAFIA

- Aguilar J., Félix I., Sordo E. e Iglesias J. (1997), *Acelerogramas obtenidos en la Red Ínter universitaria de Instrumentación Sísmica*, XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Veracruz, México.
- Bernal, I. y H. Tavera (2007), *Pruebas de vibración ambiental realizadas en la localidad de Condormarca, provincia de Bolívar. Dpto. de La Libertad. Informe Técnico*, 23p.
- Bernal, I. y H. Tavera (2007), *Estimación de frecuencias predominantes y amplificaciones relativas en los terrenos del BCP-Ciudad de Trujillo. Informe presentado al BCP*, 22p.
- Bernal, I. y H. Tavera (2006), *Análisis del comportamiento estructural de la presa de Tablachaca con registros de microtemores. Informe presentado a ELECTROPERU*, 22p.
- Bernal, I. (2006), *Microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala. Tesis de Maestría. Posgrado en ciencias de la Tierra, UNAM*, 130pp.
- Boroschek, R., D. Conte, P. Soto, R. Leon (2005). *Red de Acelerógrafos, zona Norte: Registro estación Iquique, Terremoto Norte Chile, 13 de Junio de 2005 m=7.9. Informe del Departamento de Ingeniería Civil –Departamento de Geofísica*.
- Chávez M (1993), *Red acelero gráfica de la zona metropolitana de Guadalajara (RAZMG). X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, pp 294-300, Puerto Vallarta, México.
- Gutiérrez, C. y S.K. Sing (1991). *Efectos de sitio en Acapulco usando Movimientos Fuertes y Microtemores, Memorias del IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Manzanillo, Col., Ed. SMIS, Vol. I, pp. 1-1 a 1-10.
- Haskell, N. A (1962). *Crustal reflection of plane P and SV waves. J. Geoph. Res*, 67, 4751-67.
- Kono, K. y T. Tanaka (1998), *Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtemors. Bull. of the Seism. Soc. Am.*, 88, 228-241.
- Lachet, C. y Y. Bard (1994), *Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique, J. Phys. Earth.*, 42, 377-397pp.
- Nakamura, Y (1989), *A method for dynamic characteristics estimations of subsurface using microtemors on the ground surface. QR, RTRI*, 30, 25-33.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994), *"Are microtemors useful in site response evaluation?"*, *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 1350-1364 pp.
- Muria, D y A. González (1993), *"Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México", 6tas jornadas Chilenas de sismología e ingeniería antisísmica, Santiago, Chile*, 1, pp.585-594.
- Ordaz M., E. Reinoso, S. Singh, E. Vera, J.M.Jara (1989). *Espectros de respuesta en sitios del Valle de México ante temblores postulados en la brecha de Guerrero. VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, pp A-187 a 198, Acapulco, México.

Sánchez-Sesma, F. (1985). *Análisis de riesgo sísmico en Laguna Verde, Ver. Parte I. Determinación de espectros de respuesta específicos, Comisión Federal de Electricidad, 38pp.*

Tavera H, I. Bernal y H. Salas (2007). *El sismo de Pisco del 15 de Agosto, 2007 (7.9 Mw) Departamento de Ica-Perú. Informe Preliminar.*

Thomson, N.A. (1950). *Transmission of elastic waves through a stratification soil médium. J. Appl Phys, 21, 89-93pp.*

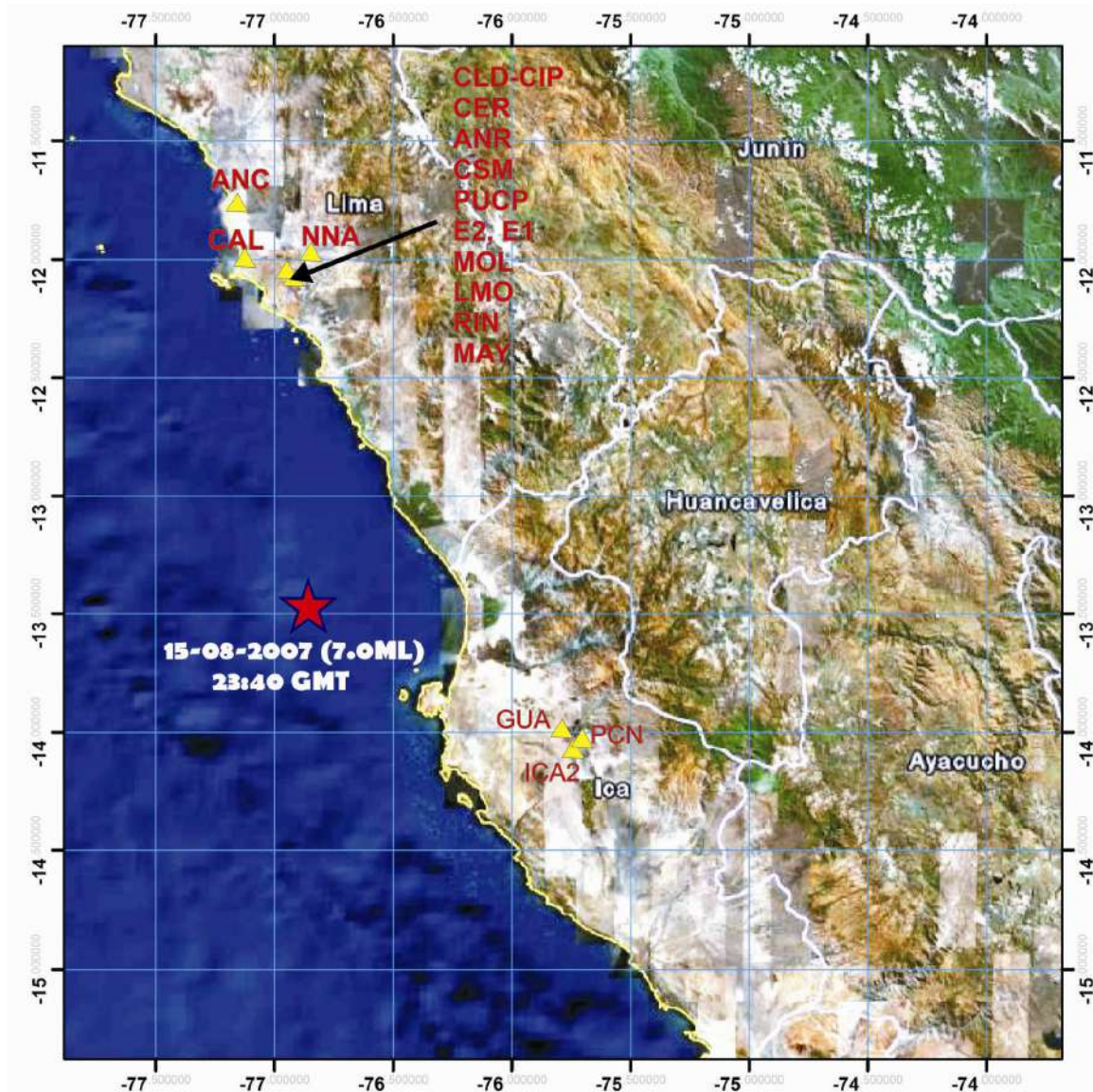


Figura 1.- Mapa con la distribución de las estaciones acelerométricas en Lima e Ica. La estrella indica el epicentro del sismo de Pisco. No se dispone de registros del sismo principal para la estación LMO.

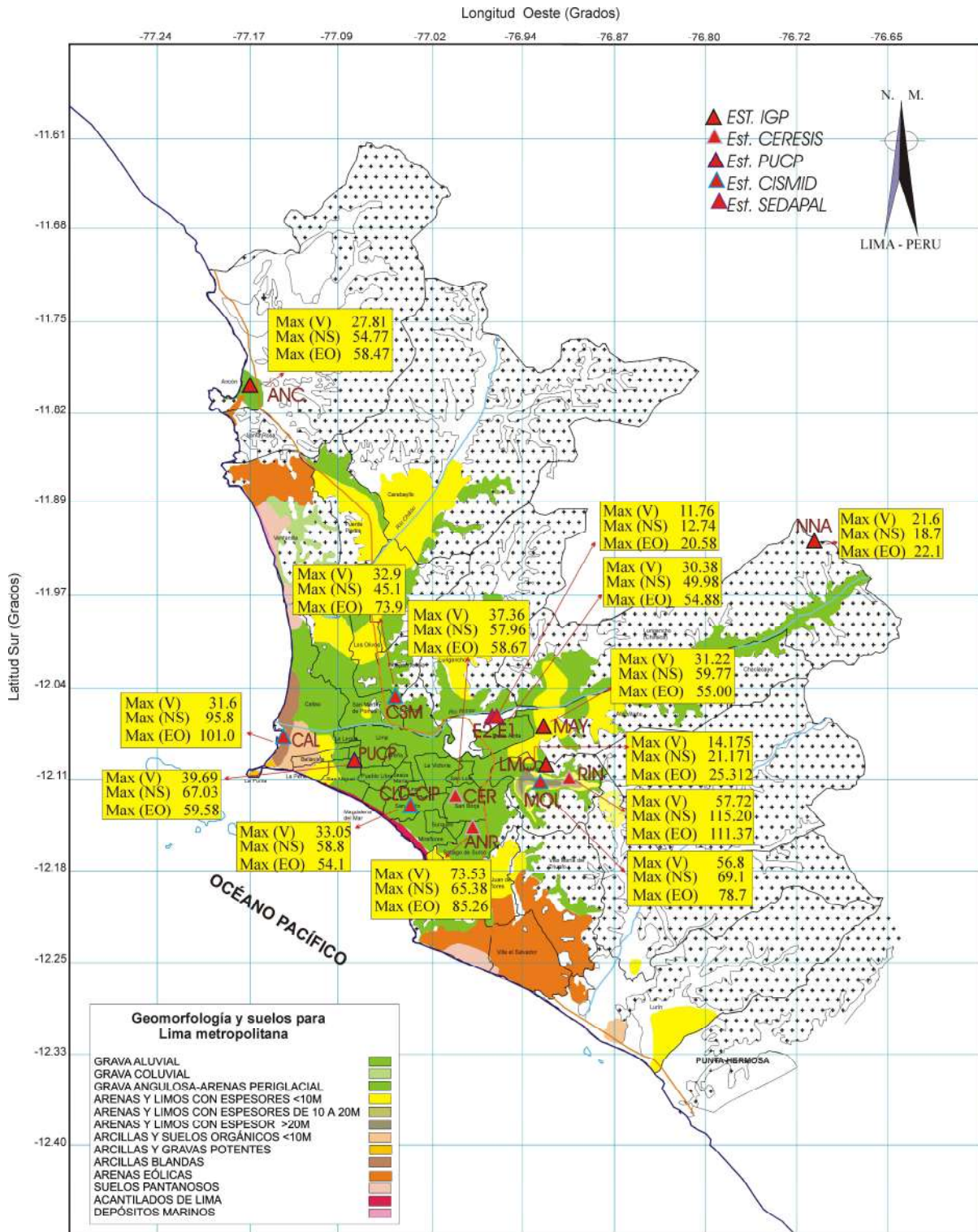


Figura 2. Mapa geomorfológico y de suelos para Lima Metropolitana según Martínez (1975) y distribución de las estaciones acelerométricas que registraron al sismo de Pisco. Para cada estación se presenta los valores máximos de aceleración en sus tres componentes.

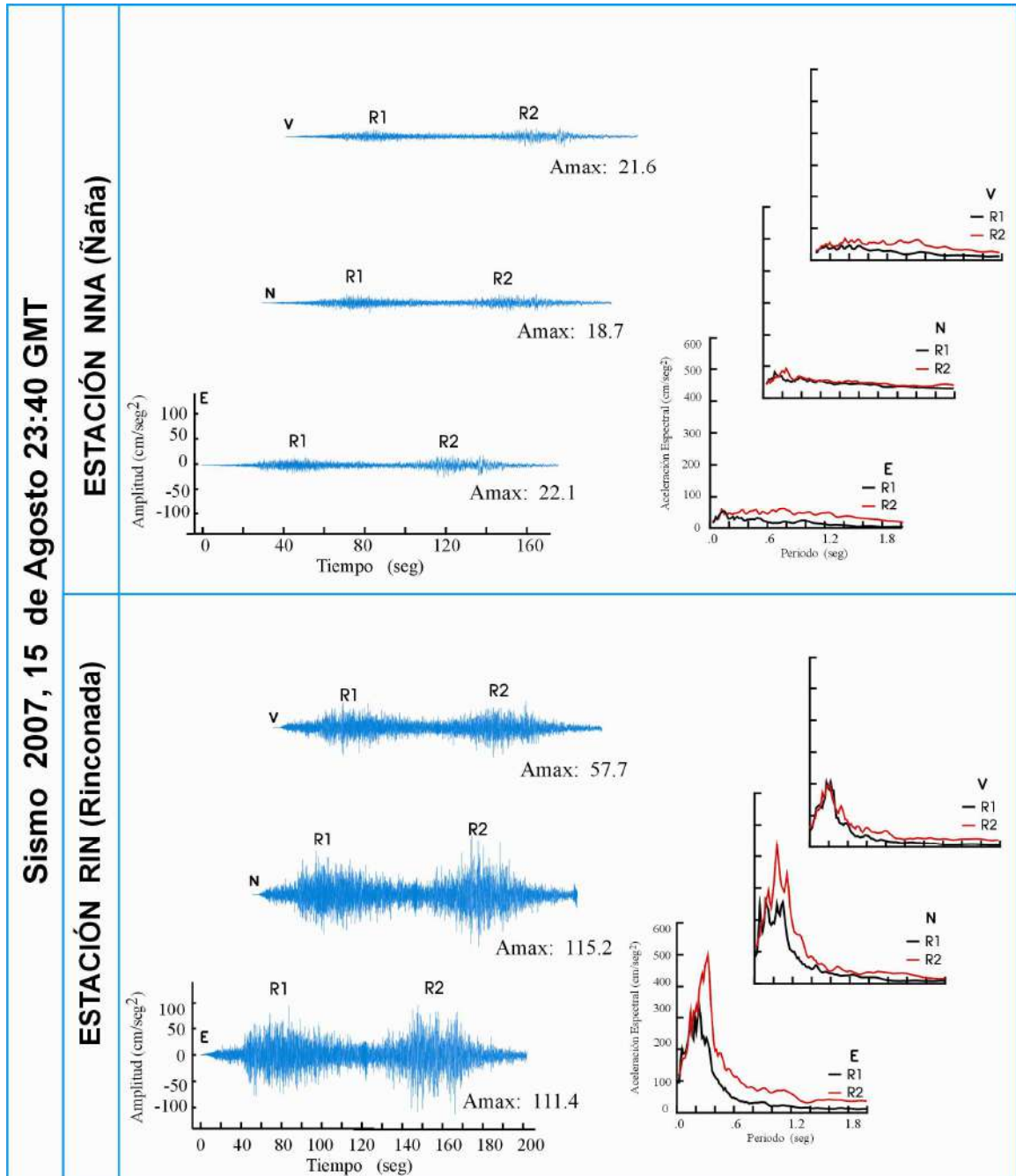


Figura 3. Registros y espectros de respuesta, obtenidos para el sismo de Pisco en las estaciones de RIN Y NNA ubicadas, en promedio, a distancias de 155 km en dirección NO. Amax, indica el valor máximo de aceleración en cada componente. R1 y R2, indican los grupos de onda considerados en este estudio. Los espectros de respuesta fueron elaborados considerando el 5% de amortiguamiento.

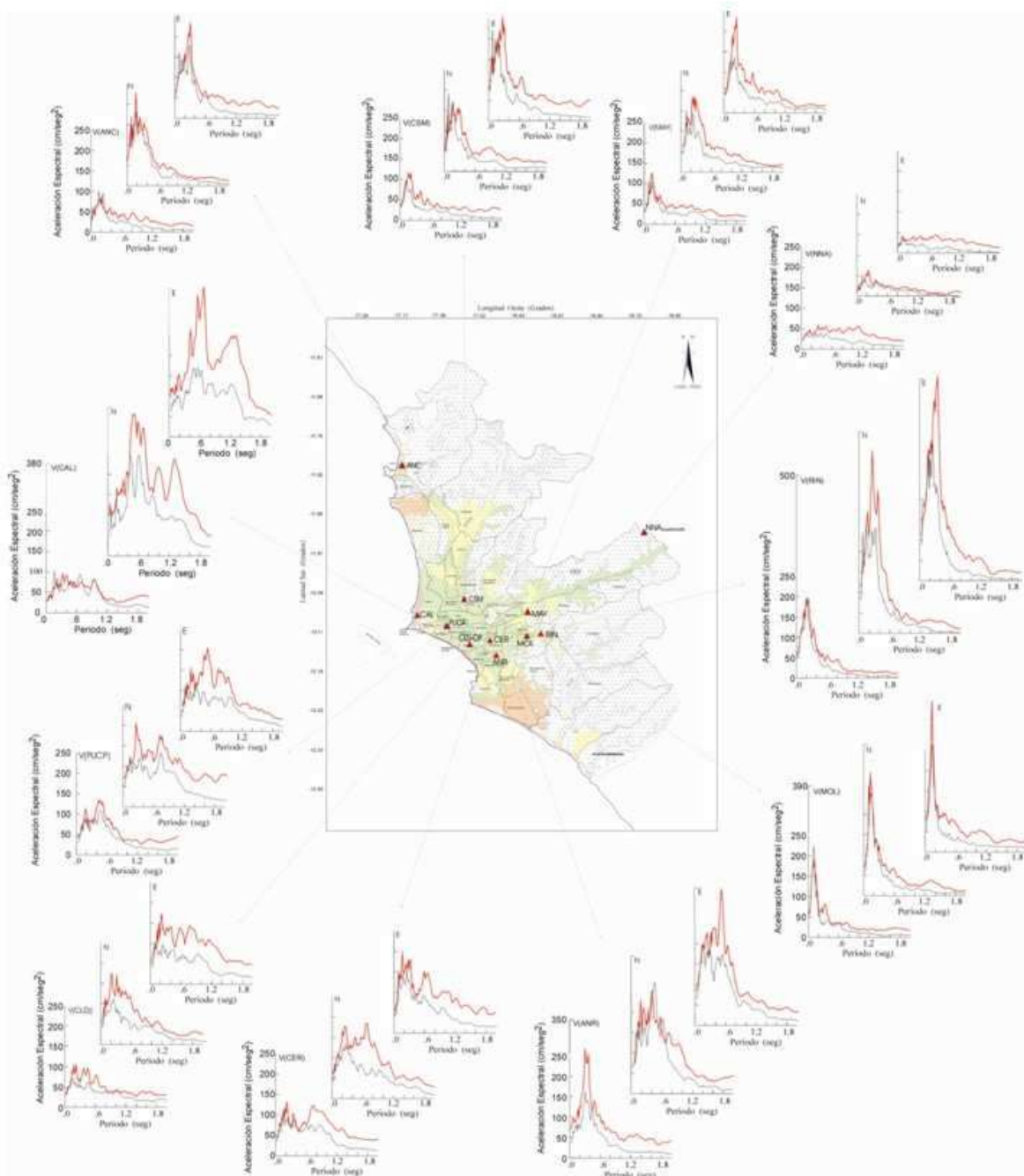


Figura 4.- Espectros de respuesta correspondiente a cada estación de registro (triángulos) distribuidas en Lima Metropolitana. Los resultados para R1 y R2, están representados por curvas de color negro y rojo respectivamente.

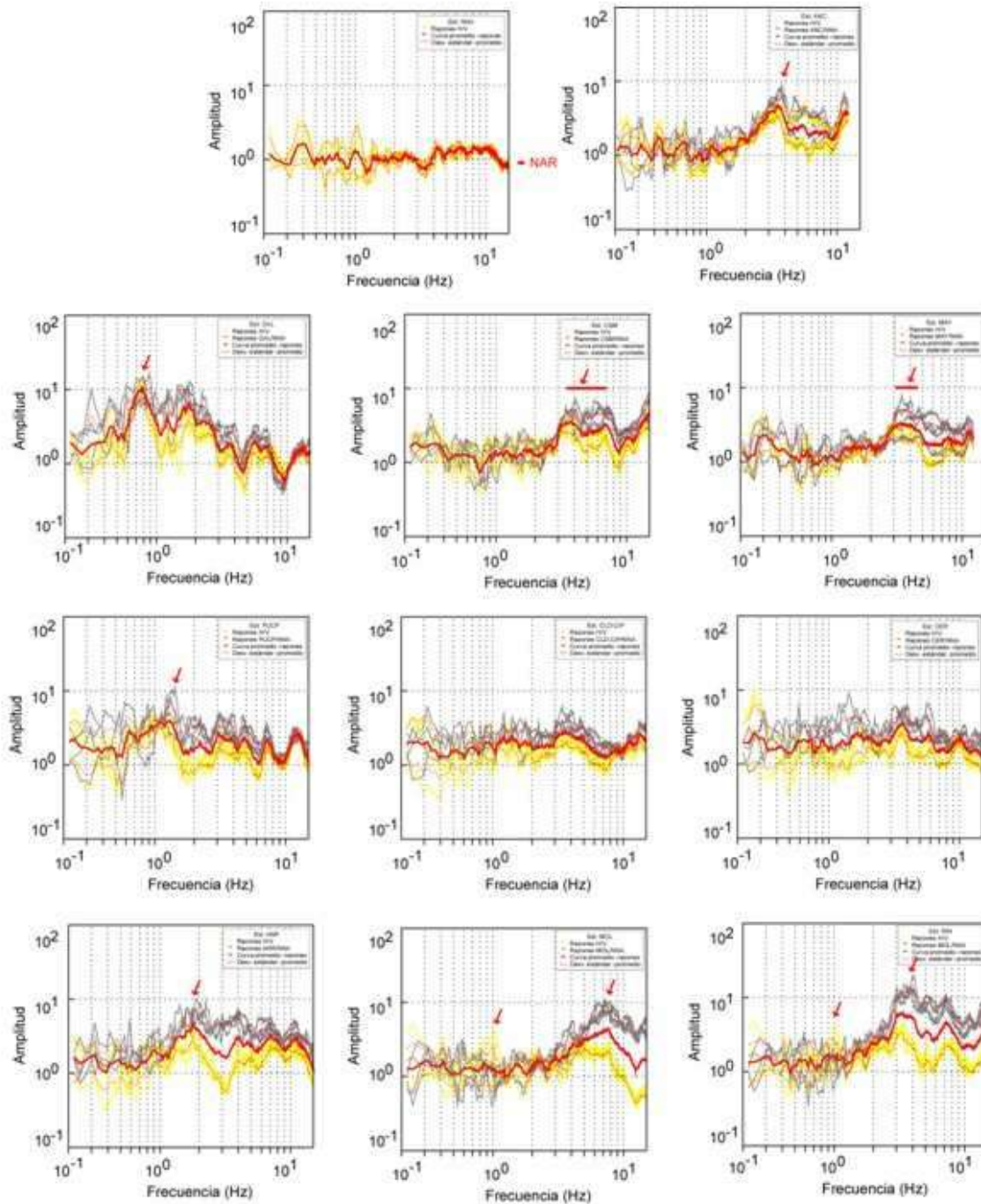


Figura 5.- Razones espectrales elaboradas para las estaciones acelerométricas distribuidas en Lima Metropolitana. Las curvas amarillas fueron obtenidas con H/V y las gris con la técnica Estándar. La línea gruesa representa el promedio de estas curvas denominadas funciones de transferencia empíricas. La flecha indica la frecuencia predominante.

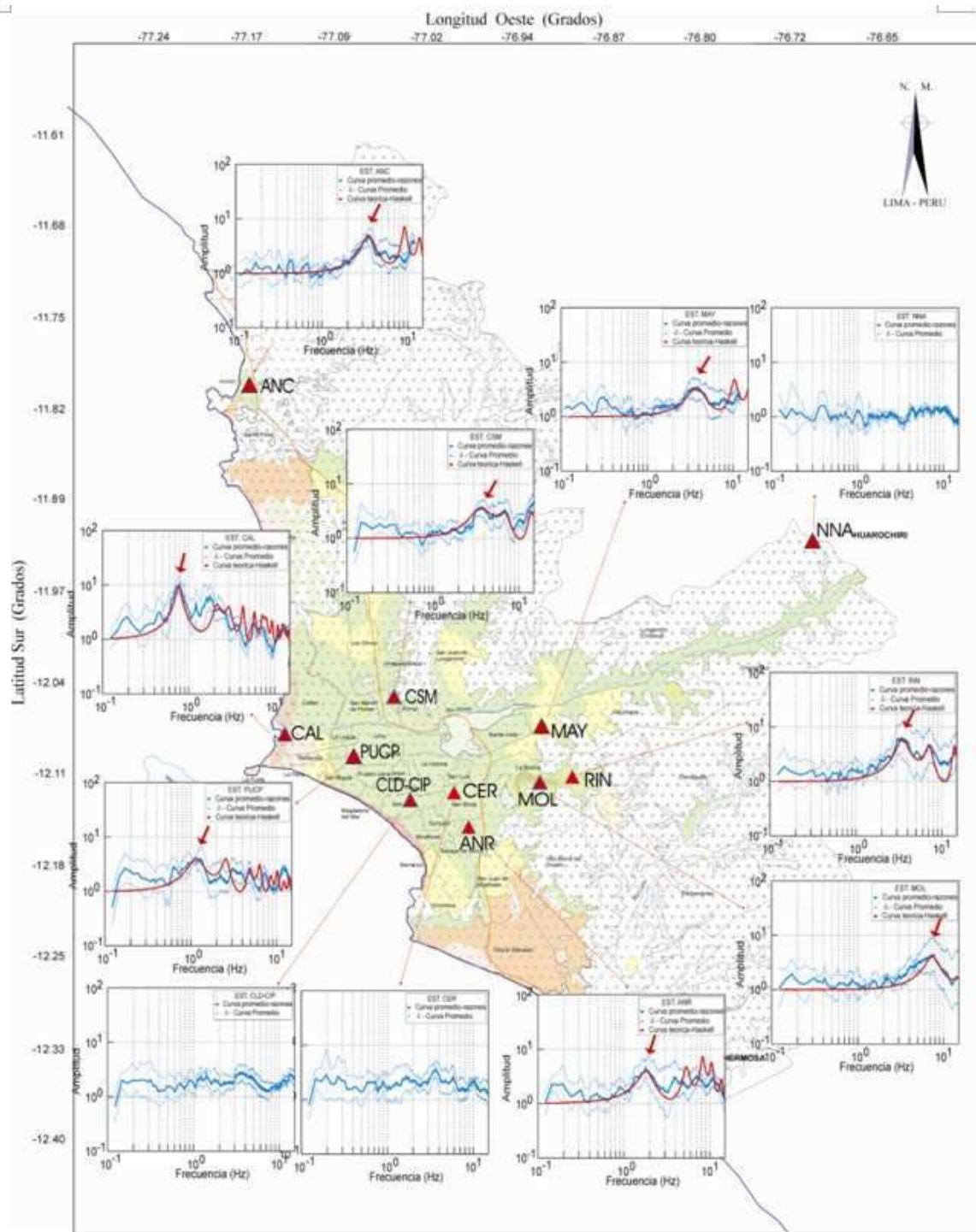


Figura 6.- Mapa de Lima metropolitana con las gráficas de razones espectrales/funciones de transferencia empíricas (línea azul, continua representa a la curva promedio y las discontinuas a su desviación estándar). Las flechas indican la frecuencia predominante en cada estación. En las gráficas la línea roja representa la función de transferencia teórica obtenida por medio del método unidimensional (Haskell).

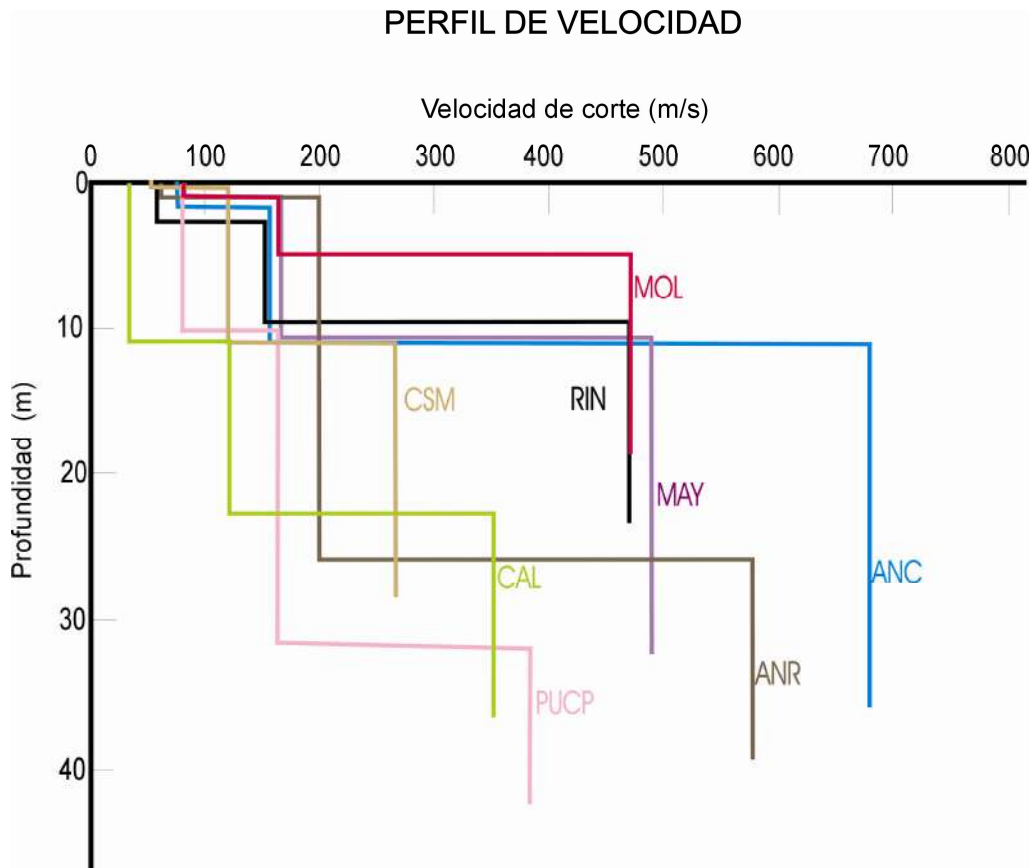


Figura 7.- Perfiles de velocidad obtenidos a partir de las funciones de transferencia empíricas (razones espectrales, técnica H/V y Estándar) y la función de transferencia teórica obtenida por medio del método unidimensional (Haskell) para los suelos sobre los cuales se ubican las estaciones acelerométricas distribuidas en Lima Metropolitana.

ACELERACIONES MAXIMAS REGISTRADAS EN LA CIUDAD DE ICA: SISMO DE PISCO DEL 15 DE AGOSTO DE 2007

Isabel Bernal y Hernando Tavera

Dirección de Sismología-IGP

RESUMEN

El 15 de agosto de 2007 (18h 40min hora local) en la región central del Perú ocurre un sismo de magnitud 7.0 ML, con epicentro en 13.49° Sur y -76.85° Oeste; es decir, 74 km al oeste de la ciudad de Pisco. El sismo alcanzó aceleraciones máximas de 488 cm/seg² en la localidad de Parcona (PCN) y por las características de sus registros ha sido posible identificar dos grupos de ondas (R1 y R2) equivalentes a dos rupturas separadas por un intervalo de aproximadamente 65 segundos. De estos grupos, el primero presenta mayor amplitud y aceleración (R1). La extensión y la severidad de los daños fueron influenciadas por la mala calidad del suelo, variando este en pocos kilómetros. Los espectros de respuesta obtenidos para R1 y R2 presentan formas similares pero con diferentes periodos de respuesta, para R2 se desplazan hacia periodos bajos. La aceleración espectral máxima se dio en PCN (1400 cm/seg²) para un periodo de 0.4 segundos, seguida de ICA2 (1200 cm/seg²) para un periodo de 0.45 segundos. La aplicación de las técnicas H/V y Estándar han permitido identificar frecuencias predominantes bajo la estación PCN de 1.8-2.5Hz (0.4-0.5 seg.), en ICA2 de 0.3-0.4Hz (2.5-3.3 seg) y 1.2-2.2Hz (0.8-0.45seg) con amplificaciones relativas de 6 a 8 veces.

INTRODUCCION

El departamento de Ica ha sido afectado frecuentemente por sismos con origen en la principal fuente sismogénica del Perú; es decir, el proceso de convergencia y subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana. Estos sismos presentaron diversas magnitudes y ocurren a niveles superficiales de profundidad ($h < 60$ km). En la historia sísmica de esta zona resaltan los ocurridos en 1942 y 1996, ambos con epicentros cercanos a la ciudad de Nazca. El primero de estos presentó una magnitud de 8.0Ms y produjo intensidades de VIII-IX (MM) en la ciudad de Nazca, siendo sentido hasta Lima y Arequipa. Los daños producidos por el sismo fueron importantes en Nazca e Ica. De manera similar, el sismo ocurrido en 1996 presentó una magnitud de 7.6Ms generando daños importantes en Nazca en donde se evaluó intensidades de VII-VIII (MM). Ambos sismos produjeron tsunamis con olas que no sobrepasaron los 3 metros de altura y solo causaron daños materiales en las localidades ubicadas cerca de la costa. Estos dos sismos representan un ejemplo del potencial sísmico de esta zona donde su proceso de deformación está fuertemente influenciado por la Dorsal de Nazca.

Recientemente, el 15 de agosto de 2007 ocurre otro sismo de gran magnitud (7.0 ML), que a diferencia de los anteriores, se caracterizó por presentar gran duración (aproximadamente 210 segundos) y la ocurrencia de dos rupturas (Tavera et al. 2007),

siendo la segunda liberó la mayor cantidad de energía, causando principalmente daños en las localidades/ciudades de Chincha, Pisco e Ica en donde se evaluaron intensidades de VII-VIII MM. A diferencia de los sismos de 1942 y de 1996, para este último se ha tenido en operatividad hasta tres acelerómetros en las localidades de Ica, Parcona y Guadalupe que registraron el sismo principal y un gran número de réplicas. En este estudio se analiza y evalúa los registros de aceleración en tiempo y frecuencia a fin de conocer las características físicas del terreno a partir de sus frecuencias dominantes, amplificaciones relativas, espesores y velocidades de las ondas de corte en las capas superficiales.

GEOLOGIA Y GEOMORFOLOGIA

El departamento de Ica, presenta tres regiones naturales fáciles de distinguir por su litología, estructuras y topografía: el flanco occidental de la Cordillera de los Andes conformada por rocas del pre-cuaternario, la baja cordillera de la costa formada por afloramientos intrusivos aislados y las tierras bajas conformadas por colinas suaves situadas entre el flanco occidental de la Cordillera Andina y la baja cordillera, denominada Llanura Pre-Andina compuesta por rocas cuaternarias que conforman la planicie aluvial costera conjuntamente con el recubrimiento eólico.

La ciudad de Ica (capital) se ubica en la parte central del departamento de Ica, y desde un punto de vista geológico, sus partes altas y bajas están conformadas por suelos sedimentarios/aluviales debido a que geomorfológicamente, la ciudad esta ubicada dentro de una cuenca sedimentaria, siendo el principal afluente el río Ica que cruza a la ciudad de norte a sur.

INSTRUMENTACION Y DATOS

En este estudio se hace uso de los registros de aceleración obtenidos de las estaciones acelerométricas de PCN (Parcona), ICA2 (Ica) y GUA (Guadalupe) cuya ubicación se presenta en la Figura 1. De estas estaciones, la de ICA2 se encuentra ubicada en el extremo sur de la ciudad sobre suelo limo-arenoso; mientras que, PCN se encuentra sobre una capa superficial de relleno conformada por arena limosa y la estación GUA sobre suelo gravoso. Estas dos últimas estaciones se ubican a alturas de 502 y 575 msnm respectivamente; mientras que, ICA2 a 409 msnm.

Los acelerómetros que operan en los puntos de registro tienen sensores de marca GURALP de tres componentes y sensibilidades de hasta 1G. El registro de la información se realiza en formato binario a 100 muestras/segundo. La data obtenida en cada acelerómetro es transferida a una estación de trabajo para el cambio de formatos, corrección instrumental y por línea base (offset) sin la utilización de ningún tipo de filtro a fin de no alterar la señal para su análisis. El sismo de Pisco fue registrado únicamente por las estaciones de PCN e ICA2 debido a que GUA presento fallas instrumentales. Para complementar el análisis se utiliza las réplicas registradas en GUA y PCN.

METODOLOGIA

El estudio del movimiento del terreno en términos de series de tiempo/frecuencia de aceleración, velocidad y desplazamiento permiten describir las características básicas del fenómeno sísmico en el punto de registro. En tal sentido, cada sismo analizado permite disponer de información importante al momento de la toma de decisiones dentro del campo de la ingeniería sísmica (Chávez M. 1993, Aguilar et. Al. 1997; Boroschek, et. al. 2005; Bernal y Tavera, 2006).

La metodología seguida en este estudio considera el análisis de los registros de aceleración del terremoto de Pisco y réplicas en términos de series de tiempo y frecuencias para los registros obtenidos en PCN, ICA2 y GUA. Para el primero se evalúa las características de la forma de onda y para la segunda, se elabora espectros de respuesta y razones espectrales. En ambos análisis, se considera la existencia en los registros de aceleración de dos frentes de ruptura definidos por Tavera et. al. (2007) como R1 y R2 asociados al complejo proceso de ruptura que experimentó el sismo de Pisco.

Los espectros de respuesta son de suma utilidad para pronósticos de ingeniería sísmica por ser la base de los reglamentos de diseño sísmico al permitir establecer las fuerzas de diseño asociadas a la rigidez y resistencia del punto donde se obtiene el registro (Ordaz et al. 1989). Estos espectros representan, la historia de respuesta de una serie de osciladores de un grado de libertad con un periodo determinado y amortiguamiento del 5% y para su obtención se utiliza herramientas del SAC (Signal Analysis Code) .

Las razones espectrales, fueron obtenidas aplicando las técnicas H/V, a fin de determinar el efecto de sitio para el punto donde se ubica la estación a partir de las frecuencias predominantes y amplificaciones relativas, las mismas que son afectadas por las condiciones geológicas, topografía y en gran medida de las primeras decenas de metros de la superficie terrestre (Nakamura, 1989; Gutiérrez y Sing, 1991; Lermo y Chávez-García, 1994; Kono y Tanaka, 1998; Bernal y Tavera, 2007). Debe entenderse que de acuerdo a la variación de las propiedades físicas del suelo, cualquier medio al ser afectado por una onda sísmica puede causar la amplificación o de-amplificación de la misma debido a la diferente composición geológica de las capas superficiales. Esta técnica (H/V), consiste en obtener cocientes de los espectros de Fourier entre las componentes horizontales y la vertical de un registro obtenido en una estación triaxial. A diferencia de las componentes horizontales, la componente vertical (V) contiene principalmente el efecto de la fuente y por su modo de propagarse no es afectado por los estratos más superficiales. De los cocientes espectrales (también llamados funciones de transferencia empíricas) elaborados para las diferentes estaciones se retiene sus promedios para ser utilizados en este estudio. Para definir la frecuencia dominante se considera tres criterios, a) la frecuencia predominante se encuentra dentro de un rango de 0.3 a 10 Hz (Lermo y Chávez-García -1994 a,b; Lachet and Bard, 1994), b) identificar una banda de frecuencias que presente amplificaciones relativas de al menos 5 veces (se considera la amplitud de "1" como nivel de referencia) y por último, se selecciona el pico de frecuencias más representativo.

Finalmente, una manera simplificada de explicar los efectos de sitio es idealizando las condiciones geológicas bajo cada estación como una capa plana sobre un semi-espacio; es decir, un modelo unidimensional. El efecto de este modelado está definido por dos parámetros, una frecuencia fundamental de resonancia y sus múltiplos, y un valor de amplificación con respecto al movimiento sísmico en roca. A fin de obtener estos modelos, se aplica la técnica unidimensional de Haskell que consiste en calcular funciones de transferencia teóricas (FTT) para medios estratificados ante la incidencia de ondas SH en la base de los estratos (Sánchez-Sesma, 1985). En estas condiciones el método asume un modelo de velocidad inicial donde el comportamiento del suelo es lineal para cualquier nivel de excitación en el cual los estratos del suelo son horizontales y se extienden lateralmente hasta el infinito; por lo tanto, no se incluyen efectos de irregularidad lateral al descansar los estratos sobre un semi-espacio homogéneo (Thomson, 1950 y Haskell, 1962). Para obtener los modelos de velocidad se correlaciona la curva promedio de los cocientes espectrales/funciones

empíricas con una función de transferencia teórica. Esta última se obtiene a partir de un proceso iterativo considerando valores iniciales de espesor de capa, velocidad, densidad de los diferentes estratos. Los resultados obtenidos deben ser convalidados con estudios de geotecnia.

ANALISIS Y EVALUACION DE REGISTROS DE ACELERACION

De acuerdo a la Figura 1, las estaciones PCN, ICA2 y GUA se encuentran separadas por distancias medias del orden de 4 a 7 km. De estas estaciones, la de PCN e ICA2 registraron el sismo principal y los valores máximos de aceleración se presentan en la Tabla 1 y Figura 1. A fin de complementar la información, también se presenta las aceleraciones máximas registradas en PCN y GUA para tres de sus mas importantes réplicas.

Análisis de la señal en Tiempo

El sismo del 15 de agosto de 2007 registró aceleraciones máximas del terreno de 488 cm/seg^2 en la estación PCN (estación Parcona) en su componente Este-Oeste equivalente a 0.5 G; mientras que, la aceleración de ICA2 registro aceleraciones de 334.1 cm/seg^2 en su componente Norte-Sur equivalente a 0.34 G. Ambas estaciones se encuentran aproximadamente a 138 km de distancia del epicentro del sismo en dirección SE. De las tres réplicas consideradas en este estudio, la ocurrida el día 16 de Agosto a horas 05:16 (GMT), con una magnitud de 6.3 ML registro las mas altas aceleraciones con valores de 43.2 cm/seg^2 en la estación de PCN y de 23.2 cm/seg^2 en la estación de GUA. En estas condiciones la diferencia en los valores de aceleración puede ser asociada a la existencia de efectos de amplificación en la estación PCN, por ubicarse en una zona de relleno sedimentario. En las Figuras 2 y 3, se compara los registros del sismo principal con las réplicas y se observa la complejidad del proceso de ruptura del primero describiendo la presencia de dos frentes de ruptura denominados como R1 y R2. Según el registro para el sismo principal la mayor energía fue liberada en el frente de ondas R1.

Tabla 1.- Valores de aceleración máxima (*Amax*) registrados por las diferentes estaciones acelerométricas distribuidas en Ica.

Fecha Hora GMT	Magnitud	Estación	Aceleraciones máximas cm/seg ²			
			Comp. V	Comp. NS	Comp. EO	Amax
15/08/07 23:40 (Sismo principal)	7.0	PCN	301.0	455.0	488.0	488.0
		ICA2	192.2	334.1	272.2	334.1
16/08/2007 01:02	5.9	PCN	16.4	31.6	35.6	35.6
		GUA	8.85	11.4	12.6	12.6
16/08/2007 05:16	6.3	PCN	35.3	41.6	43.2	43.2
		GUA	13.2	23.0	23.2	23.2
16/08/2007 11:35	6.0	PCN	10.0	9.64	12.9	12.9
		GUA	5.15	8.08	7.84	8.08
<i>Estaciones IGP: PCN, Parcona; GUA, Guadalupe Estación CISMID: ICA2</i>						

Análisis de la Señal en Frecuencias

Según los espectros de respuesta, en la estación de PCN el sismo principal presenta valores de aceleración máxima espectral para R1 de 1400 cm/seg² para un periodo de 0.4 segundos (componente EO) y para R2, de 600 cm/seg² para un periodo de 0.2 segundos (componente Vertical). En este caso, existe similitud en la forma de los espectros de R1 y R2, siendo sus diferencias en el periodo de respuesta ya que R2 tiende a responder a más bajos periodos. En la estación ICA2 (Ica) los espectros de respuesta presentan características similares a las observadas en PCN, con aceleraciones espectrales máximas de 1200 cm/seg² para R1 para un periodo de 0.45 segundos (componente NS) y para R2, del orden de 700 cm/seg² para un periodo de 0.35 segundos (componente NS). Los espectros de respuesta obtenidos para las tres réplicas analizadas en este estudio, presentan características similares (Figura 3), siendo la diferencia solo en sus amplitudes, que en el caso de la réplica de mayor magnitud (Tabla 1), PCN alcanza aceleraciones espectrales máximas de 160 cm/seg² para un periodo de 0.19 segundos en su componente EO, y en la estación de GUA de hasta 100 cm/seg² para un periodo de 0.2 segundos. En general, se observa que las estaciones de PCN y GUA, respondieron a periodos que fluctúan entre 0.1-0.5 segundos.

Las razones espectrales utilizando la técnica H/V ha permitido obtener para el sismo principal frecuencias predominantes entre 1.8-2.5Hz con amplificaciones de hasta 7 veces para la estación PCN y entre 0.3-0.4 Hz y 1.2-2.2 Hz, con amplificaciones de hasta 8 y 6 veces para la estación ICA2. Para las réplicas, en la estación PCN se observó frecuencias predominantes a 1.8-2.5 con amplificaciones de

hasta 6 veces; mientras que, en la estación GUA no se observó una frecuencia predominante clara lo que implicaría que esta estación está ubicada sobre suelo más compacto respecto a las otras. En el caso de la estación de PCN, el sismo principal y las réplicas presentan los mismos rangos para las frecuencias dominantes y amplificaciones relativas.

A fin de asociar las frecuencias predominantes y amplitudes relativas obtenidas en este estudio con las características físicas de los estratos superficiales que subyacen a las diferentes estaciones, se hace uso del método unidimensional (Haskell). Para la aplicación del método se utiliza un modelo inicial de velocidad que considera los espesores de las diferentes capas, densidades, velocidades para la onda P y S en los diferentes estratos ante la incidencia de un sismo, para obtener funciones de transferencia teóricas que se superponen a la curva promedio de los cocientes espectrales/funciones de transferencia empírica, tal como se observa en la Figura 4. Es importante ajustar esta función de transferencia teórica en su primer modo de resonancia a la frecuencia predominante obtenida de los cocientes a fin de contar con un buen modelo. Los modelos de velocidad resultantes para PCN e ICA2 son presentados en la Figura 5 como perfiles de velocidad. De acuerdo a estos resultados, por debajo de las estaciones de PCN e ICA2 existe un modelo de 2 capas (Figura 5a y 5b) con espesores de 2 y 16 metros para el primero, y de 55 y 25 metros para el segundo, con velocidades que fluctúan entre 80 y 154 metros/segundo. Según las funciones de transferencia empírica, en ICA2 se observó la presencia de una segunda frecuencia predominante, lo cual hace necesario proponer un segundo modelo de velocidad con dos capas que tendrían espesores de 9 y 21 metros con velocidades de corte de 100 y 250 metros/segundo (Figura 5c), siendo estas relativamente mayores a las obtenidas para PCN.

RESULTADOS

Debido a la ocurrencia del sismo del 15 de Agosto del 2007 (7.0ML), en la estación PCN (Parcona-Ica) se registró aceleraciones máximas de 488 cm/seg² en su componente EO y de 334.1cm/seg² en la estación ICA2 en su componente Norte-Sur, ambas estaciones se encuentran ubicadas a 138 km de distancia epicentro-estación en dirección SE. De acuerdo a la complejidad del proceso de ruptura del sismo principal destacan dos frentes de ruptura denominados como R1 y R2, ambos

claramente identificables en los registros de aceleración utilizados en este estudio, sobresaliendo R1 por presentar mayores amplitudes.

Según los espectros de respuesta, la máxima aceleración espectral en la estación PCN corresponde al grupo de ondas R1 con valores de 1400cm/seg^2 para un periodo de 0.4 segundos y para R2 del orden de 600cm/seg^2 para un periodo de 0.2 segundos. En general, para el sismo principal y réplicas, en las estaciones de ICA2, PCN y GUA el medio respondió a periodos que fluctúan entre 0.1-0.5 segundos. Según los espectros de respuesta, para el sismo principal existe similitud en la forma de los espectros de R1 y R2, siendo la diferencia para el periodo en donde se observa la amplitud máxima espectral, mayor para R1.

Según los cocientes espectrales, en la estación de PCN sobresalen las frecuencias de 1.8-2.5 Hz (0.4-0.5 segundo) con amplificaciones de hasta 7 veces, en ICA2 entre 0.3-0.4 Hz (2.5-3.3 segundos) y 1.2-2.2 Hz (0.45-0.83 segundos) con amplificaciones de hasta 8 y 6 veces respectivamente. En GUA no se observa la presencia de frecuencias predominantes, lo que implicaría que la estación se ubica sobre suelo más compacto respecto a las otras estaciones. Los resultados obtenidos en este estudio sugieren que en la estación PCN podría haberse producido efectos de resonancia; es decir, durante el sismo la estación respondió a periodos de 0.4 y 0.2 segundos, y el modo fundamental de vibración del suelo responde a frecuencias de 1.8-2.5 Hz que equivale a periodos predominantes de 0.4-0.5 segundos, coincidiendo ambos a 0.4 segundos. Este efecto pudo haber causado daños estructurales en edificaciones cuyos periodos oscilen en este rango.

A partir del método unidimensional, se obtiene perfiles de velocidad para las estaciones de PCN e ICA2. Para la primera la capa que influye en la respuesta del suelo tendría un espesor de 16 metros y para la segunda, dos capas de 55 y 25 metros con velocidades que fluctúan entre 80 y 154 metros/segundo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al personal de Redes Geofísica y al Sr Henry Salas, por su apoyo en la pronta disponibilidad de los datos en este estudio y a la Srta. Bilha Herrera por su apoyo gráfico. Finalmente se agradece al CISMID por proporcionarnos el registro de la estación ICA2.

BIBLIOGRAFIA

- Aguilar J., Félix I., Sordo E. e Iglesias J. (1997), *Acelerogramas obtenidos en la Red Inter universitaria de Instrumentación Sísmica, XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Veracruz, México.
- Bernal, I. y H. Tavera (2007), *pruebas de vibración ambiental realizadas en la localidad de Condormarca, provincia de Bolívar. Dpto. de la Libertad. Informe Técnico, 23p.*
- Bernal, I. y H. Tavera (2007), *Estimación de frecuencias predominantes y amplificaciones relativas en los terrenos del BCP-Ciudad de Trujillo. Informe presentado al BCP, 22p.*
- Bernal, I. y H. Tavera (2006), *Análisis de los acelerogramas obtenidos de la estación TUNEL (acelerómetro GURALP-0.1G) durante el periodo de enero a junio, 2006. ELECTROPERU, 44p.*
- Bernal, I. y H. Tavera (2006), *Análisis del comportamiento estructural de la presa de Tablachaca con registros de microtemores. Informe presentado a ELECTROPERU, 22p.*
- Bernal, I. (2006), *Microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala. Tesis de Maestría. Posgrado en ciencias de la Tierra, UNAM, 130pp.*
- Boroschek, R., D. Conte, P. Soto, R. Leon (2005). *Red de Acelerógrafos, zona Norte: Registro estación Iquique, Terremoto Norte Chile, 13 de Junio de 2005 m=7.9. Informe del Departamento de Ingeniería Civil –Departamento de Geofísica.*
- Chávez M (1993), *Red accelero gráfica de la zona metropolitana de Guadalajara (RAZMG). X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, pp 294-300, Puerto Vallarta, México.*
- Gutiérrez, C. y S.K. Sing (1991). *Efectos de sitio en Acapulco usando Movimientos Fuertes y Microtemores, Memorias del IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Manzanillo, Col., Ed. SMIS, Vol. I, pp. 1-1 a 1-10.*
- Haskell, N. A (1962). *Crustal reflection of plane P and SV waves. J. Geophysics Res, 67, 4751-67.*
- Kono, K. y T. Tanaka (1998), *Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtemores. Bull. of the Seism. Soc. Am., 88, 228-241.*
- Nakamura, Y (1989), *A method for dynamic characteristics estimations of subsurface using microtemores on the ground surface. QR, RTRI, 30, 25-33.*
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994), *“Are microtemores useful in site response evaluation?”, Bull. Seism. Soc. Am. 84, 1350-1364 pp.*
- Muria, D y A. González (1993), *“Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México”, 6tas jornadas Chilenas de sismología e ingeniería antisísmica, Santiago, Chile, 1, pp.585-594.*

Ordaz M., E. Reinoso, S. Singh, E. Vera, J.M.Jara (1989). Espectros de respuesta en sitios del Valle de México ante temblores postulados en la brecha de Guerrero. VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, pp A-187 a 198, Acapulco, México.

Tavera H, I. Bernal y H. Salas (2007). El sismo de Pisco del 15 de Agosto, 2007 (7.9 Mw) Departamento de Ica-Perú. Informe Preliminar.

Thomson, N.A. (1950). Transmisión of elastic waves through a stratified soil médium. J. Appl Phys, 21, 89-93pp.

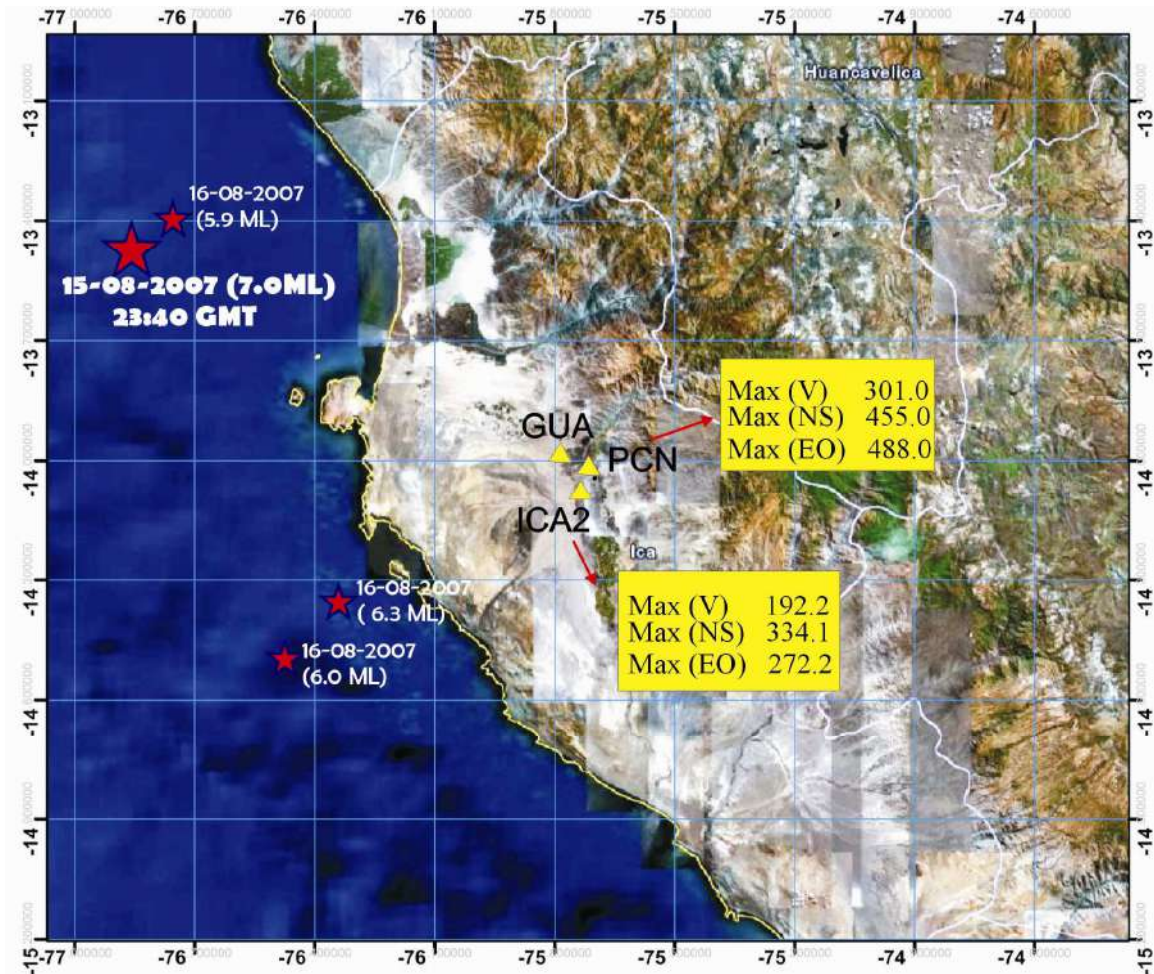


Figura 1.- Mapa con la distribución de las estaciones acelerométricas de Parcona (PCN), Guadalupe (GUA) y ICA2 con sus respectivos valores de aceleración máxima en sus tres componentes registrados para el sismo de Pisco. La estrella indica el epicentro del sismo de Pisco y las pequeñas, las tres réplicas utilizadas en este estudio. No se dispone de registros del sismo principal en la estación GUA.

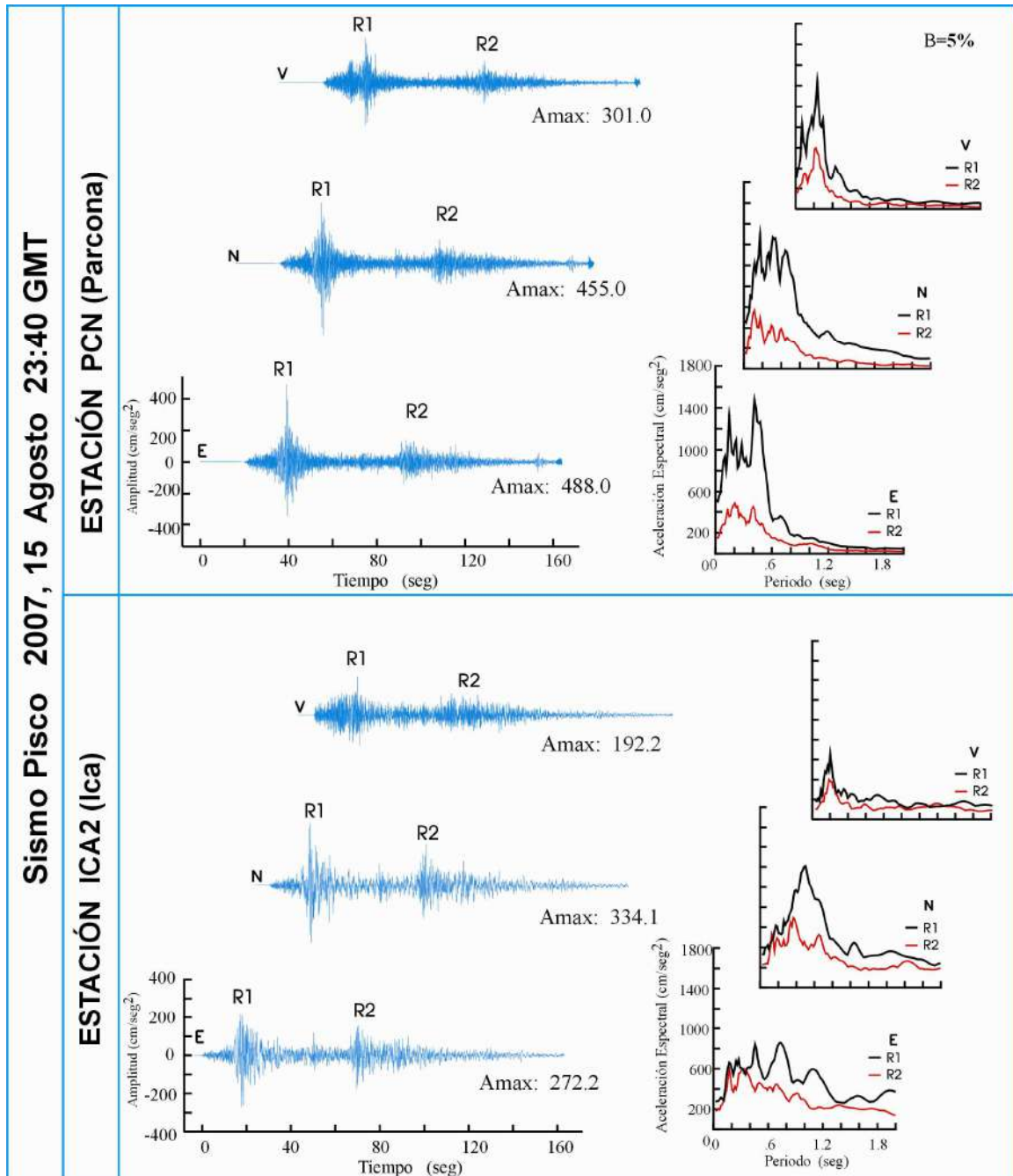


Figura 2.- Registros y espectros de respuesta obtenidos para el sismo de Pisco en las estaciones de PCN e ICA2 ubicadas en dirección SE a 138 km de distancia epicentro-estación. Amax, indica el máximo valor de aceleración en cada componente, R1 y R2, indican los dos grupos de onda considerados en este estudio. Los espectros de respuesta fueron construidos considerando el 5% de amortiguamiento.

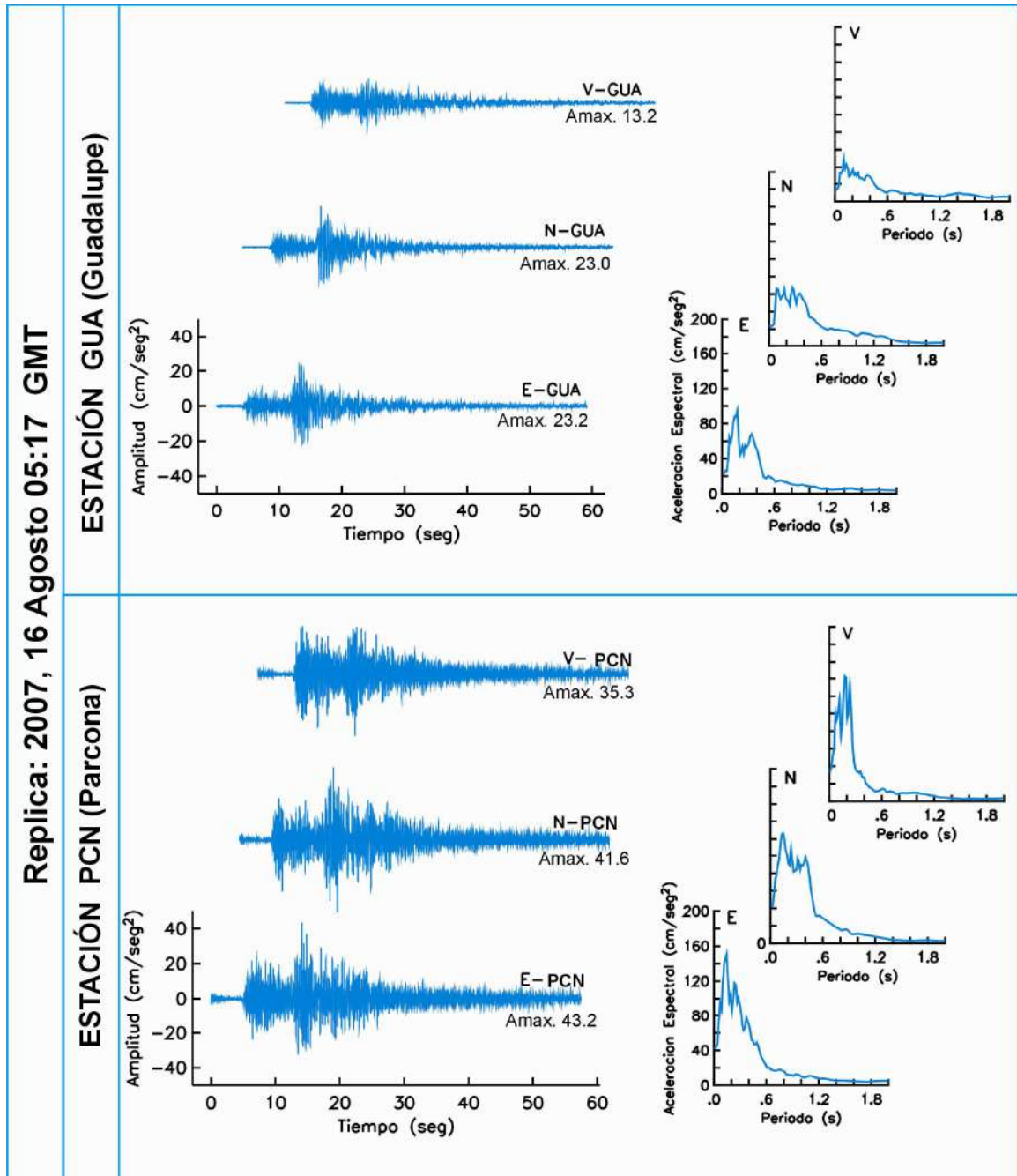


Figura 3.- Registros y espectros de respuesta obtenidos en las estaciones de PCN y GUA para la réplica de mayor magnitud (6.3 ML) del sismo de Pisco. La distancia entre ambas estaciones es menos de 6 km. Amax, indica el máximo valor de aceleración en cada componente. Los espectros de respuesta fueron construidos considerando el 5% de amortiguamiento

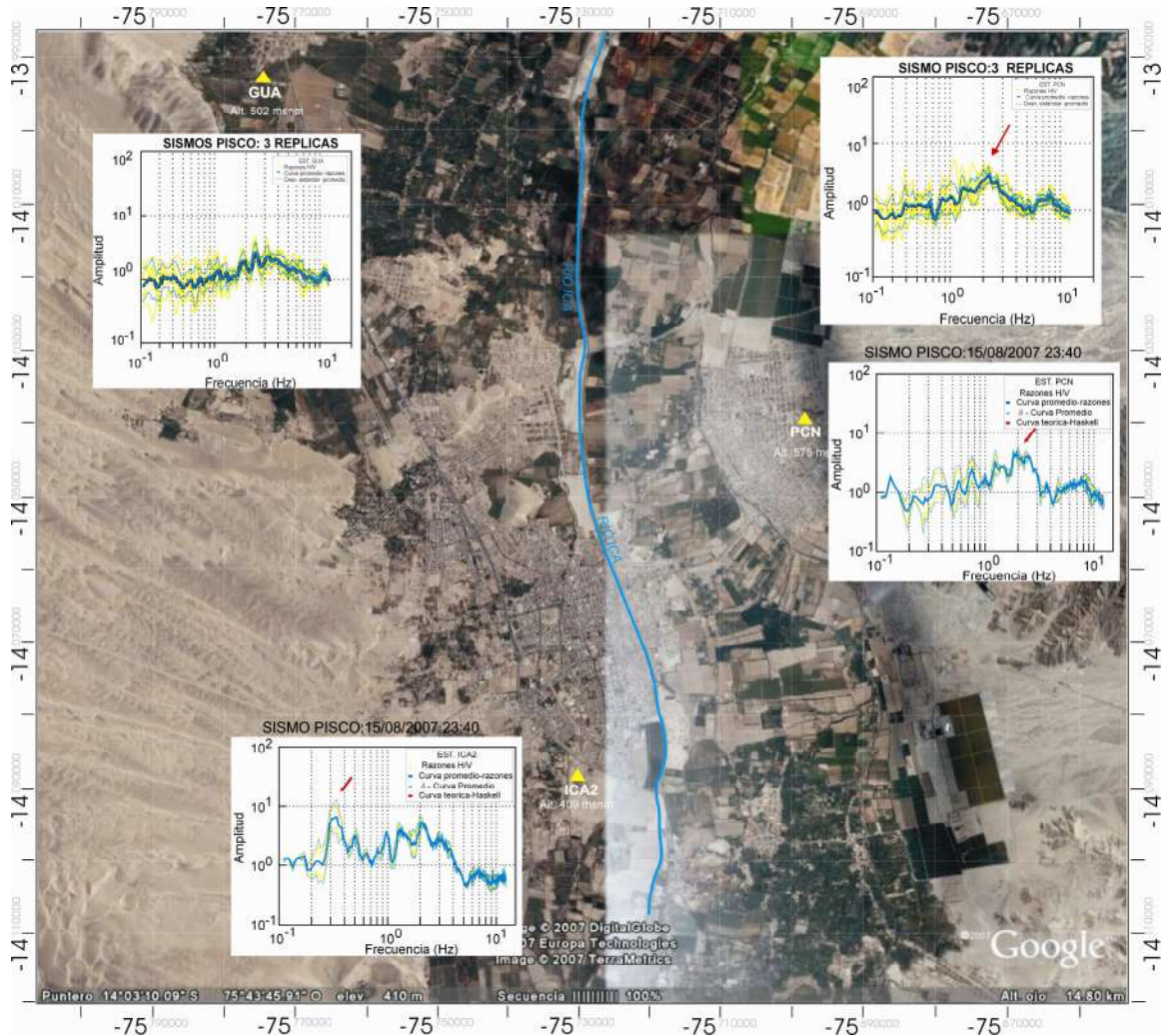


Figura 4.- Razones espectrales elaboradas para el sismo de Pisco y tres de sus réplicas a partir de los registros de las estaciones PCN, ICA2 y GUA. La línea gruesa representa el promedio de las razones H/V y la flecha indica la frecuencia predominante en cada estación.

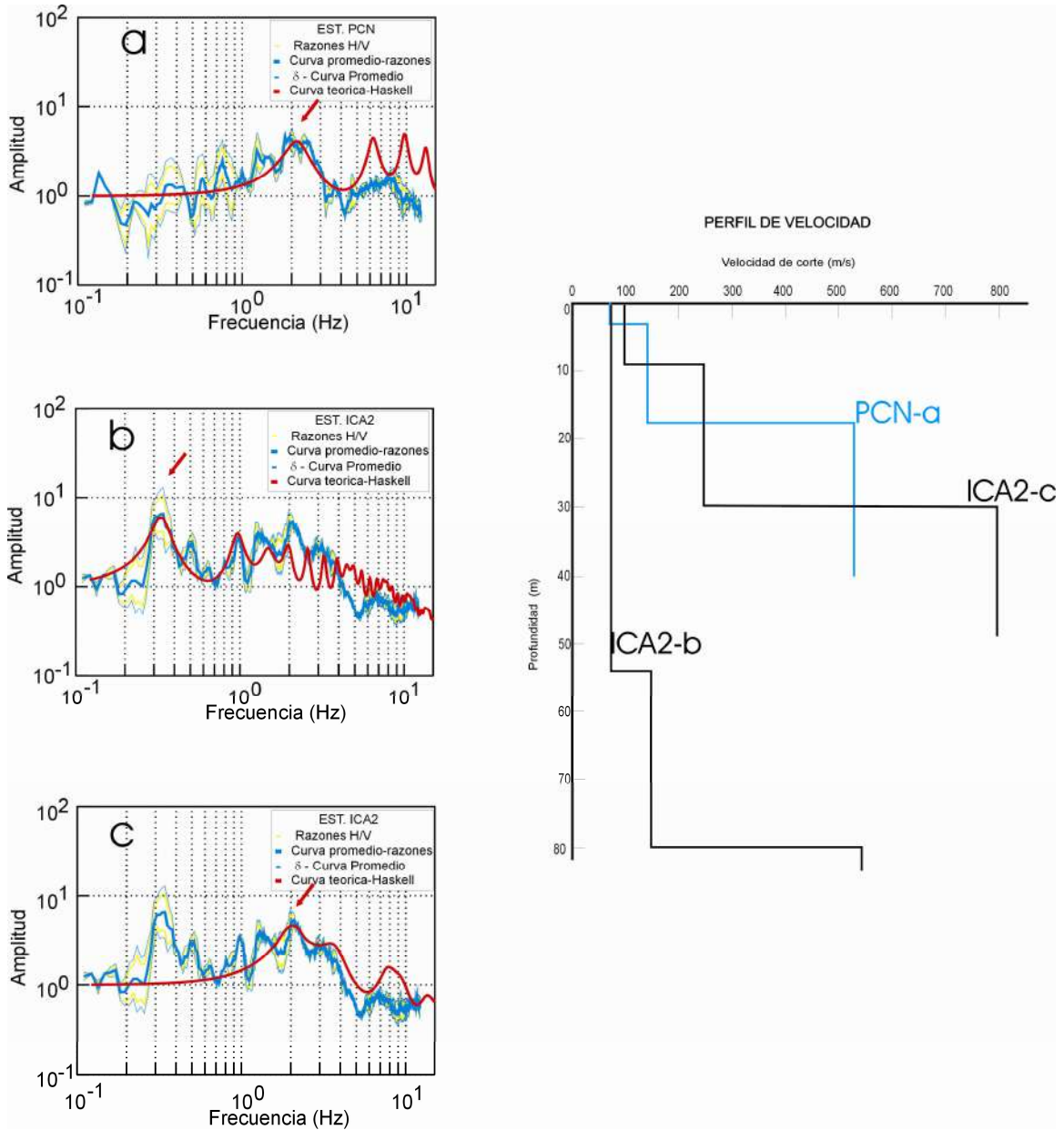


Figura 5.- Razones espectrales H/V elaboradas para las estaciones de PCN e ICA2 a partir del registro del sismo de Pisco. La línea gruesa representa la curva promedio. Las flechas indican la frecuencia predominante en cada estación. Asimismo, la línea roja suavizada representa la función de transferencia teórica obtenida por medio del método unidimensional (Haskell). En el extremo derecho se muestran los perfiles de velocidad obtenidos para PCN e ICA2.

DEFECTOS QUE INCIDIERON EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS CONSTRUCCIONES DE ALBAÑILERÍA EN EL SISMO DE PISCO DEL 15-08-2007

Ángel San Bartolomé
Pontificia Universidad Católica del Perú

RESUMEN

El objetivo de este artículo es indicar los errores cometidos en las construcciones de albañilería, debido a los cuales se produjeron daños catalogados desde leves hasta estados de colapso total, cuando estas edificaciones fueron sometidas a la acción del sismo de Pisco ($M_s = 7.0$, $M_w = 8.0$), ocurrido el 15 de agosto del 2007.

INTRODUCCIÓN

A las 6:40 p.m. (hora local) del 15 de agosto del 2007, se produjo un terremoto de magnitud de momento $M_w = 8.0$, cuyo epicentro se localizó a 50 km al oeste de Chincha Alta (150 km al sur este de Lima y 110 km al nor-oeste de Ica, Figura1), con un foco a 39 km de profundidad. La información numérica indicada en este párrafo proviene de la Referencia 1.



Figura 1.- Epicentro y ciudades afectadas. Ref. 1.

Este sismo produjo daños desde leves hasta severos en diversos tipos de estructuras localizadas en los departamentos de Ica, Lima y Huancavelica. En este artículo se describe tan solo los daños producidos en las edificaciones de albañilería, tratándose de poner énfasis en los errores cometidos con la finalidad de aprender de esta lección dejada por el terremoto.

CALIFICACIÓN DEL SISMO DESDE EL PUNTO DE VISTA ESTRUCTURAL

Desde el punto de vista estructural interesa la aceleración en el lugar de la obra, para ello, en la Norma Sísmica E.030 (Referencia 3) se especifica una aceleración máxima de 0.4g, asociada al sismo “severo” de diseño para la zona de suelo duro en la costa (Z3) y se proporcionan factores de amplificación (S) por efectos locales del suelo de cimentación.

El sismo de Pisco fue captado por 15 instrumentos (Referencia 2), 14 de los cuales estuvieron ubicados en la provincia de Lima, y el restante en Parcona a 122 km al sur este del epicentro. Este sismo se caracterizó por tener dos frentes de ruptura (R1 y R2 en la Figura 2) de la placa tectónica.

En la estación de la Universidad Católica (PUCP), ubicada sobre terreno duro, se captó una aceleración horizontal máxima de 0.07g en la ruptura R2, que correspondió aproximadamente al promedio de las 14 estaciones limeñas, con lo cual, para la provincia de Lima, el sismo puede ser calificado como “leve” en comparación con el sismo severo de la Norma Sísmica E.030.

En la estación de Parcona, ubicada sobre un suelo sedimentario, se registró una aceleración máxima de 0.5g para la ruptura R1, disminuyendo sustancialmente para la ruptura R2, lo que resulta discutible ya que en las 14 estaciones limeñas, la máxima aceleración se alcanzó para la ruptura R2. Cabe anotar que cualquier impacto cercano al instrumento, por ejemplo, el colapso de alguna edificación, puede afectar la lectura del acelerómetro.

Otros indicios de que en la zona afectada (Chincha, Pisco, etc.) el sismo debe haber adquirido la categoría de “moderado”, la dan las pistas y postes que fueron afectados sólo en la zona de los humedales, y las estructuras prácticamente inestables que no sufrieron ningún daño (Figura 3). Es decir, los daños ocurridos en las estructuras se debieron a: 1) la baja calidad del suelo donde estaban ubicadas, 2) cimentaciones no adecuadas, 3) la calidad de los materiales empleados, 4) técnicas constructivas inadecuadas, y, 5) deficiencias en la estructuración y en el diseño.

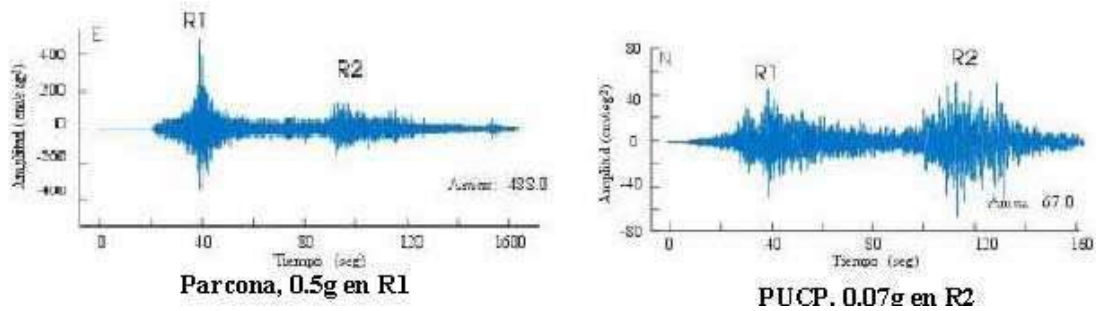


Figura 2.- Acelerogramas de la Referencia 2.



Fig.3
Indicios de que en Pisco el sismo fue de categoría “moderado” para suelo duro.

LICUACIÓN EN EL HUMEDAL DE TAMBO DE MORA (Chincha Baja)

El error más serio fue el de construir y permitir estas construcciones en un terreno de alto riesgo sísmico, como es el de arena suelta con napa freática elevada existente en una cierta zona de Tambo de Mora. El sismo originó la licuación del terreno, generándose asentamientos diferenciales y grandes hundimientos de las viviendas (Fig.4). Al respecto, el autor de este artículo propuso al alcalde de Tambo de Mora convertir la zona licuada en un museo que sirva de ejemplo a la humanidad entera, para que este error nunca más vuelva a repetirse.

Cabe indicar que el colegio Tambo de Mora (Figura 5) queda en un lugar muy cercano a la zona licuada, pero sobre un suelo estable. Este colegio presentó algunas fisuras finas en sus muros de albañilería. La arquitectura de este colegio de tres pisos data de la década de los 90 y es muy similar a la de otros colegios que sufrieron

fuertes daños ante los terremotos de Nazca-1996 y Arequipa-2001, por lo que se desprende que las aceleraciones en la zona de suelo estable, deben haber sido las correspondientes a un sismo moderado.



Figura 4.- Licuación en el humedal de Tambo de Mora.



Figura 5.- Colegio Tambo de Mora

Problemas de licuación del suelo arenoso también se presentaron en zonas cercanas a Lima, donde la aceleración máxima en suelo duro fue 0.07g (estación PUCP), como en Puerto Viejo (Figura 6). De esta manera, al esperarse sismos con aceleraciones 6 veces mayores (0.4g, Referencia 3), es urgente revisar la posibilidad de reubicar a las edificaciones existentes en los pantanos de Villa, donde también hubo indicios de licuación.



Figura 6.- Puerto Viejo.

CIMENTACIONES

Las estructuras de albañilería y las compuestas por muros de concreto armado son muy frágiles, basta una distorsión angular de $1/800$ como para que se fracturen, por tanto, en suelos de baja calidad como el de la zona central de Pisco (arcilla arenosa con napa freática a 1.5m de profundidad, Referencia 4), debió emplearse cimentaciones rígidas de concreto armado. Un caso lo da el comportamiento elástico de un pabellón nuevo del hospital de Pisco (Figura 7), donde se observó vigas de cimentación, mientras que los pabellones antiguos quedaron inutilizados.



Figura 7.- Pabellón nuevo y antiguo del hospital de Pisco.

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

En Pisco, Chincha e Ica, se utilizan ladrillos artesanales de arcilla, pandereta y bloques de concreto vacíos para la construcción de los muros portantes en edificios de hasta 5 pisos. De acuerdo a la Norma E.070 (Referencia 5), estas unidades de albañilería están prohibidas de emplear porque se trituran (Figura 8) perdiéndose drásticamente la resistencia y rigidez de los muros (Referencia 6).

De acuerdo a la Referencia 5, los ladrillos artesanales de arcilla pueden emplearse para la construcción de viviendas de hasta 2 pisos, y cualquiera de las unidades mencionadas puede ser utilizada para una mayor cantidad de pisos, siempre y cuando el ingeniero estructural demuestre que el comportamiento de todos los muros será elástico (sin ninguna fisura) ante la acción del sismo severo, lo cual podría lograrse mediante la adición de algunos muros de concreto armado.



Figura 8.a.- *Uso de unidades inadecuadas en edificios de Pisco e Ica.*



Figura 8.b.- *Ladrillo pandereta en Pisco.*

TÉCNICA CONSTRUCTIVA

La técnica de construcción que se utiliza en Pisco es híbrida entre la albañilería confinada y los sistemas aporticados con tabiques de relleno. En primer lugar construyen las columnas, para después levantar la albañilería y finalmente vaciar la

losa de techo en conjunto con las vigas, por lo cual, los muros son portantes de carga vertical, pero se encuentran desintegrados de las columnas (como si existiese una junta vertical lisa y a ras entre ambos materiales).

Este tipo de construcción no es permitida por la Norma E.070 (Referencia 5), donde se especifica que para que un muro sea confinado, la albañilería debe construirse en primer lugar para después vaciar el concreto de las columnas, permitiéndose una conexión dentada o a ras, pero, agregando mechas de anclaje. La técnica usada en Pisco no permite arriostrar verticalmente a la albañilería ante acciones sísmicas transversales a su plano, por ello, después del sismo se notó numerosos casos donde la albañilería se volcó, especialmente en los pisos altos (Figura 9), donde las aceleraciones son máximas y la carga de gravedad es pequeña. De este modo, es necesario amarrar la albañilería a las columnas, por ejemplo, mediante mallas electrosoldadas (Referencia 6).



Figura 9.- Volcamiento de muros con junta a ras con las columnas. Inadecuadamente las columnas fueron construidas primero y después se levantó la albañilería. Pisco.

ARQUITECTURA

Templos carentes de refuerzo como el de Hagia Sofía (532 d.C.) en Turquía basan su buen comportamiento sísmico en su disposición arquitectónica, pero cuando

esta no es correcta, las edificaciones moderna reforzadas pueden incluso llegar a colapsar ante los terremotos.

Piso Blando y Torsión. El problema de piso blando se produce cuando hay un cambio muy brusco de rigidez entre los pisos consecutivos. Por ejemplo, en la dirección corta del edificio de la Figura 10, los muros del primer piso fueron discontinuados para transformar el primer piso en cochera, quedando en la dirección corta sólo los muros del perímetro, hechos con ladrillos de baja calidad, y un gran muro longitudinal que no aporta resistencia en la dirección corta, sino más bien genera torsión en planta. Al fallar los muros de la dirección corta, se formó el problema de piso blando, volcándose el edificio.



Figura 10.- Piso blando y torsión.

Falta de Densidad de Muros. En la Norma E.070 (Referencia 5) se obliga a que los edificios tengan por lo menos una densidad mínima de muros en cada dirección, y a verificar que la resistencia que aportan estos muros, sea por lo menos igual a la fuerza cortante que imprime el sismo severo en el piso en análisis. A simple vista, el edificio de la Figura 11, construido con ladrillos de baja calidad, no debe haber cumplido en su dirección corta con la disposición reglamentaria.



Figura 11.- Edificio construido con ladrillos de baja calidad.

Tabiques en Voladizos de Fachadas. Para ganar espacio en los pisos superiores, se recurre a voladizos en las fachadas de los edificios, cerrando el ambiente con tabiques de ladrillo pandereta. La conexión dentada entre los tabiques transversales es insuficiente como para soportar las acciones sísmicas perpendiculares al plano y terminan volcándose (Figura 12), pudiendo aniquilar a las personas que escapan por el primer piso. Estos tabiques deben arriostrarse, por ejemplo, usando mallas electrosoldadas (Referencia 6).



Figura 12.- Tabiques sobre voladizos en Pisco y Chincha.

Ampliaciones. Las ampliaciones de las edificaciones hechas sin ningún criterio técnico, tuvieron muchos problemas en la zona afectada. Por ejemplo, en Pisco se construyeron segundos pisos sobre un primer piso hecho de adobe, empleándose pórticos que incluso estaban fuera del plano de los muros de adobe; el estado en que quedaron estas edificaciones después del sismo aparece en la Figura 13. En las Figuras 14 (Pisco) y 15 (Guadalupe), aparecen otras ampliaciones.



Figure 13.- Primer piso de adobe y segundo piso de albañilería. Pisco.



Figure 14.- Ejemplo de ampliaciones en edificios.



Figura 15.- Ampliación en edificios

Columnas Cortas. La arquitectura clásica que se utiliza en los colegios, universidades y hospitales, continuó generando el problema de columnas cortas en la zona afectada (Figura 16). En ciertos casos, fue el alféizar de albañilería el que falló debido a la baja calidad de los ladrillos y a la robustez de la columna, evitando la formación de la columna corta (Figura 17).



Figura 16.- Hospital de Ica.



Figura 17.- Instituto Tecnológico de Pisco. Pabellón de 2 pisos (izquierda) y Pabellón de 3 pisos, con columnas robustas (derecha).

Un caso especial fue el que ocurrió en la Facultad de Medicina de la Universidad San Luis Gonzaga de Ica, donde para evitar la interacción alféizar-pórtico (causante de la columna corta), los muros se aislaron de la estructura principal, arriostrándolos con columnetas cuyos refuerzos verticales apenas anclaban en el recubrimiento de la viga de apoyo, por lo que terminaron volcándose ante la acción sísmica transversal al plano del alféizar (Figura 18).



Figura 18.-Estructuras volcadas ante la acción sísmica transversal

Fig.19. Columna de concreto sin refuerzo.

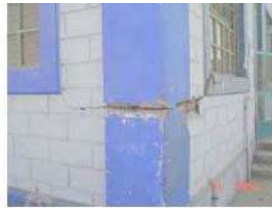


Fig.20

Muros sin diafragma rígido.

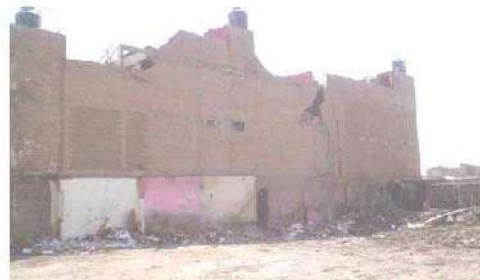


Figura 21.- Muros sin solera y con columna discontinua (izquierda), y espaciamiento entre arriostres verticales muy grande (derecha).



Figura 22.- Unión columna-viga, nudo sin estribos. La Norma E.070 obliga a colocar por lo menos 2 estribos

DETALLES ESTRUCTURALES

Errores cometidos en los detalles estructurales como: inexistencia de soleras, discontinuidad de columnas, nudos sin estribos, etc., se ilustran en las Figuras 19 a 22. En todas estas situaciones se violó la Norma de Albañilería E.070 (Referencia 5).

CERCOS Y PARAPETOS

Estos elementos trabajan a carga sísmica perpendicular a su plano y necesitan arriostres que eviten su volcamiento (Referencia 5). Desde Lima hasta Ica, pudo observarse que aquellos cercos y parapetos carentes de arriostres terminaron volcándose, incluyendo aquellos donde se utilizaron mochetas de albañilería como arriostre. Un caso curioso ocurrió con un cerco no arriestrado de tapial en el trayecto entre Chincha Baja y Tambo de Mora (Figura 24), donde en la dirección perpendicular al mar el cerco se mantuvo estable, pero colapsó en la dirección transversal.



Figura 22.- Chilca, columna sin refuerzo (izq.) y con mochetas (der.)



Figura 23.- Pisco, cerco alto y rótula en la base de la columna de arriostre.



Figura 24.- Chincha, cerco de tapial perpendicular al mar (izq.) y paralelo al mar (der.).



Figura 25.- Pisco, parapeto sin arriostar (izq.) y arriostrado en el tercer piso (der.).

TANQUES DE AGUA

Los tanques de agua generalmente apoyan sobre 4 columnas, produciendo un cambio brusco de rigidez entre esos apoyos y el último piso (de albañilería), que genera un efecto de látigo sobre el tanque cuando ocurren los sismos (Figura 26). Para evitar esta situación en tanques existente, es recomendable taponar el espacio entre columnas con tabiques de albañilería.



Figura 26.- Pisco, colapso de tanques elevados.



Figure 27.- Tabique hecho con ladrillo pandereta.



Figure 28.- Tabique hecho con el sistema P-7.

TABIQUES EN LIMA

El período predominante del acelerograma de la estación PUCP fue 0.77seg, por lo que, a pesar de que el sismo fue “leve” en Lima, los edificios altos y las estructuras flexibles fueron los que más daños tuvieron en sus elementos no estructurales. Se reportaron fisuras en los tabiques no aislados de la estructura principal, hechos con ladrillos pandereta (Figura 27) y en los construidos con el sistema P-7 (bloques sílico calcáreos, Figura 28). En ambos casos, la deriva elástica de los entresijos podría haber superado a la distorsión angular para la cual la albañilería se fisura (1/800). Cabe indicar que esta verificación no se encuentra especificada en la Referencia 3.

CONCLUSIONES

1.- El sismo del 15-08-2007, calificado desde el punto de vista estructural por el autor como “leve” para Lima y “moderado” para Pisco o Chincha, puso al desnudo una serie de errores que se cometen en las edificaciones de albañilería, principalmente por el aspecto informal con que se construyen estos sistemas, pese a la existencia de normas nacionales de construcción y diseño estructural (Referencias 3 y 5).

2.- Ningún tipo de estructura debió construirse en la zona licuada de Tambo de Mora, por lo que se propone la creación de un museo de sitio, para que la humanidad entera no repita este error. Especial precaución deberá tomarse con las edificaciones ubicadas en los pantanos de Villa, donde a pesar que el sismo fue “leve” en Lima, hubo indicios de licuación.

3.- Los daños severos en Pisco se presentaron principalmente en las zonas arenosas con napa freática elevada. Para este tipo de suelo debe exigirse el empleo de cimentaciones rígidas de concreto armado para todo tipo de edificación.

4.- Es necesario que los revisores municipales de los planos de estructuras y de arquitectura, sean personas calificadas y entrenadas para detectar problemas que podrían presentarse en las edificaciones ante los sismos, como: piso blando, torsión, columnas cortas, escasa densidad de muros, etc. Asimismo, es necesario que las municipalidades en coordinación con el Colegio de Ingenieros, nombren inspectores que constaten continuamente en la obra el cumplimiento de los planos de estructuras y de las normas nacionales.

5.- En la zona afectada, es necesario que se adiestre a los profesionales de la construcción sobre la forma de cómo deben construirse los muros de albañilería confinada, ya que la técnica que emplean no permite que las columnas actúen como arriostres ante acciones transversales al plano de los muros. En los pisos altos de las edificaciones existentes, es necesario integrar la unión entre la albañilería y las columnas, por ejemplo, con mallas electrosoldadas (Referencia 6).

6.- Para epicentros lejanos, el sismo tiene periodos predominantes altos y afectará a la tabiquería integrada a los edificios flexibles, por lo que es necesario especificar en la Norma E.030 (Referencia 3) un espectro de respuesta especial asociado a sismos

leves, de tal modo que las derivas elásticas no superen a 1/800, que es el valor para el cual fisura la albañilería.

AGRADECIMIENTOS

En las visitas realizadas a las ciudades afectadas por el sismo tomé 1200 fotos, pero muchas fueron superadas en calidad por las tomadas por mis amigos, esas fotos fueron seleccionadas para la elaboración de este artículo, por lo que expreso mi mas sincera gratitud a: Juan Carlos Dextre, Manuel Olcese, Daniel Quiun, Gianfranco Ottazzi, Victoria Ramirez, César Huapaya, Marcos Rider, Antonio Torres y Fernando Franco.

REFERENCIAS

United States Geological Survey (USGS) <http://earthquake.usgs.gov/>

Instituto Geofísico del Perú (IGP) <http://www.igp.gob.pe/> . *Informe Preliminar: el sismo de Pisco del 15 de agosto, 2007 (7.9 Mw). Por: Hernando Tavera, Isabel Bernal y Henry Salas.*

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, y SENCICO, 2006. Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma E.030 "Diseño Sismorresistente.

Alva Jorge, 2007. Sismo de Pisco-Ica del 15 de agosto 2007. CISMID – Universidad Nacional de Ingeniería. <http://www.cismid-uni.org/>

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, y SENCICO, 2006. Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma E.070 "Albañilería".

San Bartolomé Ángel, 2007. Blog de Investigaciones en Albañilería: <http://blog.pucp.edu.pe/albanileria>

COMPORTAMIENTO DE LAS CONSTRUCCIONES DE ADOBE DURANTE EL SISMO DE PISCO DEL 15 DE AGOSTO DEL 2007

Marcial Blondet

Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP)

INTRODUCCION

Este breve reporte esta basado en las visitas realizadas al área afectada el sábado 18 de Agosto junto a Eduardo Fierro, líder del grupo EERI, y un grupo de la PUCP encabezado por Nicola Tarque, quien empezó la inspección y el trabajo in situ el viernes 17 de Agosto y posteriormente junto al grupo EERI. Las ciudades visitadas fueron, de Sur a Norte, Ica, Paracas, Pisco, Chincha y Cañete. También se visitaron los pequeños poblados aledaños a estas ciudades. El sismo causó cuantiosos daños a todas las construcciones de tierra en el área afectada. Pisco fue la ciudad más cercana al epicentro e inevitablemente la de mayor tasa de mortandad. La mayoría de las casas de adobe e iglesias en Pisco colapsaron o sufrieron daños irreparables. Los daños observados en Pisco se repitieron al menos en los pueblos y ciudades vecinas.

CASAS DE ADOBE TRADICIONAL

Las construcciones de adobe son de uso popular en Perú. La mayoría de casas de 50 años de antigüedad a más están hechas de adobe. Aunque la construcción con material noble se esta convirtiendo en la técnica de construcción preferida para aquellas familias que pueden costear dicha construcción, las construcciones de adobe son aun la única alternativa viable para muchas familias en Perú.

En las costas peruanas, la mayoría de las casas de adobe son de un piso alto. En el caso de las casas de dos pisos, el segundo piso usualmente se construye con quincha, la cual consiste en una serie de marcos de madera rellenos con caña cruzada cubiertos con barro y recubierto yeso. Dado que en la mayor parte de la costa peruana no llueve los techos son horizontales o planos y constan de vigas de madera apoyados directamente sobre paredes de adobe cubiertos por planchas de madera o una capa de caña cruzada, y algunas veces cubierto por esteras recubiertas de barro.

El grosor y altura de las paredes depende principalmente de la edad de la vivienda: las casas antiguas presentan paredes anchas y altas (de hasta 0.80 m de ancho, y 4 m de altura; con coeficientes de esbeltez de 5 a 6). Las casas contemporáneas tienen paredes más delgadas y cortas (típicamente de 0.25 m de ancho, y 2.5 m de altura, con coeficientes de esbeltez entre 8 y 10 o mayores). El interior de las paredes y divisiones están hechas de adobe o quincha. En ningún caso las paredes fueron provistas de ningún refuerzo adicional para resistir la fuerza sísmica.

En Pisco, más del 80% de las casas de adobe colapsaron o sufrieron grandes daños. Esto debido a la pésima combinación de las características mecánicas de las paredes de adobe: masivas, débiles y quebradizas. Dado que son masivas, estas atraen grandes fuerzas de inercia durante el movimiento sísmico, siendo incapaces de resistir ya que la construcción es débil y frágil por lo tanto la ruptura se produce sin previo aviso. Además, en Pisco y áreas vecinas, los bloques de adobe y la mezcla fueron hechos con suelo arenoso, lo cual no tiene suficiente arcilla como para proporcionar una buena adhesión entre la mezcla y los bloques de adobe. La figura 1 muestra la vista de una calle en Pisco, llena de escombros de las casas de adobe colapsadas.



Figura 1.- Calle en Pisco tres días después del sismo. La mayoría de las casas de adobe sufrieron colapso total. La casa azul claro en el extremo derecho, sin daños, fue hecha de material noble.

El tipo mas común de colapso observado en las casas de adobe se debe a la formación de grietas verticales en las esquinas de las paredes a consecuencia de la fuerza de la sacudida “out-of-plane”, seguido por el colapso de las paredes sobre la calle y algunas veces el colapso del techo (especialmente si la viga del techo se apoya sobre la fachada de la pared). Para evitar este tipo de daños pudo haber sido útil el uso de un collar en la parte superior que haga que se unan todas las paredes, Ver Figura 2.



Figura 2.- Casas de adobe colapsadas en Pisco. Las vigas del techo de la casa de la derecha estaban apoyadas sobre las divisiones de quincha. Las vigas del techo de la casa de la derecha estaban apoyadas sobre la fachada de la pared, por lo tanto colapsaron con la fachada. Nótese a la izquierda la casa construida de material noble sin daños y en la parte posterior derecha el colapso de la fachada de una casa.

En algunas casas de adobe las paredes que no colapsaron “out-of-plane” mostraron típicas grietas diagonales debido a la carga en plano, siguiendo un patrón tipo escalera dentro de la interfaz mezcla – bloque. Algunas casas de adobe no sufrieron daños significantes dado que estaban emplazadas en un vecindario de casas de material noble.

CASAS DE ADOBE REFORZADAS

En 1999 la universidad Católica del Perú (PUCP) reforzó 19 casas en diferentes lugares del país. Dicho reforzamiento consistió en bandas de malla de alambre soldado y clavado en las paredes cubiertas con una mezcla de cemento y arena. En la Figura 3 se muestra la casa que fue construida en Guadalupe, una pequeña ciudad cerca de Ica. Dicha casa no sufrió ningún daño durante el sismo de Pisco, mientras que las casas contiguas que no fueron reforzadas sufrieron daños significantes o colapso. Este sistema de reforzamiento debe ser usado con cuidado puesto que, aunque los ensayos en la mesa vibradora muestren que la fuerza de las paredes de adobe se incrementa significativamente, el modo de colapso es frágil.



Figura 3.- Esta casa de adobe sin daños fue reforzada con bandas de alambre cubiertas con una mezcla de arena y cemento. Las bandas verticales fueron puestas en cada intersección de la pared, y las bandas horizontales al nivel del techo. A la derecha, nótese el colapso de la pared sin refuerzo.

Iglesias

En Perú se tiene muchas iglesias antiguas extraordinarias. Muchas de ellas construidas con paredes de adobe y bóvedas de quincha que cubren la parte central de las mismas. La mayoría de las iglesias sufrieron cuantiosos daños durante el sismo.

El caso mas dramático es el de la iglesia de San Clemente en Pisco, donde la bóveda colapso repentinamente y mato alrededor de 160 personas quienes asistían a un servicio funerario. El sacerdote se salvo porque estaba bajo la cúpula, la cual había sido reparada con concreto reforzado después de un previo sismo. La figura 4 muestra una vista lateral de la iglesia de San Luis, un pequeño poblado al sur de Cañete. Al parecer el peso lateral de la bóveda la empujo hacia la pared que la soportaba, siendo debilitada por la puerta de entrada.



Figura 4.- *La Iglesia de San Luis, La pared lateral y sus pesados pilares fueron prácticamente traídos abajo presumiblemente por el empuje dinámico del colapso de la bóveda. Las torres fueron hechas de quincha y sufrieron daños menores.*

AGRADECIMIENTOS

El autor esta agradecido a Eduardo Fierro lider del grupo EERI; a Nicola Tarque y su equipo: Luis Carlos Fernandez y Jesús Carpio de la PUCP y Eric Hulburd de la Universidad de Standford; a Julio Vargas y Eduardo Ismodes, Decano de Ingeniería de la PUCP.

- Lermo, J. A. Aguilar, H. Ferrer, D. Vega, E. Ovando, Y. Carmona, I. Osorio, R. de la Rosa y E. Cruz, (Noviembre 2006), Nueva clasificación dinámica de los suelos en el Centro Histórico de Puebla, México, XXIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, 463-472.
- Lermo, J., Felicita Marlene Limaymanta Mendoza, (Noviembre 2007), Uso de las funciones de transferencia empíricas (HVNR) obtenidas con microtemores para construir mapas con la clasificación de los terrenos de cimentación para diseño sísmico, XVI Congreso Nacional Ingeniería Sísmica, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero, México, CD, III-6.
- Ligorria J.P, Atakan K. (1997). "Empirical site response estimation in Guatemala city", Proceedings of the seminar on Assessment and mitigation of seismic risk in the Central American area, September, 1997, El Salvador.
- Haskell N.A (1962), "Crustal reflection of plane P and SV waves", J. Phys. Earth., No. 67, pp. 4751-4767.
- Mitma M. y Alva H. (2005), "Microzonificación de la ciudad de Ica frente a sismos e inundaciones", http://www.cismid.uni.edu.pe/descargas/redacis/redacis27_a.pdf
- Muria D. y Gonzales A. (1993), "Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México". 6^a Jornada Chilena de sismología e ingeniería antisísmica, Santiago de Chile, 1, pp. 585-594.
- Parra M., Vasquez L. y Alva H. (1999), "Microzonificación Geotécnica de Pisco", XII Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Huanuco, 1999.
- Rodriguez M. y Aristizabal J.C. (1988), "Evaluación de la capacidad destructiva de terremotos", Series del Instituto de Ingeniería, UNAM, N° 609, 123 pp.
- Sánchez S.F. (1985). "Análisis de riesgo sísmico en Laguna Verde", Informe interno del Instituto de Ingeniería para la Comisión Federal de Electricidad, 38pp
- Seed Bolton H. (1986), "Influencia de las condiciones locales de suelo en movimientos del terreno y en daños a edificios durante sismos", Octava conferencia Nabor Carrillo, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 187 pp.
- Sánchez E. Parra M. y De la Cruz U, "Microzonificación Sísmica de la ciudad de Pisco", http://www.cismid.uni.edu.pe/descargas/redacis/redacis59_a.pdf
- Tavera H., Bernal I. y Salas H. "El Terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007: Aspectos Sismológicos", http://khatati.igp.gob.pe/Webs/cns06/pisco2007/terremoto_pisco_2007.htm
- Tavera H., "Distribución Espacial de las Réplicas del Terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007: Resultados Preliminares", http://khatati.igp.gob.pe/Webs/cns06/pisco2007/terremoto_pisco_2007.htm
- Mapa de Peligrosidad de Ica, SINADECI, Página de Internet:
<http://sinadeci.indeci.gob.pe/ZoomViewer/ica-ica.htm>
- Mapa de Peligrosidad de Pisco, SINADECI, Página de Internet:
<http://sinadeci.indeci.gob.pe/ZoomViewer/pisco-ica.htm>

FENOMENOS LUMINOSOS

**ENIGMAS DE LA NATURALEZA:
LAS LUCES ASOCIADAS AL TERREMOTO DE PISCO DEL 15 DE AGOSTO, 2007**

Isabel Bernal, Hernando Tavera y Bilha Herrera
Dirección de Sismología - CNDG

INTRODUCCION

El atardecer del 15 de agosto de 2007 (18h 40min hora local) en la región central del Perú ocurre un terremoto de magnitud 7.0 ML, con epicentro en 13.49° Sur y 76.85° Oeste; es decir, 65 km al oeste de la ciudad de Pisco, generando intensidades de hasta VII MM en un radio de 200 km aproximadamente. Este terremoto es el mas grande ocurrido en esta zona después del producido en 1746, produciendo muerte, destrucción y pánico en Pisco y poblaciones aledañas. Durante el terremoto, los habitantes de las diferentes provincias de Lima /Ica observaron en el cielo la presencia de luces de diversos colores que incrementaron el pánico en la población por considerarlo un fenómeno extraño. A nivel mundial, durante la ocurrencia de grandes terremotos estos fenómenos han sido observados y descritos como rayos y fuegos artificiales etc., pero la ciencia no puede hacer mucho con toda la serie de relatos de los testigos presenciales. Después de que las luces fueran fotografiadas en Japón por los años sesenta los especialistas propusieron diversas teorías que aun son discutidas sin llegar a explicar su origen.

En el caso del terremoto de Pisco, diversos medios de comunicación reportaron testimonios de personas que afirmaron haber visto fenomenos luminosos no identificados sobre el cielo de las ciudades de Lima e Ica a pocos segundos de haberse iniciado el terremoto, describiendo al fenómeno como destellos de colores blancos, azules y rojos que en la mayoría de los casos salieron del mar, y que iluminaron todo el cielo como lo haría un relámpago. Otros atribuyeron las luces a ovnis, meteoritos o presagios divinos siendo en su mayoría improbables. En diversas páginas Webs existen varios videos que muestran este fenómeno.

En general, las luces en el cielo duraron varios segundos y sus características fueron mayormente observadas en la ciudad de Lima, ubicada a 170 km del epicentro del terremoto. En Pisco los comentarios sobre estos sucesos fueron pocos, lo que es comprensible puesto que ellos se encontraban en la zona del desastre y la mayoría de

los pobladores pensaban solo en sobrevivir, sin percatarse de las luces que aparecieron en el cielo.

El objetivo de este estudio es tratar de explicar el ¿Por qué? de las luces que se presentaron en Lima /Ica durante del terremoto de Pisco por ser un fenómeno natural, enigmático, interesante y que aun no tienen una explicación técnica-científica. La información utilizada corresponde a la recopilada de diferentes fuentes nacionales e internacionales, así como artículos, notas extraídas de diferentes páginas WEBS y entrevistas personales en los departamentos de Ica y Lima.

HISTORIA DE LUCES ASOCIADOS A TERREMOTOS

Según datos históricos, los fenómenos luminosos asociados a terremotos más antiguos ocurrieron hace más de 300 años antes de nuestra era y fueron descritos por los griegos como "grandes columnas de fuego" producido antes del terremoto y por ejemplo, destruyeron a las ciudades de Helike y Boura en Grecia.

Recientemente, durante la ocurrencia del gran terremoto de Valdivia (Chile), del 22 de mayo de 1960, el más grande registrado hasta hoy (9,5Mw), se observaron luces en el cielo que fueron descritas como una "fosforescencias en el aire de un color azul-verdoso", según indican el efecto parecía ser más brillante en el horizonte del sur y este, aunque en general, el cielo se vio completamente iluminado. Este fenómeno causó la interrupción de las comunicaciones y cambios en la orientación de las brújulas según la descripción de un piloto que volaba por la zona (Pierre Saint-Amand, 1961). Este efecto, fue asociado a la alteración de ondas electromagnéticas.

A pesar de disponer de esta información, el fenómeno sólo fue reconocido por la comunidad científica cuando fue capturado en fotografías durante la secuencia de terremotos ocurridos en Matsushiro (Japón) entre los años 1965 y 1967 (Figura 1). Sin embargo, a la fecha no existe una explicación satisfactoria para conocer el origen de las luces, pero si, el interés de seguir investigando.



Figura 1.- Una de las fotografías tomadas durante el terremoto de Matsushiro (Japón) por Yutaca Yasui entre los años 1965 y 1967.

El 29 de noviembre de 1975, durante el terremoto de Kalapana (Hawai, 7.2M), se observaron destellos en el cielo, al igual que el 28 de julio de 1976. Antes del gran terremoto de Tangshan en China (7.5Mw), considerado el más catastrófico de los tiempos modernos con más de 250.000 muertos, se observaron luces de colores en el cielo durante la noche, las cuales salían del interior de la Tierra como si se produjera una explosión.

El estudio moderno más extenso de observaciones de luces de terremotos (LT) viene de Saguenay, Québec debido a los terremotos de 1988-1989 (St-Laurent et al, 2000). Al menos 46 informes bien-documentados abarcan el tiempo de tres semanas antes del evento principal hasta dos meses después. Las categorías generales de observaciones incluyen: (1) iluminación sísmica, (2) bandas luminosas atmosféricas, (3) masas incandescentes globulares, (4) lenguas de fuego, (5) llamas sísmicas, y una categoría recientemente-reconocida, (6) coronal o descargas del punto. Las últimas observaciones realizadas en el lugar y al momento del evento principal, apoyan fuertemente la teoría del agujero positivo.

Asimismo, se observaron luces durante el terremoto de Kobe (1995, M=7.0) en Japón el cual fue documentado por Tsukudo (1997). Hubo 23 avistamientos dentro de 50 km del epicentro de luces blancas, azules, o anaranjadas todas con una altura superior de 200 metros y una dimensión lineal de 1 a 8 km. Los tipos de fenómenos fosforescentes fueron clasificados como: alumbrado con línea en zig-zag y fuentes

infladas de forma de escudo, fuentes de forma de abanico extendiéndose hacia arriba, o un cinturón de luces (incluyendo fuentes de forma de arco).

Como se puede observar, este fenómeno ha sido presenciado antes, durante ó después de la mayoría de terremotos de gran magnitud, siempre y cuando se presenten las condiciones adecuadas para la generación de estas luces y así distinguirlas en el cielo (Figura 2). La singularidad de estos terremotos es que todos parecen ocurrir en zonas de gran potencial sísmico debido a la presencia de diversos elementos sismogénicos como dorsales marinas, zonas de rifts, arcos de islas, islas volcánicas o en zonas de conjunción de placas. Sin embargo, y a pesar que es tema de muchas investigaciones aun no se tienen un consenso sobre su real origen.

LAS LUCES DEL TERREMOTO DE PISCO

A consecuencia del terremoto de Pisco del 15 de agosto de 2007 (18h 40min hora local) por primera vez en el Perú se observaron extrañas manifestaciones luminosas en el cielo que duraron varios segundos (aproximadamente 60 segundos) provocando miedo y pánico en los pobladores, ya que no solo era el movimiento de la Tierra, sino que tenían ante sus ojos manifestaciones nunca antes visto (destellos y formas luminosas) que hacían pensar a más de uno, que se trataba de un castigo divino o del fin del mundo, provocando que muchas personas de arrodillaran dando plegarias por su salvación.

Las luces en el cielo de Lima, duraron varios segundos y considerando que el terremoto aquí no produjo mayores daños, la población observó el fenómeno con mayor claridad. Contrariamente en las ciudades de Pisco e Ica, no existe mucha información al respecto, lo que es comprensible puesto que ellos se encontraban en la zona de desastre.

Tras ocurrido el evento, inicialmente se creyó que las luces tenían relación con la caída de torres de alta tensión al suponerse que la luminosidad fue puntual; sin embargo, conforme pasaron la horas se conoció que el fenómeno fue observado en toda la ciudad de Lima e Ica, además la altura a la cual fueron presenciados dejaba de lado la idea de las torres de alta tensión.



Figura 2.- Mapa con la localización de los terremotos de los cuales se tiene información que fueron acompañados de Luces.

Con el paso de los días y meses de este terremoto, en la reunión de “Lecciones aprendidas del terremoto de Pisco” organizado por el INDECI (12-17/Nov. 2007), las preguntas fueron, ¿Por qué aparecieron estas luces en el cielo?, ¿Cuál es su origen?, ¿Por qué fue mas visible en la ciudad de Lima y no en Pisco?, ¿Por qué este fenómeno solo se observó en el terremoto de Pisco y no en otros terremotos?, etc.

Debido a estos comentarios, se procedió a recolectar información técnica y notas con el propósito de analizar y proponer una hipótesis que ayude a comprender este fenómeno inusual para terremotos en el Perú. Por ejemplo, durante los grandes terremotos de 1940,1974, 1966 (costa de Lima), 1942, 1996 (costa de Ica), 1970 (costa de La Libertad), 2001 (costa de Arequipa), no se reportaron haberse producido estas luces, y sigue la pregunta ¿Por qué no se observaron durante estos terremotos las luces?. El terremoto de Pisco a diferencia de estos, ocurrió de noche y tuvo gran duración, dos fuentes de ruptura, geodinámicamente el área afectada es muy compleja y probablemente en la atmósfera se dieron las condiciones necesarias para producir las luces.

RELATOS Y EXPERIENCIAS

A continuación se transcribe algunas de las declaraciones y/o noticias, presentados en los medios de comunicaciones de algunas personas que fueron testigos de este extraño fenómeno observado en el cielo.

COMENTARIOS EN PISCO, PARACAS Y CHINCHA (Sender, 2007)

.- Tripulantes de la embarcación Aymara Hayle, narran aún sorprendidos algunos detalles de lo que vieron:

Fue como un resplandor color anaranjado a lo lejos.

Yo vi como una explosión.

Era como la explosión de un volcán en el fondo del mar en dirección a las islas Chincha (12 millas al noroeste de Pisco), varios la han visto.

A los segundos nomás se fue la luz, y eso permitió que se vea mejor.

Yo pensé que había sido una explosión.

¿Las luces hacia dónde se dirigieron?

Se iban apagando.

Se vio un resplandor que ahí mismo se apagó.

Así como cuando lanzas un cohete y luego se va desvaneciendo.

¿Cuanto tiempo duró el “resplandor”?

Eso ha durado segundos nomás.

Eso no ha sido cuestión de minutos, solo segundos, nada más.

.- Testimonio de joven trabajador del puerto de San Andrés:

“Se vio como una explosión eléctrica, como una bomba cuando explota, era de color azul y amarillo. Saliendo hacia la Villa (distrito ubicado al oeste de Pisco), se veían estrellas fugaces que iban como hacia el sur, varios las han visto. Eso fue como media hora después del terremoto.”

.- Testimonio del Sr. Joseph Valenzuela, pescador de 50 años junto a otros compañeros de trabajo:

“Se vio el cielo color rojo. Ha salido una luz de la energía del fondo del mar, eran luces rojizas, blancas y amarillentas. Después de la explosión salieron unas luces como unas estrellas en gran cantidad. Habrá durado 5 minutos”

.- Testimonio de William Medina pescador de 30 años:

“El terremoto nos agarro llegando a la playa, cerca a Laguna Grande, al tiempo que era el movimiento lo que hemos podido ver luego de trepar un cerro, son las luces de la ciudad que se desaparecieron totalmente. Luego hemos visto una luz inmensa cuando la mar empezó a salir y cerrar esa zona.”

¿En qué dirección estaba esa luz?

Venia de la zona de la ciudad, desde el cerro hemos visto una luz inmensa cuando ha sido el movimiento.

¿De qué color era?

Una luz rojiza.

¿De qué forma?

Era redonda. A tapado la ciudad, era inmensa, una luz roja grande que estuvo segundos sobre la ciudad, era bien regular.

.- Testimonio de Juan Herrera de 34 años, guardián de la Caleta de Chaco (Paracas), quien en el momento del terremoto estaba de servicio y se encontraba solo en un bote dentro del mar:

Lo que se pudo percibir en ese momento fue como relámpagos, como que chocaban luceros y votaban unas chispas y el ruido sobre todo, como si sonaran tablas.

¿En qué dirección se veían?

En cualquier dirección, tú mirabas a cualquier parte del cielo y comenzaban a correr las estrellas, como que chocaban y botaban unas chispas, como un “cortocircuito” algo así.

¿De qué colores eran?

El color no me he percatado muy bien, porque hay momentos en que se ve amarillo o medio azul, pero en ese momento con la desesperación no se pudo ver bien que cosa era.

- Relato de la Sra. Rosa Mejía de 55 años, testigo de las luces desde la zona de San Andrés (8 Km. al sur de Pisco):

Vi como unas luces en el cielo medio amarillentas que iluminaban el cielo, eran como relámpagos, reventaban y se apagaban.

¿Por cuánto tiempo vio esas luces?

Levante la vista viendo un poste de luz y los cordones, cuando veo esa iluminación que ahí mismo se apagó, le dije a mi hijo que mirara esos relámpagos.

- Relato de Ada Herrera de 29 años, testigo ubicada en Chaco (15 Km al sur de Pisco):

Estaba con mis 4 hijos sentados en el suelo y vimos esas luces y todos decían que eran relámpagos. Vimos las casas como se balanceaban y esos rayos medio blanquecinos.

¿Cómo eran?

Eran como una luz que la prendían y luego la apagaban, a iluminado todo el cielo, era inmenso.

- Anónimo, testigo ubicado en la playa Totoritas -Chincha

Estuve en la playa Totoritas en Chincha logre ver una luz que salio del mar hacia el espacio (verticalmente) como un ocaso mas o menos, de ahí no seguí los pasos, por que el movimiento era enloquecedor como que quisiera abrirse la tierra, como si tratase de salir algo de la Tierra hacia la superficie.

COMENTARIOS EN LIMA

- El Sr. Tomás Unger declara:

“...el día 15 a las 6:40 p.m. estaba sentado en el escritorio de mi casa, cuando comenzó el terremoto. Recuerdo a muchos terremotos, los cuales tuvieron en común las altas frecuencias de las vibraciones y el ruido, pero el terremoto de Pisco tuvo dos características que nunca había observado antes: un movimiento ondulatorio de baja frecuencia, con poco ruido y amplia oscilación, y una luminiscencia en el cielo que tampoco había visto...”

- Sr. Arturo, testigo ubicado en la Av Argentina

“...estaba conduciendo mi auto por la Av. Argentina y noté que las luces de los postes titilaban y el cielo se iluminaba, lo primero que pensé es que había un ataque terrorista masivo, que habían volado cientos de torres de energía simultáneamente (la iluminación vista era igual a la época terrorista cuando volaban torres). Lo extraño era que sentía que mi auto se iba de un lado a otro y lo atribuí al balón lleno de gas que había comprado en un grifo y como nunca lo puse echado en el piso, me quejaba que como el movimiento del balón de gas hacia que mi auto se pusiera inestable”

- Testigo ubicado en San Miguel

"...yo vivo en Maranga San Miguel, el terremoto se sintió muy fuerte por acá y por lo menos habrá durado sus 5 minutos, muy a parte en alguna parte del callao se vio como una gran luz, pareciera que hubiese habido algún tipo de corto circuito o algo así..."

- Testigo ubicado en el Rimac

"...Yo recibí el terremoto en el Rimac. pero tengo un amigo flavio que vive en el distrito de villa el salvador, lima, quien el día del terremoto se encontraba en su cuarto en el segundo piso que da frente al Océano Pacífico y al momento del terremoto, del mar salio una luz blanca grande, del mismo mar. lo que dejo constancia para el estudio de los geólogos y tengo otro amigo que estuvo en vitarte y escucho una gran explosión antes del terremoto como golpe y luego llego al cielo una luz anaranjada y al instante continuo el terremoto. en mi caso vivo en el Rimac en urb. Ciudad y campo tercer piso, y de pronto tembló la tierra muy fuerte.."

- Anónimo

"...estaba en casa sirviendo la cena y comenzó despacio y de pronto fue mas fuerte así que con mis hijos bajamos al primer piso y llame a mi mama que bajara, salimos a la calle y seguía muy fuerte, en la calle los postes se movían parecían que se caerían se apagaron las luces, y de pronto se vio una luz en el cielo de color blanco y otra de verde, pensé q sería un meteorito o algo así que pasaba por el cielo y caería mas allá de mi barrio... y las réplicas son las q me dan miedo, no puedo dormir .."

- Testigo ubicado en el mirador del cerro San Cristóbal-Lima

"Yo pude presenciar las luces que aparecieron luego del terremoto, me encontraba en el mirador del cerro San Cristóbal de la ciudad de Lima, y fueron dos luces como explosiones pero sin sonido, la primera era naranja y la segunda fue amarilla, las dos salían del mar, pienso que se debió a liberación de tanta energía generada por el terremoto"

- Testigo desde Chorrillos

"He visto, las potentes luces blancas y azules a lo largo del mar, causando alarma entre mis familiares, pienso que es un fenómeno muy complejo que no entendí pero no creo que sea asociado al terremoto de Pisco o no?, ya que solo se observo en Lima y porque no se ilumino también Ica, Paracas, Chincha, Pisco, Cañete, etc, es decir, el sur chico. Otra cosa. Las placas están a varios kilómetros por debajo del suelo marino"

- Testigo de la Perla-callao

"Estaba en mí casa en el momento del terremoto, al momento del apagón se pudo observar rayos en el cielo, pero definitivamente, causándome extrañeza y susto, ya que en la ciudad de Lima no existe rayos, ni relámpagos y ni truenos, pues si se viera uno, sería muy raro y muy escaso en verse, pero el día del



Figura 3a.- Fotos tomadas en la Av Javier Prado, rumbo al Estadio Monumental (Fuente ATV) donde se observa las luces blancas-lilas. En Ate- Lima (fuente UTP), se observaron luces de color blancas, celestes y azules.



Figura 3b.- Fotos tomada después de unos minutos de ocurrido el terremoto en la Av. Javier Prado, rumbo al Estadio Monumental (Fuente ATV) donde se observa las luces blancas lilas. En Ate-Lima (UTP), se observaron luces de color blanco, celeste y azul.

terremoto se vieron mas de tres y fueron varios rayos con ruido de fondo como bombas”

- Testigo de Villa María del Triunfo

“Al momento que ocurría el terremoto, vi luces acompañados de un ruido, pensando en primera instancia que fue generado por la explosión de las torres de alta tensión...lo cual descarte, sin embargo creo que el movimiento generado por el terremoto produce el movimiento de los cables que transportan la energía desde la sierra hasta la costa (estamos hablando de mas de 100mil volteos) llegan a un punto de estar tan cerca que se produce un "arco voltaico".

- Testigo de Villa María del Triunfo

“...Observé que a consecuencia del terremoto la gente se desesperaba al ver a los postes de luz bailar y parecían caerse, a parte que en el cielo se veían luces de distintos colores, momentos en el cual se escucharon gritos y rezos, fue escalofriante, los vecinos todos con sus familias se abrazaban y lloraban, y cuando se fue la luz eléctrica todo fue peor, parecía de nunca acabar...”

A Continuación se muestra algunas fotografías sobre las luces observadas en el cielo de Lima (Figuras 3,4,5) a consecuencia del terremoto del 15 de Agosto del 2007.



Figura 4.-. Secuencia de fotos tomadas en Miraflores - Santa Cruz Av. Mendiburu. En el minuto 0:39 se puede apreciar que el cielo se ilumina de un color azul. Estas luces fueron vistas desde todo Lima y fueron varios centellas de color naranja, amarillo, plateado, azul o verde. En Lima no hay relámpagos ni truenos, y no se reportaron explosiones de centrales eléctricas, y es mas, estas luces provenían del oeste de Lima, del mar.



Figura 5.- Foto tomada al suroeste de Lima Metropolitana, donde se observa luces de color blanca-rojas al igual que en San Martín de Porres.

De acuerdo a las fotos, las luces se pudieron ver de diferentes tonalidades e intensidad de acuerdo a la ubicación geográfica del observador. Se vieron luces blancas, lilas, azules, amarillas, rojas distribuidas de manera aleatoria en la ciudad de Lima. Por ejemplo, en San Juan de Lurigancho las luces brillaban de color anaranjado y amarillo; en Habich, de color rojo azulino; en Surco, Miraflores, Ate Vitarte, La Molina, de color azulado, lila; al SO de Lima metropolitana, las luces fueron blancas-rojas. Según la información disponible no existe un color único en el cielo de Lima, lo cual hace más difícil discutir alguna hipótesis para el origen de estas luces asociadas a terremotos.

ENCUESTAS EN ICA Y LIMA

Para este tipo de encuestas se siguió una secuencia de preguntas a fin de uniformizar las respuestas: Donde estuvo durante el sismo?; vio luces?; en que momento las vio?; cuanto tiempo duró?; que forma y tamaño tuvo?; cuantos destellos vio?; la luz fue intensa o tenue?; de que color fueron?; a que altura las vio?; y finalmente, de que dirección provenía?.

Los resultados son presentados en dos cuadros, uno para los departamentos de Lima e Ica ubicadas cerca de la línea de costa ordenadas de Norte a Sur y otro para los diferentes distritos de Lima Metropolitana.

Departamentos de LIMA-ICA

Sólo se considera a las provincias de Lima e Ica ubicadas cerca de la línea de costa, debido que a mayor distancia (localidades ubicadas próximas a la cordillera Occidental) la luz no fue observada. Los pobladores solo sintieron el movimiento de la tierra seguido de un oscurecimiento total a pocos segundos de iniciarse el terremoto y que podría deberse a la polvadera generada por derrumbes y al corte del fluido eléctrico.

Tabla 1. Cuadro de resúmenes de las encuestas obtenidas en provincias de Lima e Ica

Prov.	Vio luces	Antes, durante o después del sismo	Duración	Forma y tamaño	Colores	Tenue ó intenso	Dirección
Barranca	No	-	-	-	-	-	-
Huaura	No	-	-	-	-	-	-
Huamal	Si	<i>Durante</i>	<i>2 seg</i>	<i>Resplandor con 2 destellos</i>	<i>Amarillo</i>	<i>Muy tenue</i>	<i>SO de Lima</i>
Lima	Si	<i>Durante</i>	<i>3-4 seg</i>	<i>Resplandor, destellos, rayos</i>	<i>Arcoiris blanco-azul-amarillo-rojo-anaranjado</i>	<i>Intenso</i>	<i>Mar</i>
Cañete	Si	<i>Durante</i>	<i>3 seg</i>	<i>Destellos</i>	<i>Blanco-amarillo</i>	<i>Intenso</i>	<i>Mar</i>
Chincha	Si	<i>Durante</i>	<i>5 seg</i>	<i>Resplandor con 3 destellos</i>	<i>Amarillento</i>	<i>Intenso</i>	<i>Mar</i>
Pisco	Si	<i>Durante</i>	<i>4 seg</i>	<i>Un reflector grande acompañada de destellos</i>	<i>Blanco-amarillo-arcoiris</i>	<i>Intenso</i>	<i>Mar</i>
Ica	Si	<i>Durante</i>	<i>3 seg</i>	<i>Iluminación con destellos</i>	<i>Amarillento</i>	<i>Tenue</i>	<i>Oeste</i>
Palpa	No	-	-	-	-	-	-
Nazca	No	-	-	-	-	-	-

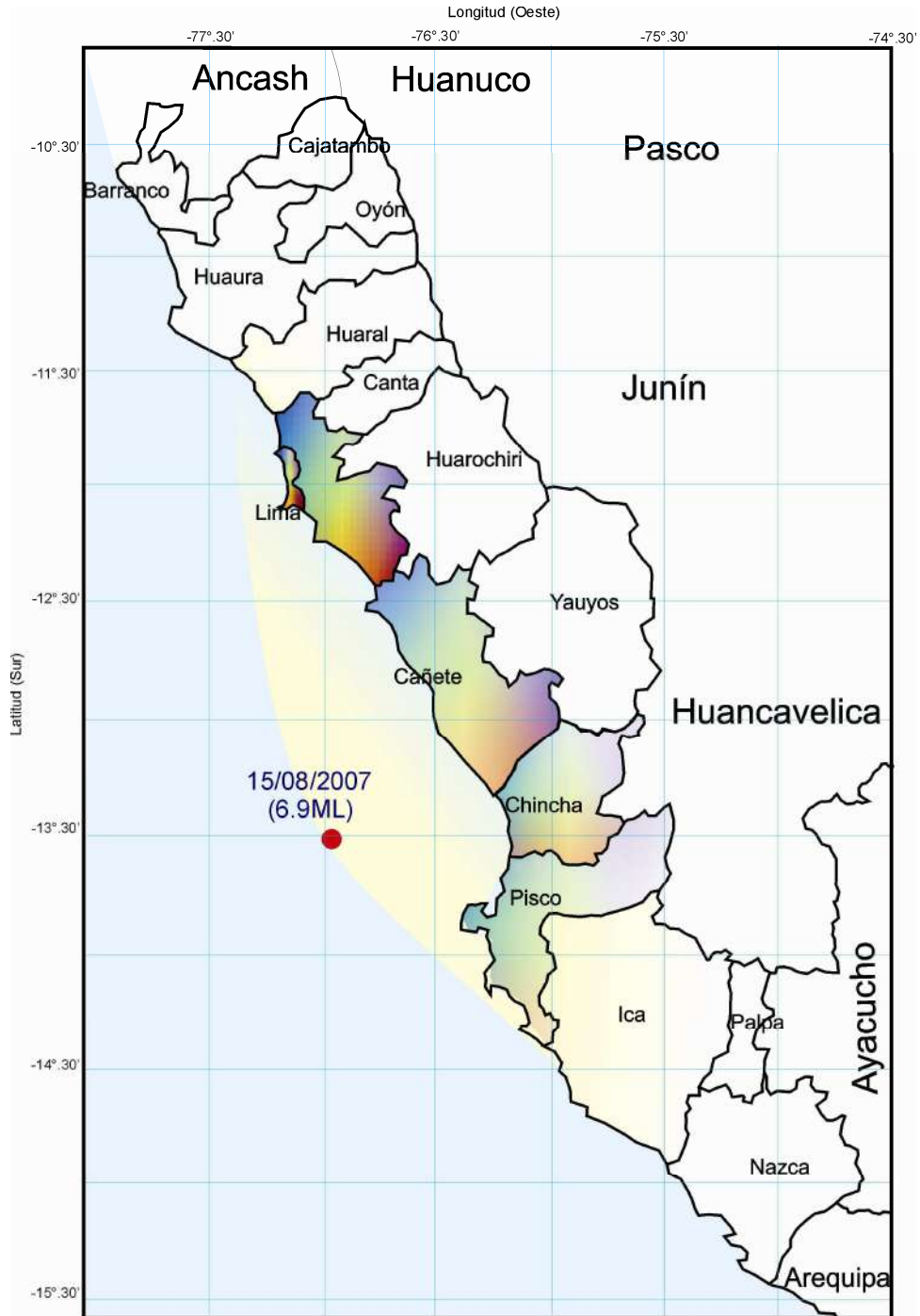


Figura 6.- Mapa con las provincias de Lima e Ica, donde se indica mediante el sombreado de colores las provincias donde se observaron estas luces.

De los datos mostrados en la Tabla 1 y Figura 6, las luces en el cielo se vieron al inicio de los terremotos en dirección del mar, distribuyéndose con mayor intensidad en las provincias de Lima, Cañete, Chincha, Pisco y con menor intensidad en el distrito de Huaraz por el norte y en Ica por el sur. En los distritos de Barranca, Huaura, Palpa y Nazca no se distinguió ninguna luz. De acuerdo a la distribución de las luces y a la ubicación del epicentro del terremoto, se puede asumir que este efecto tuvo una direccionalidad de sur a norte. Asimismo, los colores que se observan son muy variados, sobresaliendo próximos a Pisco colores blancos, amarillos y en Lima colores amarillos, anaranjados, rojos, azules. Se debe considerar que en la mayoría de las encuestas hechas en la ciudad de Pisco indican que observaron una luz salir del mar en forma de un reflector gigante hacia el cielo, estando inclinada en dirección norte y acompañado de destellos de diferentes colores.

Las luces en el cielo duraron entre 2 a 5 segundos y sus formas variaban entre destellos, relámpagos, rayos y reflectores seguidos por una gran iluminación en el cielo. Todos los encuestados coinciden en indicar que los servicios eléctricos y de comunicación en las diferentes provincias donde se vieron estas luces fueron interrumpidos por al menos 10 minutos en algunos casos y de hasta horas en otros, lo que implica que las luces pudieron ser vistas en detalle y con toda claridad.

Distritos de LIMA METROPOLITANA

Los datos mostrados en la Tabla 2 fueron obtenidos de al menos 2 encuestas por distrito, esto en consideración que el fenómeno de las luces fue visto por todos durante el terremoto, teniendo una duración promedio de 5 segundos en algunos distritos. En la mayoría de casos tuvo forma de un resplandor de diferentes colores similar a un relámpago, destello, rayo o foco. Asimismo, todos indican que la luz que observaron fue intensa y procedía del mar. En la distribución de estos datos no se observó ningún patrón, lo cual dificulta su interpretación.

Tabla 2. Cuadro de resúmenes de las encuestas obtenidas en Lima Metropolitana

Distritos	Vio luces	Durante el sismo	Tiempo duración	Forma y tamaño	Colores	Tenue ó intenso	Dirección
Ancón	Si	Durante	3 seg.	Resplandor grande (1)	Anaranjado -tipo arcoiris	Intenso	Del mar y norte
Sta Rosa	Si	Durante	4 seg	Relámpagos, destellos (1)	Blanco	Intenso	-
Carabaylo	Si	Durante	5 seg	relampago	Amarillento	Intenso	Del mar
Puente Piedra	Si	Durante		Destellos (4)	Azul-anaranjado-rojo	Intenso	-
Ventanilla	Si	Durante	3 seg	Resplandor	Amarillento	Intenso	Del mar
El Callao	Si	Durante	2 seg	Resplandor grande con 2 destellos	Celeste-rojo	Intenso	Del centro de la ciudad
San Miguel	Si	Durante		Destellos (varios)	Blanco-azulino-rojo	Intenso	Playa
Magdalena del Mar	Si	Durante		Resplandor (1)	Blanco	Intenso	Hacia el mar
Carmen de la Legua-Reynoso	Si	Durante	2 seg	Resplandor mediano	Celeste	Tenue	-
La Perla	Si	Durante		Destello (1)	Blanco	Intenso	-
Los Olivos	Si	Durante	3 seg	Destella grande (1)	Blanco	Intenso	Mar norte
Comas	Si	Durante	2 seg	Destello regular	Amarillo-azulado	Tenue	Del mar
Independencia	Si	Durante	3 seg	Resplandor (1)	Azulado	Intenso	-
San Juan de Lurigancho	Si	Durante	2-3 seg	Resplandor con un destello	Amarilla-azul-blanco	Intenso	Del cono sur
San Martín de Porras	Si	durante	5 seg	resplandor (1)	Blanco-amarillento-rojizo	Intenso	Del mar
Rímac	Si	durante	4 seg	Destellos (4)	Blanco-azul	Intenso	-
Cercado de Lima	Si	durante	4 seg	Resplandor grande (2)	Blanco, amarillo-azulada, rojizas	Intenso	Del mar
Breña	Si	durante	2 seg	Resplandor (1)	Blanco	Intenso	Hacia centro de Lima
Pueblo Libre	Si	durante		Destellos (varios)	Rojos-amarillos	Intenso	Del mar
Jesús Maria	Si	durante	3-4 seg	Destellos grandes	Amarillos	Intenso	Hacia el NO
Lince	Si	durante	2 seg	Resplandor (2)	Blanco-amarillo-rosado-naranja-azulino	Intenso	San Isidro
Miraflores	Si	durante	2 seg	Resplandor (2)	Blanco	Intenso	De la Playa
Barranco	Si	durante	4 seg	Destellos (2-3)	Blanco	Intenso	Del mar
El Agustino	Si	durante		Resplandor, grande (2)	Amarillento-rojizo	Intenso	Del sur
Santa Anita	Si	durante	3-4 seg	Resplandor con 3-4 destellos	Blanquesino, rojos, amarillos celestes	Intenso	Dirección NO
Ate	Si	durante	5 seg	Resplandor (2)	Blanco-Celeste	Intenso	De sur a norte
Cieneguilla	Si	durante		Rayo (1)	Blanco	Intenso	Centro de la ciudad
San Borja	Si	durante	5 seg	Resplandor con más de 1 destello	Blanco-amarillo-anaranjado	Intenso	Del sur
Santiago de Surco	Si	durante	3 seg	Rayo con 2 destellos	Naranja	Intenso	Del mar
Chorrillos	Si	durante	5 seg.	Foco, grande; estrella Fugaz (2)	Rojiza-amarillenta-naranja	Intenso	Del mar (sur)
Villa El Salvador	Si	durante	5 seg	Destellos (3-4)	Blanquesino-amarillento-rojiza	Intenso	Mar
V.M.T	Si	durante	mas de 2 seg	Relámpago con sonido de explosión	Blanco-celeste-amarillos	Intenso	Mar (sur)
Pachacamác	Si	durante	3-4 seg	Resplandor (1)	Blanco, celeste, azulado	Intensa	Mar
Turín	Si	durante		resplandor	Amarillentos-rojizos-anaranjado	Intensa	Mar
Pta Hermosa	Si	durante	3 seg.	Destellas (3-4), focos	Amarillentos Blanco, rojo	Intensa	De la playa
San Bartolo	Si	durante	2 seg	Auroras chicas	Celestes y rojas	Tenue	Del mar (sur)

PRENSA ESCRITA

A fin de mostrar la información distribuida a la población en los días posteriores al terremoto, a continuación se presenta algunas notas extraídas de los medios de comunicación escrita como evidencia del interés mostrado ante tal fenómeno.

El Portal de noticias Peru.com, día 16 de Agosto del 2007

Los chispazos vistos en el cielo de Lima durante el terremoto que azotó diversas zonas del país habrían sido producidos por daños en el fluido eléctrico y no por efecto de rayos y truenos, afirmó el Instituto de Geofísica del Perú (IGP). Según Hernando Tavera, director de sismología de la entidad, es probable que el corte del fluido eléctrico registrado en diversas partes de Lima haya tenido incidencia directa en la aparición de luces en el firmamento de la ciudad capital.

"No sabemos en realidad qué es lo que pasado, pero cuando ha ocurrido el terremoto en varias zonas de Lima se produjo cortes de fluido eléctrico que, probablemente, han generado estos chispazos. En otros lugares del país no se ha producido un fenómeno similar", dijo.

El Diario El Comercio, día 17 de Agosto del 2007

Los destellos de luz divisados en diferentes distritos limeños momentos después del terrible terremoto que azotó nuestro país fueron producidos por problemas con los cables que abastecen de electricidad a la ciudad y no por relámpagos, como lo supusieron aquellos que presenciaron el evento. Según fuentes del Instituto Geofísico del Perú consultadas por El Comercio, es muy raro que un movimiento sísmico esté acompañado por relámpagos en el cielo, por lo que los resplandores que aparecieron en el cielo de Lima lo atribuyen a problemas de la red eléctrica. Esta versión fue corroborada por la empresa de servicios eléctricos Luz del Sur.

El Diario La República, día 19 de Agosto del 2007

La versión científica sobre el inmenso resplandor que se vio en el cielo de Lima durante el terremoto no ha sido convincente. Según un video publicado en Youtube se observa un fognazo azulado. Este fenómeno es conocido con el nombre de triboluminiscencia. El físico italiano Ignacio Galli lo atribuye al vapor que sale con presión por una fisura y genera una manifestación eléctrica.

-En su revista dominical del mismo día, este diario publica algunos testimonios:

"Todo el cielo se iluminó en segundos y según una amiga que vive en Pisco, los pescadores contaron que habían visto como se abría una fosa en el mar y de allí salían unos rayos de luz hasta el cielo." (Juan Carlos)

¿Acaso el fin del mundo? El terror llegó con una luz que para unos fue blanca, para otros amarillo, aunque también se dice que era naranja, violeta o carmesí. Sea como fuere, el cielo se iluminó:

“Me sorprendió mucho ver una luz blanca como de trueno” (Sandra).

“Cambiaba de verde a púrpura, además escuché un ruido” (Yanira);

“Observamos fulgores, parecían fuegos artificiales” (Marco Antonio).

El Diario Regional La Voz de Ica, día 22 de Agosto del 2007

Este diario publico algunos testimonios de la población. La joven Marilyn Ponce, de 23 años de edad, trabajadora del hotel Paracas de Pisco, cuenta como en su huída tuvo que subir a un cerro ubicado cerca de la playa desde donde vio como el mar arrasaba con las viviendas. “El agua crecía y en medio del mar se producían truenos y relámpagos, al mismo tiempo que caían estrellas fugaces. Parecía el fin del mundo.” Aquella noche, amigos, familiares, vecinos, etc. infinidad de personas ubicadas en las ciudades, pueblos, distritos de las regiones de Ica y Lima fueron testigos de luces, explosiones, flashes, rayos, relámpagos, luceros, chispas, “estrellas móviles”, “estrellas fugaces”, “meteoritos”, esferas e incluso formas de platillos, todos estos de los más diversos colores, como blanco, azul, amarillo, rojo, violeta, etc. A raíz de este fenómenos salían explicaciones algunas científicas y otras no tan científicas.

El Diario Extra de Lima, día 31 de Agosto del 2007

Este diario publica la siguiente noticia sobre un posible origen del terremoto:

Bomba electromagnética habría provocado terremoto: Según versiones de los Servicios de Inteligencia de diversos países concluyen que el terremoto de Pisco y las luces misteriosas que aparecieron en los cielos tienen su origen en la utilización de bombas de pulso electromagnético sobre la atmósfera del cielo peruano. Estas armas conocidas como bombas electromagnéticas o bombas-E, son capaces de producir movimientos sísmicos e interrupción de los servicios de luz eléctrica y de comunicaciones, paralizando a todo un país como una forma de apreciar la capacidad de respuesta ante determinadas circunstancias.

Conocida además como bomba de pulso electromagnético de gran altitud, bomba del arco iris o bomba de los pobres, ofrece los mismos efectos de las armas nucleares, con la salvedad que no destruye vidas humanas en forma directa y ni calcina las ciudades pero causa grandes movimientos sísmicos (inclusive a nivel continental) y diversos fenómenos atmosféricos como las mencionadas luces, iluminando grandes áreas del firmamento, originando un gran impacto psicológico en la población. Este armamento de alta tecnología ya habría sido utilizado por las fuerzas armadas de los EEUU en Irak, en la que según informaciones, produjo fuertes terremotos con miles de pérdidas humanas, y con la finalidad de dejar a ciegas los sistemas de defensa electrónicos iraquíes, ante la inminencia de un ataque aéreo y terrestre a sus fuerzas.

En general, la prensa llega a publicar poco sobre este fenómeno, llevados quizás por el desconocimiento sobre su origen. A la fecha nadie puede decir realmente que ocurrió o cual fue el origen de dichas luces y solamente discuten comentarios algunos científicos y otros no tan científicos, aunque como de costumbre parte de la prensa asocia lo desconocido a problemas políticos.

HIPOTESIS SOBRE LAS LUCES PRODUCIDAS POR TERREMOTOS

A fin de intentar explicar la aparición de luces durante la ocurrencia de los terremotos, muchos investigadores han propuesto diversas hipótesis que pueden o no sustentar realmente la fuente que originan estas luces. A continuación se describe brevemente algunas de ellas.

Triboluminiscencia: Efecto conocido también como triboelectricidad, y consiste en la producción de luz ó cargas eléctricas como respuesta a la tensión mecánica expresada al golpear, rozar, triturar algunos minerales (El fenómeno de la triboluminiscencia fue descubierto en 1605 por Sir Francis Bacon, quien observó la emisión de luz al raspar un terrón de azúcar con un cuchillo). Aunque no se conoce muy bien el fenómeno, la luz es resultado de la reacción con el nitrógeno atmosférico y produce una luz del mismo color que la causada por el nitrógeno en las auroras boreales, Azul. Cuando chocan las placas tectónicas presionan al cuarzo y a otros cristales en ciertas regiones y por breves periodos. Esto causa que los enlaces atómicos, al romperse, produzcan plasmas y ello origina la emisión de luz visible.

Según García y Millán (2004), en los grandes terremotos se ven luces de varios colores en el cielo debido al fenómeno de la triboluminiscencia, aunque en el caso de las luces rojas y verdes no hay descripción ni explicación segura. Si bien el color podría modificarse por los minerales presentes en el suelo, tampoco se descarta que se trate de un fenómeno atmosférico. Sin embargo, queda la pregunta ¿este efecto produciría suficiente energía como para explicar la presencia de luces en la atmósfera?.

Luminiscencia: Este efecto indica que la energía puede ser emitida en la frecuencia de la luz visible, cuyas causas de alguna forma están asociadas al movimiento de la Tierra. Este proceso implica dos pasos: 1) la energía inicial hace que los electrones de los átomos del material luminiscente se exciten y salten de las órbitas internas de los átomos a las externas; 2) cuando los electrones vuelven a su estado original, se emite un fotón de luz. El intervalo entre ambos pasos puede ser corto (menos de una cienmilésima de segundo) o largo (varias horas). Cuando el intervalo es corto, el proceso se denomina fluorescencia; cuando el intervalo es largo, fosforescencia. En ambos casos, la luz producida es casi siempre de menor energía; es decir, de mayor longitud de onda que la luz que produce la excitación.

P-Agujero: Esta hipótesis se basa en las propiedades eléctricas de las rocas, las que están llenas de átomos de oxígeno en estados cuasi-ionizados, enlazados a los silicatos. Cuando se rompen los enlaces resultan un par de agujeros de carga positiva denominado P-Agujero --como sucede en los semiconductores-- los que se comportan como cargas eléctricas. Al contrario que los electrones, los agujeros de carga positiva son capaces de desplazarse a través de las rocas cuando son sometidas a grandes presiones. De hecho, se ha visto que en el laboratorio puede recorrer unos cuantos metros, por lo que se piensa que en la naturaleza, y con las grandes fuerzas que aparecen en los terremotos, podrían recorrer kilómetros.

Durante un terremoto, las rocas están sometidas a tal presión o estrés que esos portadores de carga se mueven a través de las rocas ígneas, dando lugar a ondas electromagnéticas en el rango de las de radio y de la luz visible. En un terremoto, una nube de estos agujeros de carga positiva es liberada del subsuelo, la que surge como un plasma de estado sólido a la atmósfera, ello origina emisión de luz visible, infrarroja, ruido electromagnético y perturbaciones en la atmósfera.

Piezoelectricidad: Es un fenómeno presentado por determinados cristales que al ser sometidos a tensiones mecánicas adquieren una polarización eléctrica en su masa, apareciendo una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie. Este fenómeno también se presenta a la inversa, esto es, se deforman bajo la acción de fuerzas internas al ser sometidos a un campo eléctrico. El efecto piezoeléctrico es normalmente reversible: al dejar de someter los cristales a un voltaje exterior o campo eléctrico, recuperan su forma. Los japoneses Musya y Terada opinan: "Los movimientos de tierra producen tensiones en las rocas cristalinas por las cuales el efecto piezoeléctrico genera campos eléctricos de varios miles de voltios por

metro. Estos campos electromagnéticos se concentran en las áreas de más susceptibilidad, como lo son las líneas de falla. Teóricamente estos campos pueden crear la ionización de un bajo nivel de las moléculas de aire adyacentes a la columna eléctrica que se proyecta a través del terreno”.

Fotoluminiscencia: Es la luminiscencia que se produce cuando determinados materiales son irradiados con luz visible o ultravioleta. Este fenómeno ocurre, por ejemplo, en pinturas fosforescentes.

Calor: Generado por efectos de la fricción dentro de la falla (subducción) lo que podría calentar partículas o encender gases del interior de la Tierra. Sin embargo, el calor no se movería rápidamente, y no hay en la mayoría de lugares suficiente gas (como metano). Este es un fenómeno conocido desde el siglo XVIII, y se observó que bajo presión o fricción los cubos de azúcar emiten luz.

Radiación: El gas de Radón es un gas radiactivo que se encuentra en el subsuelo y sería liberado por efectos del terremoto a través de granos de mineral fracturados cuya radiación ioniza el aire causando la luminosidad. Cabe señalar que la emisión de radón durante algunos terremotos es real, pero la cantidad no sería suficiente para explicar las luces en la atmósfera.

Fluorescencia y Fosforescencia: Ambos fenómenos tienen numerosas aplicaciones prácticas. Los tubos de imagen de las televisiones están recubiertos de materiales fluorescentes que brillan al ser excitados por un rayo catódico. El interior de un tubo fluorescente también está recubierto por un material similar, que absorbe la radiación ultravioleta—invisible pero intensa— de la fuente primaria de luz y emite luz visible. En un láser se produce un tipo especial de fluorescencia denominado emisión estimulada.

Electroluminiscencia: Causado por un gas que ha sido recorrido por una descarga eléctrica, tal como ocurre, por ejemplo, en los relámpagos o en una lámpara fluorescente.

Roentgenluminiscencia: Producida por los rayos X al bombardear determinados materiales como el recubrimiento de un fluoroscopio (la pantalla de un aparato de rayos X).

Quimioluminiscencia: Provocada por una reacción química; y ocurre, por ejemplo, cuando el fósforo amarillo se oxida en el aire produciendo una luminiscencia de color verde.

Sonoluminiscencia: Solo observable en algunos líquidos orgánicos, y es producida por ondas ultracortas de sonido o ultrasonidos.

Potenciales de corriente: Los fluidos moviéndose en estrechas grietas tienden a volverse eléctricamente cargados—pero no fuertemente.

Energía interestelar: Alteraciones Planeto-físicas que se estarían produciendo actualmente en el interior de la Tierra causadas por materia altamente cargada y una no-uniformidad energética en el espacio interestelar, el cual ha irrumpido en el área interplanetaria del sistema solar (Heliosfera). Esta donación de energía estaría produciendo procesos híbridos y estados de energía excitada en todos los planetas, así como en el sol. (Dr. Alexey Dmitriev miembro de la Academia rusa de Ciencias). El planeta Tierra no se mantiene exento a este proceso y presenta efectos ionosféricos, geoelectromagnéticos, climáticos, biológicos y ecológicos, al ir atravesando todo el sistema solar en su conjunto por una zona de discontinuidad energética que llegaría desde el centro de la galaxia a través de un cinturón fotónico de alta energía.

OVNIS ó Meteoritos: La presencia de objetos voladores no identificados durante catástrofes naturales es una constante que se ha venido repitiendo a lo largo de la historia en diferentes pueblos del mundo ó la caída de meteoritos incandescentes, lo cual es improbable.

De acuerdo a las características de estas hipótesis, unas mas increíbles que otras, la única que tiene mayor aceptación es la “P-Agujero (c)” propuesta por el físico mineralógico Friedemann Freund, 2003 (centro del vuelo espacial de Goddard de la NASA). Este autor explica que a consecuencia de un terremoto, se origina una nube de P-Agujeros de carga positiva que es liberada del subsuelo, la que surge como un plasma de estado sólido a la atmósfera, ello origina emisión de luz visible, infrarroja, ruido electromagnético y perturbaciones en la atmósfera.

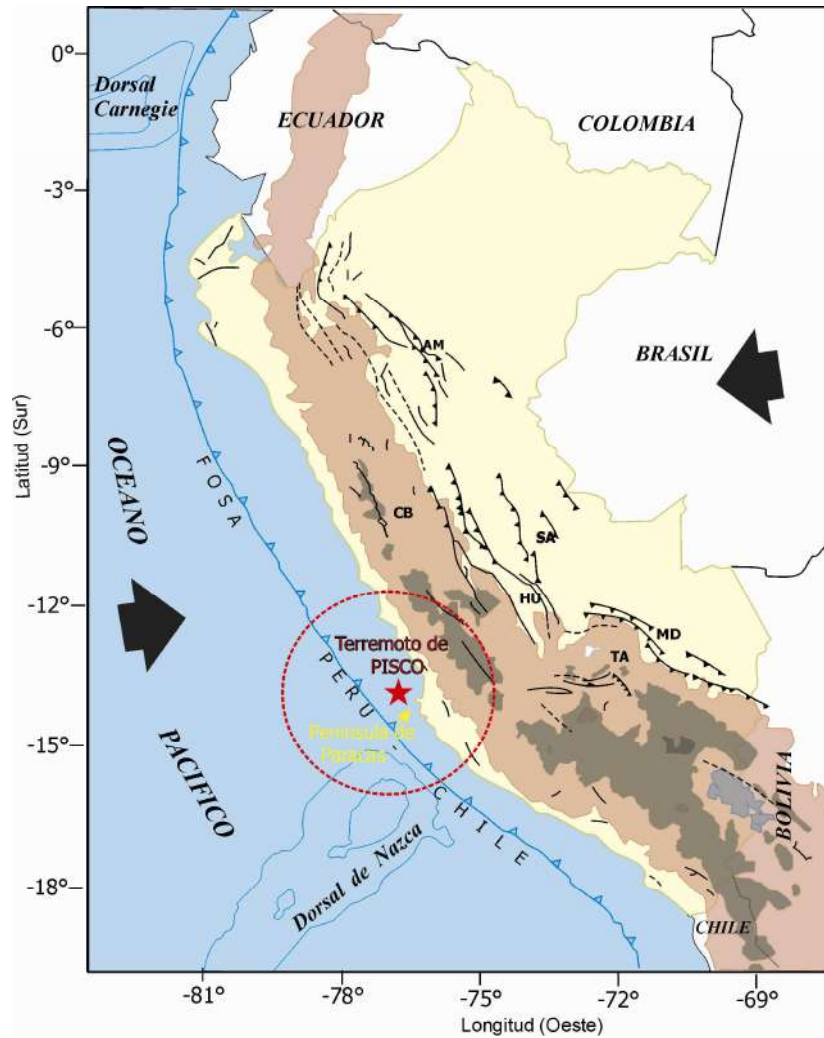


Figura 7.- Esquema sismotectónico en superficie para el Perú. Las flechas grandes indican la dirección de la convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana. La estrella la ubicación epicentral del Terremoto de Pisco. El círculo de color rojo indica la zona sismotectónica donde ocurrió el sismo (al NO de la Península de Paracas, extremo norte de Dorsal de Nazca y cambio en la orientación de la línea de costa)

Las luces ocurren antes, durante y después del terremoto, con colores blancos y/o coloreados (azulado o rojizo), generalmente débiles, pero son a veces más brillantes que la luna. En general, toman varias formas como globos, vendas, rayos, hojas, nubes y tienden a salir del interior de la Tierra por el mar. Estas luces pueden oscilar o brillar constantemente, siendo silenciosas o acompañadas por un chisporroteo y/o sonido que se eriza. La emisión de la luz del interior de la Tierra tiene formas a veces de las llamas de fuego y puede ser tan breves como el relámpago o brillar intensamente por varios minutos. Las luces de los terremotos han sido acompañadas por ruido de radio de baja frecuencia, entre los 10 a 20 kilociclos de

gama. Estas luces se han observado semanas antes o después de terremotos y a centenares de kilómetros de su epicentro.

Asimismo, se debe indicar que el mayor número de terremotos en los cuales se observó estas luces se ubican en una zona con alto potencial sísmico asociado a elementos sismogénicos adicionales como es la llegada de Dorsales Marinas, Rifts y otros. En el caso del Perú, el terremoto de Pisco tuvo su epicentro próximo a la Dorsal de Nazca y Península de Paracas (Figura 7). Cabe comentar, que dos personas que estuvieron presentes durante el terremoto de Chimbote ocurrido en la costa de la región central de Perú el 31/05/1970 (7.7 M), observaron también luces que salían del mar hacia el cielo y en este caso, en la zona afectada se encuentra la Fractura de Mendaña.

CONCLUSIONES

A fin de explicar el origen de las luces que muchos afirman haber visto en el cielo durante el terremoto de Pisco, se llega a las siguientes conclusiones:

- El fenómeno luminoso asociado a un terremoto ocurrió hace más de 300 años antes de nuestra era y fue descrito por los griegos como "grandes columnas de fuego", el cual sólo fue reconocido por la comunidad científica cuando fue capturado en fotografías tomadas durante la secuencia de terremotos ocurridos en Matsushiro (Japón) entre los años 1965 y 1967. Sin embargo, a la fecha no existe una explicación satisfactoria para conocer el origen de las luces, pero si el interés de seguir investigando.
- La teoría de mayor sustento para explicar este fenómeno es la del P-Agujero. En un terremoto, una nube de estos P-Agujeros de carga positiva es liberada del subsuelo, la que surge como un plasma de estado sólido a la atmósfera, ello origina emisión de luz visible, infrarroja, ruido electromagnético y perturbaciones en la atmósfera.
- El terremoto de Pisco (7.0ML, 7.9Mw) asociado al proceso de subducción de la placa de Nazca y Sudamericana, ha liberado energía equivalente a aproximadamente 6'270.000 ton de TNT. Esta energía produjo un proceso de ruptura compleja alrededor de La Península de Paracas durante aproximadamente 110 segundos y que no ha sido observado en anteriores terremotos ocurridos en Perú.

- El fenómeno de las luces en el cielo solo fueron observados en las provincias ubicadas al SO del departamento de Lima y NO de Ica con un claro efecto de directividad, asociado a la geomorfología de la costa y contacto de placas que podría haber permitido que La Península de Paracas actuara como una pared direccionando la energía liberada por este terremoto hacia el NO.
- Las luces en el cielo asociadas a terremotos son fenómenos naturales producidos en la Tierra y asociados a la liberación de grandes cantidades de energía a consecuencia de eventos naturales como los terremotos. Queda descartado que sea OVNIS, meteoritos o presagios para el fin del mundo.
- Una vez mas queda demostrado que la naturaleza es compleja pero a la vez muy sabia. Este fenómeno aun no se puede explicar completamente debido a que los científicos jamás desecharían o aceptarían hipótesis sin apoyo de resultados experimentales, por tanto se sigue investigando hasta que finalmente se llegue a un consenso científico.
- A la luz de la información disponible es necesario disponer de equipos científicos que permitan registrar con mayor detalle estos fenómenos, pero esto será cuando ocurra un nuevo gran terremoto en Perú.

BIBLIOGRAFIA

Freund, Friedemann T., Rocks that Crackle and Sparkle and Glow: Strange Pre-Earthquake Phenomena. Journal of Scientific Exploration, 17, no. 1, p. 37-71, 2003.

Freund, Friedemann T. et al., Flow of Charges and Energy during Rock Deformation. Nature, 2003 (inpress).

St-Laurent, France, The Saguenay, Quebec, Earthquake Lights of November 1988 January 1989. Seismological Research Letters, 71, no. 2, p. 160-174, 2000.

Tsukuda, Tameshige, Sizes and some features of luminous sources associated with the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Journal of Physics of the Earth, 45, no.2, p. 73-82, 1997.

<http://earthquake.usgs.gov>

<http://geology.about.com/od/earthquakes/a/EQlights.htm>

<http://www.amazings.com/ciencia/noticias/221206a.html>

<http://www.terremotoperu.pe/nu/>

<http://www.metacafe.com/watch/808325/>

<http://www.metacafe.com/tags/terremoto/>

TESTIMONIOS Y FENOMENOLOGIA DE LA LUMINISCENCIA COSISMICA DEL TERREMOTO DE PISCO DEL 15 DE AGOSTO 2007.

Leonidas Ocola y Ursula M. E. Torres

Instituto Geofísico del Perú
e-mail: geo_gps@geo.igp.gob.pe

RESUMEN

La parte central de la costa peruana, entre los paralelos 13° S y 15° S fue sacudida violentamente por un sismo de magnitud 7.9 Mw, el 15 de agosto de 2007, a las 18 h 41 min (T.L.). El sismo produjo una luminiscencia cosísmica de gran magnitud, y causó gran preocupación a la población en la zona epicentral, particularmente. La iluminación más intensa ocurrió en las áreas vecinas a las localidades de Tambo de Mora – Chincha Baja, y sur de la Península Paracas. El mecanismo para generar cargas eléctricas positivas por esfuerzos tectónicos en rocas ígneas y/o metamórficas de alto-grado de metamorfismo y la aceleración del flujo de cargas eléctricas a la superficie terrestre propuesto por Freund en 2003 es aplicable a la zona desestabilizada por el terremoto del 15 de agosto 2007. La colisión de las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana, en la dirección prácticamente E-W, crea esfuerzos permanentes y da lugar a la deformación del material de la corteza terrestre, y genera defectos positivos (“p-holes”) en el material rocoso, que al migrar a la superficie de la corteza crean una capa electrostática, que se incrementa con el tiempo. Las rocas bajo esfuerzos se deforman pasando del rango elástico al plástico y finalmente a la ruptura (cuando el sismo se inicia). Al ocurrir esta última etapa, el flujo de cargas a la superficie se acelera, a tal punto que se produce una serie de procesos fisicoquímicos en cadena en la materia del aire de la capa límite, dando lugar a los fenómenos de luminiscencia, por la generación de radicales libres de corta duración y liberación de energía lumínica. Las condiciones dinámicas del plasma atmosférico, en la cavidad Ionósfera-Tierra y la gradiente eléctrica juegan un papel importante en la generación y evolución de la luminiscencia. En el estudio de los testimonios del sismo de Pisco, se ha tipificado los siguientes fenómenos luminiscentes: Destellos, estrellas fugaces, reventazones, rayos, iluminación tenue general duradera en el tiempo. La intensidad máxima ocurrió en las áreas epicentral y proximal (distancias menores a 50 km del límite de la proyección de la zona de ruptura en la superficie terrestre). Luminiscencia cosísmica también se observó en el sismo (Magnitud: 6.1 Pas) de Arequipa del 9 de marzo de 1960.

INTRODUCCION

Uno de los fenómenos cosísmicos extraordinarios que ocurrió el 15 de agosto del 2008, fue las luces atmosféricas observadas en una extensión territorial muy grande. Este fenómeno se observó con una intensidad extraordinaria y causó gran alarma, preocupación e impacto en las personas, particularmente, en la zona epicentral. La preocupación se generó por la intensidad y lo inusual de la fenomenología. Sin embargo, este fenómeno no es el primero que se observa en el Perú. El 9 de marzo de 1960, se observó luces en las ciudades de Arequipa, Mollendo y Camaná, durante un sismo de magnitud 6.1 Pas. Al final del presente documento, se hará una breve descripción de los testimonios recabados.

El sismo del 15 de agosto 2007 se inició a las 18 h 40 min 50 s (Tiempo Local), frente a las localidades de Tambo de Mora – Chincha Baja, a una profundidad de 40 km y con una magnitud de 7.9 Mw (Tavera et al., 2007). El sismo desestabilizó una región con proyección en la superficie terrestre de ~200 km de largo por ~100 km de

ancho, en promedio. Un elemento notable en la fenomenología de esta fuente sísmica es la rotura de dos asperezas: Una frente a Tambo de Mora - Chíncha Baja, y la otra frente a Sacasemita-Lagunillas: Sector sur y oeste de la Península Paracas, Figura 1. La primera es más profunda, la segunda es más superficial y más cerca de la fosa marina, y el tiempo de ruptura entre las dos asperezas es de 60 segundos (Perfettini, 2008). La rotura de las asperezas corresponde a los dos máximos de las sacudidas sísmicas del terreno en la superficie, según documentan los registros sismológicos del IGP (Tavera et al., 2007). La duración del sacudimiento del suelo fue extraordinaria, más de dos minutos. Ocurrió un gran número de réplicas. Muchas de ellas sentidas por la población, especialmente, en la zona epicentral. Tavera et al. (2007) reportan un registro de 3060 réplicas en las estaciones sísmicas de Guadalupe y Zamaca a 150- y 180-km del epicentro, respectivamente. Ambas localidades están muy cerca al límite de la proyección, en la superficie del terreno, del límite de la zona de ruptura. Este gran número réplicas implica que entre la ocurrencia del sismo y el 27 de agosto, hubo 10-11 réplicas por hora.

La severidad de sacudimiento del terreno en superficie fue más violenta en la vecindad de Tambo de Mora, frente a la aspereza A1, y en la vecindad de la aspereza A2: Sacasemita-sur de la Península Paracas. En la vecindad Tambo de Mora, la violencia de la liquefacción de terrenos fue extraordinaria y las grandes aberturas, eyección de chorros de agua, hundimiento de viviendas, etc., fueron espectaculares. En la vecindad de la aspereza A2, los terrenos fueron más competentes: En las limolitas Paracas, se produjeron muchas grietas, como se muestra en la Foto 1. Esta grieta está en terreno seco, lejos del borde del acantilado que da a la playa Sacasemita. Esta es la zona de máxima violencia del sacudimiento sísmico.

El presente documento tiene por objetivo documentar las condiciones físicas en las cuales se produjeron las luces cósmicas del terremoto de Pisco del 15 de agosto del 2007, resumir los testimonios de las observaciones de campo de los pobladores en el territorio afectado por el sismo. Así mismo, se describe brevemente experimentos de laboratorio relevantes directamente a la producción de luminiscencia. Finalmente, se intenta sistematizar e integrar los informes sobre las diferentes etapas del fenómeno lumínico que se observó.

GEOLOGIA DE LA ZONA HIPOCENTRAL

Mecanismos aceptados para explicar la generación de luminiscencia en la naturaleza requieren la existencia de rocas en las cuales, por procesos naturales, generen internamente cargas eléctricas o sean portadores de las mismas. Las rocas ígneas y las rocas metamórficas de alto grado de metamorfismo son consideradas como las más favorables, así mismo, las rocas sedimentarias porosas que faciliten el desarrollo de voltajes al paso del agua salina. Los elementos geológicos y estructurales continentales, en el área epicentral y vecina, se muestran en la Figura 2. A lo largo de la Cordillera de la costa, de terrenos de elevaciones suaves y paralela al litoral, predominan los afloramientos de granitos, pórfiro granítico, granodiorita, y gabrodiorita del Paleozoico, el complejo gneisico del Precámbrico, y el batolito San Nicolás del Jurásico Inferior. El complejo basal Precámbrico está constituido por gneis, esquistos, anfibolitas, calcosilicatos (Fernández, 1993).

La Penillanura Costera, de 60 km de ancho promedio, está comprendida entre la Cordillera de la Costa y los Contrafuertes Andinos. En ella se asientan las principales ciudades de la zona, i.e., Ica, Pisco, Chincha Alta, Chincha Baja, Tambo de Mora, Cañete, entre otras. En la penillanura predominan los depósitos sedimentarios del Cenozoico, particularmente en la zona epicentral. Los depósitos Terciarios están constituidos por, según Fernández (1993): La Formación Paracas constituida por "limolitas claras amarillentas, lutitas con hojuelas, areniscas gravas fosfáticas gris verdosa, niveles bentoníticos; la Formación Pisco, en su parte marina está conformada por: Diatomitas, limolitas con niveles tufáceos, areniscas laminadas al techo y areniscas masivas fosilíferas a la base con niveles lenticulares de fosfatos; en su parte continental: Tobas, flujos piroclásticos, rhyolitas o dacitas conglomerados en la base. Son frecuentes los depósitos Cuaternarios de la Formación Cañete: Conglomerados, areniscas líticas gris oscuras, además, se presentan depósitos aluviales, eluviales, eólicos, y marinos. Las rocas sedimentarias Jurasicas-Cretácicas están representadas por volcánicos andesíticos, areniscas cuarzosas intercaladas con lutitas, calizas y volcánicos, volcánicos grises porfiríticos (Fernández, 1993). Las rocas plutónicas están representadas por dioritas, monzonitas y garbos (INGEMMET, 2008).

En la zona de las Estribaciones Andinas, el relieve es abrupto, profundamente disectado por numerosas quebradas y ríos. Las quebradas son profundas, de paredes

escarpadas (Fernández, 1993). En esta zona predominan las rocas plutónicas Jurásico-Cretácicas, constituidas por granodioritas, monzonitas, monzogranitos, tonalitas, dioritas, monzogabros, etc. , y las rocas sedimentarias predominantes son: Calizas, lutitas, areniscas cuarzosas, derrames volcánicos, volcánicos porfiríticos, etc. (IGM, 1975; INGEMMET, 2008).

La geología del margen continental se presenta en la Figura 3. Dicha figura es una reproducción parcial de uno de los resultados de Thornburg y Kulm (1981), quienes cartografiaron dos cadenas estructurales prominentes paralelas al patrón andino del continente. Una de ellas, denominada “Plataforma Submarina Alta” (Sigla en Inglés OSH, por “Outer Shelf High”) que resulta ser la extensión marina de la Cordillera de la Costa), y la otra es la “Cadena Sedimentaria de la Pendiente Superior” (Sigla en Inglés USR, por “Upper Slope Ridge”). Entre las dos cadenas se desarrollan varias cuencas sedimentarias, siendo prominente la cuenca de Pisco, subdivida por la OSH en la cuenca de Pisco Oriental (EP: Figura 3) que continua en el continente hacia el sureste, y la cuenca de Pisco Occidental (WP). Thornburg y Kulm (loc. cit.) infieren que la litología de la OSH está constituida por rocas cristalinas paleozoicas y precámbricas y metasedimentos, en base de las exposiciones en las islas marinas, litología de pozos perforados que alcanzaron basamento, modelaje gravimétrico e información de velocidades de propagación de las ondas sísmicas. La densidad requerida para satisfacer la anomalía gravimétrica del OSH es 2.7-2.8 g/cm³, y velocidad de propagación de las ondas compresionales del subsuelo de 5.9-6.0 km/s. Por otro lado, por otras evidencias, Thornburg y Kulm (loc. cit.) creen la USR está constituida por sedimentos deformados, con una velocidad de propagación de las ondas sísmicas compresionales de 4.1 km/s, en su parte superficial. Una interpretación estructural de Couch y Whitsett (1981) basada en información gravimétrica y sísmica de la transición océano continente, a través de la cuenca de Pisco, se muestra en la Figura 4. La ubicación del punto FM de la sección se indica con una X y un punto en la Figura 3. El espesor máximo de los sedimentos de cuenca de Pisco Oriental es de 2.2 km, según la interpretación gravimétrica. Se asume que la litología de esta cuenca es similar a la descrita para la peniplanicie descrita supra, por su continuación marina.

Finalmente, es propio recalcar que según los mapas de basamento, el Masivo Precámbrico Arequipa llega, por la costa, hasta Paracas (Dalmayrac et al., 1980). El extremo NW de la zona de ruptura del sismo de Pisco del 15 de agosto 2007 coincide,

aproximadamente, con la discontinuidad de OSH, como se puede apreciar en la Figura 3.

CONDICIONES ATMOSFERICAS, OCEANOGRAFICAS Y ASTRONOMICAS

Las características físicas de las luces cosmósmicas observadas en el territorio peruano dependen de las características de las emisiones lumínicas en la fuente y de las propiedades físicas del medio por el cual se propaga la luz. Los lugares más lejanos donde se vio la luz son Huaura y Huacho, que están aproximadamente a 4° de distancia desde el extremo sur de la zona de ruptura del sismo. Esta situación, para una atmósfera homogénea de una esfera terrestre de radio promedio (6,371 km), la luminosidad debía alcanzar una altura, en la fuente, de ~16 km, sobre la superficie del terreno, i.e., pudo haber alcanzado hasta la parte inferior de la estratosfera. De todas maneras, la propagación de la luz más allá de la fuente pudo involucrar la tropósfera en su integridad

Desafortunadamente, no se pudo conseguir la información de las estaciones meteorológicas del área de observación. Sin embargo, se cuenta con la información de los aeropuertos de Nazca, Pisco y Lima. Es decir, se tiene la información en el área de fuente lumínica, y en los extremos sur y norte donde se cuenta con testimonios. Según la información disponible, el firmamento en Nazca y Pisco estuvo despejado. El aeropuerto de Jorge Chávez estuvo cubierto con nubes ST a 540 m de altura, condición que aproximadamente se mantuvo hasta las 21 h.

Por otro lado, según el Boletín Meteorológico Diario del COEN (2007), las condiciones meteorológicas pronosticadas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) para la costa central y sur del 15 de agosto eran: Vientos del sur hasta 20 km/h. Asimismo, el pronóstico de la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú (DHN) sobre las condiciones oceanográficas fue de oleajes anómalos en el litoral de la costa sur y centro del país, con una intensidad moderada en la tarde del día 15 de agosto a fuerte intensidad en la madrugada del jueves 16 de agosto, con vientos de moderada a fuerte intensidad en el litoral: Area aproximada Atico-Cañete, por vientos con velocidades de 37-44 km/h. Según DHN (2007), el oleaje anómalo de moderada intensidad se inició alrededor de las 15 h (TL) en San Juan de Marcona. En La Punta (Callao) el mismo fenómeno se inició a las 16 h. El maremoto ocurre en condiciones de braveza del mar con fuertes

vientos del sur, oleaje anómalo de fuerte intensidad. Estos pronósticos se cumplieron esencialmente (Ocola, 2008). Los vientos, la actividad del oleaje y el impacto del maremoto hicieron que en el ámbito marino cambiara continuamente la composición y estructura de la capa atmosférica límite y la parte inferior de la tropósfera, con predominancia de fenómenos turbulentos, probablemente.

Un factor importante en la interpretación y tipificación de los fenómenos luminosos cosmicos es la información astronómica sobre el sol y la luna. El ocaso del sol en Pisco fue a las 18 h 01 min. La luna estuvo en la fase de "luna nueva" con 8-9% de su disco iluminado. El tiempo local del ocaso fue: 20:16 h en Nazca, 20:21 h en Pisco, 20:26 h en Huacho. La elevación de la luna sobre el horizonte, al tiempo de ocurrencia del sismo de Pisco, en la zona de Pisco fue 22° 44'.

El fenómeno que se trata de describir es un fenómeno electromagnético disparado por una acción sísmica que afectó no solamente la capa límite inferior de la atmósfera sino también las capas atmosféricas superiores. Siendo un fenómeno eléctrico, es importante considerar, brevemente, las propiedades de la cavidad natural Tierra- Ionósfera.

Para condiciones atmosféricas moderadas (en inglés: "fair weather"), existe una diferencia de potencial de 200,000 a 500,000 Voltios entre la superficie de la Tierra y la ionósfera, con un flujo de corriente de 2-3 pA/m², Figura 5. Medidas actuales indican que un promedio de casi un Ampere de corriente fluye a la estratosfera durante la fase activa de una tormenta típica. Por tanto, para mantener el flujo de la corriente global de las condiciones atmosféricas moderadas, en cualquier momento deben estar activas una o dos mil tormentas (GHCC, 2008). En la cavidad Tierra- Ionósfera se producen continuamente iones pequeños por radiólisis de las moléculas del aire. Según Harrison (2008), hay tres fuentes mayores para producir iones en el aire: isótopos de radón, radiación gamma terrestre y rayos cósmicos. Los dos primeras predominan en la parte inferior de la atmósfera, particularmente, en la capa límite. La radiación cósmica contribuye con el 20% de la ionización en el continente, aumentando el porcentaje con la altura. Por tanto, se establece un circuito eléctrico atmosférico global constituido por el balance entre las cargas generadas en las regiones con condiciones atmosféricas perturbadas y una corriente globalmente distribuida de iones pequeños que fluyen en las regiones de condiciones atmosféricas moderadas ("fair weather"), Figura 5.

Harrison (2008) provee el siguiente resumen de las propiedades del circuito eléctrico de la atmósfera terrestre:

Gradiente del potencial en superficie (GP)	: 120 V/m
Densidad de corriente de conducción vertical	: 3 pA/m ²
Conductividad del aire (nmm)	: 20 fS/m
Potencial ionosférico	: 240 kV
Resistencia total de la atmósfera	: 230 Ω
Corriente total aire-tierra	: 1,800 A.
Resistencia columnar	: 120P Ω m ²

TESTIMONIOS DE OBSERVACIONES DE LUCES COSISMICAS Y DOCUMENTACIÓN GRAFICA

En la Figura 1, se muestra la proyección en superficie de la zona de ruptura, indicando la ubicación del epicentro, el epicentroide y las dos Asperezas. En la Figura 6, se localizan los sitios donde se cuenta con testimonios de personas presénciales. En esta sección, los resúmenes de los testimonios se organizan en función de las distancias con respecto a la proyección en la superficie terrestre de los límites de la zona de ruptura. Se consideran las siguientes áreas: Area Epicentral: Las localidades que están en la proyección de la zona de ruptura, Area Proximal: desde el límite exterior de la proyección en superficie de la zona de ruptura hasta una distancia de 50 km, Area Intermedia: la franja entre 50- y 150-km del borde de la proyección de la zona de ruptura, y el Area Distal a distancias mayores a 150 km. De los testimonios obtenidos, es evidente que nadie observó el fenómeno luminoso en su integridad. Los reportes dan información de alguna de las fases de los fenómenos luminosos ocurridos. La mayoría de los testimonios fueron grabados en cinta magnetofónica, transcritos, resumidos e interpretados. Los resultados de la interpretación se presenta en la Tabla 2, en términos de los códigos indicados en la Tabla 1.

En la sección siguiente, se resume los puntos más saltantes de los testimonios. Muchas personas manifestaron que no observaron todos los fenómenos por estar preocupados por la seguridad de sus familiares y de ellos mismos. Pero contribuyeron con lo que pudieron observar.

Testimonios de las Localidades en el Ares Epicentral

En el área epicentral están comprendidas las localidades de Maroma, Tunga, Chucho, Yumaque, Chaco Pampa, Pisco, San Clemente, Tambo de Mora y Chinchabaja.

Yumaque:

Un testimonio muy cercano al Area de la Apereza A2 es el del señor Dagoberto Acasiete, 25 años de pescador, residente de Pisco. El señor Acasiete pasó el terremoto en el agua. El 15 de Agosto, “el mar estaba en 98 llena y 18 marea. Eran las 6:35 p.m.” Entró con sus redes al mar, caminó, estaba oscuro, caló redes. Cuando estaba dentro del mar, el mar creció, lo levantó, le templó las redes, lo volteó, sacó la cara estaba de día, vio sus redes, vio todo. El mar lo “rechupa, lo tiempla”, ve luz medio morada, se zambulle para asegurar el gancho de la red con una roca y estando en medio del agua, empezó el “samacón” de derecha a izquierda. Levantó la cara, se oscureció. El mar lo jalaba de acá para allá. Después el mar se puso mansito. No se movía. Volteó, se aclaró, estaba de día. La primera vez vio la iluminación pero en la segunda vez vio la luz intensa, entre azul y morado, como “la de la soldadura autógena”, de color amarillo fosforescente, violeta fosforescente. Antes de que salga la luz, escuchó un sonido como “el rugir de un león bien feroz”, como “el de un avión F16, igualito como un rayo”. El señor Acasiete experimentó varias emisiones de luz.

San Clemente:

San Clemente es un Asentamiento Humano en la parte alta, aproximadamente 80-100 m sobre el nivel del mar, de donde se divisa de una manera excepcional Pisco, Paracas y el océano en su amplitud plena. En san Clemente, se obtuvieron varios testimonios. El más detallado y amplio es del señor Eduardo Ferreyros, residente de Pisco. El 15 de Agosto se encontraba en San Clemente “realizando sus actividades normales”. “Ocurrió el sismo, y en pleno movimiento, casi un minuto después, a la distancia en dirección al mar a lo lejos se veía que salía hacia arriba una luz blanca luminosa y en ese mismo momento, se veía pasar luceros y se perdían como estrellas. Era como cuando caen estrellas y se perdían, era como los castillos, reventaban y se abrían. Y luego una estela luminosa como un vapor, resplandor, y no terminaba y subía, subía y subía, del mar hacia arriba. Estando arriba, se iba iluminando, se formaba como una nube pero no era como un hongo, se ramificaba y ramificaba y seguían las estrellas cayendo en pleno terremoto. Se temía que estallara, que

explotara, y que se fuera a abrir el suelo. Y después de eso, en ese fragor de luz, se veía como una incandescencia tono medio rojizo, medio marroncito hasta que terminó el terremoto”.

“Emergió del mar hasta 1 a 2 minutos después del terremoto. Cuando emergía, era como cuando a un fuego usted le echa más material y sale un vapor, hasta eso. Termina el terremoto, deja de subir la incandescencia, sigue arriba manteniéndose la luminiscencia iluminando todo el terreno. Se ha visto un montón. Finalizó el terremoto, el resplandor se mantuvo por un instante, las estrellas dejaron de verse, quedó la sensación en el ambiente que esto seguía. Lo que se mantuvo arriba, durante la noche se veía que seguían desprendiéndose las estrellas como luceros, como luces de bengala hasta la madrugada. El espectáculo luminoso duró hasta las 3 ó 4 de la mañana, demoraba, se ramificaba como una coliflor, las puntas de los destellos eran más tenues”.

“Antes del terremoto, el cielo estaba despejado, nubes aquí, allá, despejado. Se da el sismo, todo el terreno como si las nubes se juntaran y la incandescencia ha ido cubriendo el terreno, no se veía estrellas, daba la impresión que las estrellitas se caían, antes de caer se apagaban, se iba ramificando”.

La señora Rosa Peña Lezama manifestó que “con la primer sacudida, empezó a caer estrellas hacia Pisco”. Así mismo, la Sra. Aydeé Vela, Av. Panamericana 940, reportó que “segundos después que empezó el terremoto hubo una luminosidad en el mar hacia la Bahía de Paracas, hacia mar adentro, de color rojizo, como si fuese un atardecer. Resplandores como cuando cae un rayo lejano. Duró hasta después de la segunda sacudida. En la madrugada, 1 – 2 – 3 de la mañana caían las estrellas como lluvia de estrellas con trayectoria Sur – Norte”. La Bahía de Paracas es la zona de ruptura de la Aspereza 2.

Así mismo, el señor Fernando Zaravia manifestó que “apareció una luz color rojizo, empezó segundos después del terremoto, duró, resplandores que aparecen y desaparecen, duró hasta después de la segunda sacudida. Vio estrellas en la madrugada, 1 - 2 – 3 de la mañana, coincidía con las réplicas, como lluvia de estrellas. Abarcaba de Sur a Norte lo que se observaba, y sobre San Clemente”. La señora Alejandrina Luque mencionó que “vio luz al frente, hacia el mar. De arriba se veían las estrellas. Cuando empezó el movimiento, se vio la luz, después quedó todo oscuro.

Color de la luz: color candela rojizo amarillento, de abajo hacia arriba. Duró con el primer movimiento, con el segundo no. Se sentían ruidos. Cuando se movía la tierra, salió la luz hacia arriba como cuando uno atiza el fuego, en el primer movimiento. Fue en todo el horizonte”.

Otro testimonio amplio es el del señor Johnny Ubilús, residente de San Clemente, El 15 de agosto, estaba en su centro de trabajo, la cabina de Internet, ubicada en San Clemente Parte Alta, al costado de la Panamericana. Cuando empezó el sismo, él estaba solo, con la reja cerrada con candado. Pensó que era un temblor más, pero “*cuando empezó lo bravo*”, no atinaba a abrir la reja, las llaves estaban en el bolsillo de su casaca. Por la ventana miró hacia el cielo, y salió la luz. La ventana tiene vista hacia el mar. Miró al frente, al horizonte, “*la luz color azul salió de abajo. Se abrió y desapareció. La luz alumbró bastante. Luz muy fuerte como la de la soldadura autógena, fuerte, bastante fuerte. Como un relámpago pero fuerte*”. Entonces pudo ver donde estaba el candado y pudo salir.

Después de salir de la cabina, se dirigió a su casa a encontrarse con su mamá y familiares y mudarse a la loza del coliseo que está al frente de su casa y a un nivel más alto, de donde se divisa claramente el mar. Reporta que tomó más atención y “*notó que cada 10 minutos caían estrellas. Era más o menos las 11 de la noche. Las estrellas cayeron hasta antes del amanecer*”. Una estimación del señor Ubillús es las 4 de la mañana. No podía asegurar “*si coincidían con las réplicas o era indistintamente. Lo que sí puede asegurar es: “La luz salió en el horizonte, al frente en el horizonte, bien en el horizonte y de color azul. Cuando llegó arriba la luz siguió azul”.*

La “*lluvia de estrellas como fuegos artificiales*” también fue reportada por una auxiliar del Colegio Cabeza de Toro a 16 km al noreste de San Clemente.

Pisco

En la ciudad de Pisco mismo fue difícil de obtener información sobre las luces sísmicas. Las personas estaban muy preocupadas por su supervivencia y seguridad personal. El señor Edgar Alaña Acevedo pasó el terremoto en Pisco y manifestó que “*la tierra se movía como el mar... Remeció un poquito y salió la luz, una luz que salió del mar, color candela. Se vio que reventó, tipo fuego artificial que se esparce. Fue durante el sismo. Terminó antes del sismo.*” Pescadores de la playa de San Andrés,

en el muelle y áreas vecinas, manifestaron: *“Cayeron luceros. 3 a 4 minutos cayeron luceros al mar. Iluminaban parte del muelle. La luz salió del mar hacia arriba”. “Una explosión. Se incendió el cielo. Luego vino el maremoto. Del norte, se puso como de día un ratito y desapareció. Luz intensa por San Gallán.”*. San Gallán es una isla que está a 30 km de Pisco.

Un residente de San Clemente, que trabaja en el Banco de Crédito en Pisco, ubicado en la Plaza de Armas, manifestó: *“Al momento del sismo, me encontraba dentro del Banco. El movimiento lo pasé caminando hacia la salida del Banco. Cuando salí, todo el ambiente estaba lleno de polvo. Salí a un sitio despejado, más arriba de la Plaza de Armas. Vi una luminosidad, porque vi hacia arriba. Era amarillenta rojiza, cubría zonas como nube tendida, como cuando hay evaporación, como cuando la nube empieza de poco a poco, el color rojizo iba a más intenso. 5 – 6 de la mañana, seguía rojizo. Cuando salió el sol ya no se vio”*.

El señor Oswaldo Lezama, que se encontraba en La Joya – parte alta de la explanada de Pisco, reportó *“un resplandor como si fuera una explosión en Cechín (Gas de Camisea) y luego cayeron las estrellas”*. La planta de Gas de Camisea se encuentra cerca de la playa.

Chaco Pampa:

Chaco Pampa es un terreno descampado, sin construcciones. El señor Richard - guardián del fundo Chaco jurisdicción Paracas, informó: *“Estaba en su chocita escuchando música cuando empezó el terremoto. Salió durante el terremoto, se sintió como un poquito mareado. Vio como un rayo blanco de sur a Noreste, siendo el sur hacia la Reserva Paracas. Vio una cosa blanca que cayó, como una estrella de color blanco, en el noreste. No escuchó ningún sonido. Al rayo lo vio después del terremoto.”*

El Chucho

El Chucho es una playa de pescadores. En este lugar se contó con el testimonio del señor Nemesio Sarmiento Palomino, quien además fue nuestro guía en las investigaciones a lo largo de las playas al sur este de Paracas. El movimiento del terremoto lo sintió como una licuadora. Lo sacudía para arriba y de un costado a otro. Saltaba para no caerse. El señor Sarmiento dice *“que se puso clarito; vio resplandor de luz blanca, como luces, durante el sismo. Luces como círculos que ponen para*

arriba. Salieron del mar para arriba, a lo lejos en el horizonte, hacia el norte. El cielo se puso claro. Los rayos eran como reflectores que se usan en eventos importantes. Había media luna para caer. La luna se puso roja y estaba en el horizonte. El sonido fue como dos reventazones.”

Tunga y Maroma

El señor Richard Gutiérrez, trabajador de la Playa Criadero de Conchitas Tunga, manifestó: “*El día del terremoto, la tierra tenía ruidos, sonidos terribles y en cada fuerte sonido salía la luz como dos rayos. Alumbró la mar. Luz como estrellas fugaces apareció del agua para arriba.*”. En Maroma, el señor Walter Heinz manifestó que “*hubo luna nueva. A las 9 p.m. fue la llena*”.

Tambo de Mora.

Tambo de Mora es una de las localidades más cercanas al límite de la Apereza 1, en cuyo borde el NEIC localiza el epicentro, Figura 1. En esta localidad se cuenta con tres testimonios.

El señor Carlos Alberto Coto Puján, residente del Pueblo Cruz Verde. Avenida Cruz Verde, Tambo de Mora, manifestó: “*Toda la gente vio como caían luces sobre el mar. Iluminación tremenda. Las estrellas venían de norte a sur, en línea. Las estrellas caían al mar, eran lucecitas azulitas como la candela del gas. Los pescadores que estaban en las chatas del muelle y otros que estaban en alta mar dicen que vieron una bola de fuego, una bola roja que ha caído sobre el mar. La vieron al fondo, fondo, bien al fondo de altamar (horizonte). La noche quedó iluminada por buen rato. El ruido del terremoto fue extrañísimo, nunca antes se había escuchado algo así.*”.

Por otro lado, la señora María Bautista, Cruz Verde, Avenida Cruz Verde, indicó que: “*La noche se puso negra después que cayó “la luna”, era redonda, cayó en el mar, estaba clarito, después se puso negro. Nunca hubo antes una oscuridad tan intensa. Estuvo claro por la luz de “la luna”. Se veía todo. La “luna” cayó poquito a poco. Desapareció a las 9 de la noche. Cuando estuvo oscuro, las estrellitas comenzaron a caer. A la una de la mañana volvieron a caer estrellas. Caían y se apagaban.*”

El señor Rolando Rodríguez residente de Cruz Verde, esquina Sucre y la iglesia, Tambo de Mora, relató que: “*El cielo se puso rojo hacia el mar, hubieron dos*

rayos en el mar, antes de que termine el terremoto. Como al minuto que empezó el terremoto, el cielo se puso rojo. Todo se puso como neblina durante el terremoto, como humo oscuro. Al minuto que empezó el terremoto, se puso el cielo rojo. Cuando fue más fuerte el sismo, la luz salió con fuerza”.

Chincha Baja

El testimonio se recogió en la Plaza de Armas de Chincha Baja: Señoras Giuliana, Alicia, Blanca y Eris. Residentes de Chincha Baja. Viven por donde hay chacras y estuvieron en sus casas, era hora de la cena, cuando empezó el terremoto del 15 de Agosto. Cuando salieron de sus casas, *“vieron el resplandor en el cielo, salió como un arco iris. Salió de abajo como un hongo, sonó feo, como cuando revienta una caja de luz, como cuando chocan cables, fue de color amarillo como candela, como cuando recién se enciende la candela y sale color anaranjado. Hubo sonidos, reventaba feo como fuegos artificiales. Duró un ratito y todo se quedó oscuro. Este fenómeno luminoso se presentó solo una vez. La luz se vio durante el movimiento. Terminó antes del sismo.”*

Testimonios de las Localidades en el Area Proximal

Como se menciona supra, la zona proximal se considera, en este documento, al área dentro los 50 km del límite de la proyección de la zona de ruptura en la superficie del terreno. Están comprendidas en esta área las siguientes localidades. De sur a norte: Caballas, Ica, Parcona, Humay, Huaya Chica, Cañete, Lunahuaná, Pacarán, y Asia Vieja, Figura 6.

Caballas

El señor César Quispe, pescador, se encontraba en su cabaña en el Puerto de Caballas. El señor Quispe manifestó que *“vio estrellas fugaces blancas”*.

Ica y Parcona

En la ciudad de Ica se contó con cuatro testimonios. El señor Percy Peña, portero del Colegio San Luis Gonzaga, manifestó: *“Se vio un resplandor amarillo al momento que empezó el terremoto. Era un amarillo medio anaranjado, aparecían estrellas fugaces del mismo color. 15 segundos después del terremoto, desapareció el resplandor. Las estrellas fugaces siguieron cayendo hasta la media noche”*. Así mismo, indicó que *“en Villacurí (a un kilómetro de Guadalupe), al costado del peaje de*

Ica, escucharon sonidos producidos por la luminiscencia”. El Presidente de la Asociación de Padres de Familia del Colegio Antonia Moreno de Cáceres, confirmó la ocurrencia de “una luz”.

En la Universidad Nacional de Ica (UNICA), el señor Víctor Versace Miranda manifestó: “El día del terremoto estaba de servicio en la puerta principal de la UNICA. Destelló como flash de la cámara en el oeste, iluminando esa parte del cielo”. Divisó en la parte norte que “caía como estrellas fugaces”. El se percató de esto inmediatamente después del terremoto. “Se repitió después de media hora la iluminación y la caída de estrellas una vez más”.

Así mismo, el Ingeniero Arturo Godoy Pereyra, que se encontraba en la ciudad de Ica, en el centro de la pista detrás de la oficina de obras públicas de la Municipalidad, indicó: “La iluminación empezó al instante del terremoto, en dirección hacia el mar”. Testigo miraba hacia el este, pero la captó al costado de su cara como flash de una cámara. “Duró un instante y no se repitió. La luz fue blanca”.

En Parcona, a 5-6 km al NE de la ciudad de Ica, el señor Julio Galindo Velásquez, residente de Parcona, manifestó que el sismo lo pasó en la esquina formada por la Calle Roma con la Calle Río de Janeiro. Estaba mirando hacia el oeste. Vio “una luz en dirección como hasta alta mar. Como una bomba que se estrelló, como un relámpago bien luminoso, con bastante como las luces de bengala, de abajo hacia arriba. Duró unos segundos. Las estrellas fugaces siguieron cayendo hasta la media noche”.

Humay

En Humay se contó con dos testimonios. Uno de ellos en una tienda vecina a la que fue casa de la Beatita de Humay. La señora, quien no dio su nombre, manifestó que: Era la hora de la cena cuando ocurrió el sismo. Salió de la casa. Se sentó y lloró, por el terremoto. Vio la “luz como un flash de color blanco y como luces de bengala. Hubo apagón. La luz vino del NO de la dirección de Chincha Baja, como quien mira al Cerro Media Luna desde Humay”. Por otro lado, la señora Consuelo (Concho), en su domicilio a unos 100 m del la Casa de la Beatita de Humay, dijo que vio “un resplandor como luz. Reventó como relámpago. Se escuchó sonido como el mismo temblor. Luz como el sol. Se puso el cielo rojo. Fue como un flash de abajo hacia arriba, fue

instantáneo como un relámpago. No observó estrellas fugaces. Todo el cielo se puso rojo”.

Huaya Chica

Huaya Chica está en la ruta hacia Huancano. Se contó con el testimonio del señor Antonio Cuba Saavedra, quien manifestó: Vio *“clarito como de día, como cuando hay luna llena. La luminiscencia duró y la luz era como luz de luna”*. No vio “estrellas fugaces, no hubo relámpagos. Todo era claro”.

Cañete, Lunahuaná y Pacarán

Se obtuvo un testimonio en Cañete, en un restaurante cerca de la Plaza de Armas de Cañete. La señorita, de nombre Lidia, manifestó: Cuando ocurrió el sismo, salió al patio interior de su casa porque es amplio. *“El cielo se puso blanco, todo blanco por la luz”*.

En Lunahuaná, se cuenta con el testimonio del señor Luís Zapata. El sismo lo pasó en su domicilio, en San Jerónimo de Lunahuaná, a pocos kilómetros de Lunahuaná. El señor Zapata indicó que vio *“hacia el oeste, un resplandor azul como un rayo. Como luz de fogonazo. Fue fugaz. Apareció en el segundo sacudón, el más fuerte. La trayectoria del rayo fue en arco de sur a norte. El color fue celeste claro. Lo vieron muchas personas”*.

Pacarán es un pequeño poblado en la carretera Cañete-Yauyos. El testimonio es de la dueña del Bar Bodega Muni, entre los kilómetros 53 y 52. La señora manifestó que vio *“un rayo que se fue para arriba hacia el cielo después de hacer un quiebre hacia abajo y luego volver a subir”*. Empezó amarillo rojizo color candela. Terminó plumizo”. Lo vio cuando terminó el primer “round”. *“Fue fugaz. Más o menos de 3 cm de ancho”*.

Asia Vieja

En Asia Vieja se cuenta con el testimonio de la señora Angela Ochoa y su familia. La señora Ochoa reportó que: Se fue la luz, tronó fuerte. Era como algo que revienta. Todo se iluminó. En Asia fue muy fuerte la luz. Cuando salió de su casa por el sismo, vio un rayo de colores, como arco iris de color rojo amarillo. Cuando empezó el segundo movimiento, la luz fue de tierra a playa. Vio rayo de luz que fue hacia el mar. Fuerte color. Tomando como referencia el espectro de la descomposición de la

luz, ella eliminaba el color rojo, pero el morado era intenso. Colores más amarillo y rojo, la forma de un arco. Sintió como algo que revienta. Todo se iluminó. (Fue corroborado el testimonio por los niños de la familia). Se puso blanco. Duró un instante, Un sonido sordo. Pasaron la noche en la pampa. Ella no vio un solo pescado muerto en la playa.

Testimonios de las Localidades en el Area Intermedia

En el área intermedia, se obtuvo testimonios en las siguientes localidades, de sur a norte: Marcona, Nazca, Palpa, San Jerónimo, Chilca, Yauyos, Callao, Lima y Chacabuco. A continuación, se hace un resumen de lo reportado en dichas localidades.

Marcona.

Se cuenta con el testimonio de la señorita Milagros, quien el 15 de Agosto se encontraba en el Asentamiento Humano La Isla, en Marcona, a 2 km de distancia del mar. La señorita Milagros vio la *“iluminación y estrellas fugaces. Hubo apagón del alumbrado eléctrico, pero como había ‘luna llena’, había claridad, por eso la gente podía ver”*.

Nazca y Palpa.

En Nazca, el Lic. Miguel Angel Ayquipa Antesana, gerente de Perú Nazca Tours, residente de Nazca, manifestó que: El día del terremoto estaba sentado en un restaurante. Salió a la calle y *“vio que el suelo se ondulaba como las olas del mar, los postes se mecían, se fue la luz”*; pero, se *“veía algo claro, color blanco. La claridad se fue antes de terminar el terremoto”*. Vio *“la claridad hacia el noreste”*.

En Palpa, se obtuvieron dos testimonios en el Colegio Raúl Porras Barrenechea. El primer testimonio fue del Profesor jefe de Laboratorio de Biología, Química y Física, quien reportó que *“vio una luminosidad color naranja tenue. La luminosidad difusa oscilaba como partículas que están oscilando. Empezó cuando se inició el terremoto. Cuando terminó el primer movimiento, se oscureció. La luminosidad fue al noroeste”*.

El segundo testimonio en Palpa fue de la Profesora Técnica en Laboratorio, Rosaura Rodríguez Gutiérrez, quien manifestó que: Ella se encontraba caminando por

la calle. A los segundos que empezó el terremoto, *“se puso todo clarito, clarito como de día todo el sector. Se oscureció cuando se calmó el primer movimiento”*. Vio *“como la “luna” se achatava, se jalaba, se deformaba, se movía por efecto de la iluminación.”*

San Jerónimo, Chilca y Yauyos

El sismo ocurrió cuando la señora Julia Castro se encontraba caminando en la carretera que conduce a San Jerónimo, justo donde la encontramos y le pedimos su testimonio. El valle es profundo, angosto y los cerros son altos. La señora Castro vio *“estrellas fugaces antes del primer movimiento fuerte. Lo suficientemente luminosas que alumbró como la luz de día. Las estrellas fugaces fueron blancas como la luz del tubo fluorescente”*. Las piedras de los cerros volaron y chocaron unas con otras y produjeron luces pequeñas, chispas.

En Chilca celebran la festividad de la Santísima Virgen el 15 de Agosto, y sacan en procesión la santa imagen. En esta localidad se logró la colaboración de dos personas. Una de ellas fue la señorita Luz Soledad, quien se desempeñaba como sahumadora y estaban en plena procesión, cuando ocurrió el terremoto. La imagen no se movió. Luz Soledad estaba parando mirando hacia el Sur, miraba hacia arriba. Hubo apagón, vinieron dos rayos y como que se cruzaban, chocaron. Eran de color amarillo, agachó la cabeza tapándose la cara con ambas manos y rezando a la Virgencita. Los rayos aparecieron cuando el primer movimiento fue más fuerte.

El segundo testimonio es de la señorita Cecilia. Ella estuvo en su casa, en su cuarto, cuando empezó el sismo. Cuando salió a la pista, el piso se hacía olas, la gente se asustaba. Vio *“luz en el noreste, color oscuro como violeta, morado parecido al espectro”*. Ella la vio *“antes que termine el terremoto. Los colores eran como el arco iris menos el rojo. Brilló y fue extensa después, como si se fuera esparciendo”*.

En Yauyos, la profesora Nelva Gómez Vargas, reportó que: Cuando ocurrió el sismo, salió a su patio, vio *“como un flash de cámara fotográfica, cuando el movimiento fue fuerte. La luz fue de color casi amarillento. Iluminó el ambiente menos que una luna llena”*.

Callao

El señor José Zaravia estuvo en el muelle del Callao trabajando en desembarco de harina de pescado para la empresa CPG. El señor Zaravia manifestó que: *“El piso se movía en forma de olas”. Vio “dos luces como si fueran explosiones, hacia el sur, hacia el horizonte del mar. Fueron dos destellos. La primera luz fue como explosión, la segunda fue rayo, color amarillo naranja, de abajo hacia arriba. Duró 4 a 5 segundos. A los segundos del primer movimiento, calmó un poco; y después ha retornado el movimiento con fuerza, ahí es donde se ha producido, donde aparecieron las luces”.*

Lima

En la ciudad de Lima se obtuvieron hasta once testimonios en diferentes localidades. Los más descriptivos y detallados son los siguientes:

Distrito de Chorrillos.

El señor Wenceslao Reynaldo Martínez Bobadilla, con domicilio en Chorrillos: Urbanización San Juan Bautista de Villa, localizado de 8 a 10 cuadras del mar aproximadamente, manifestó: El día del sismo, él se encontraba dentro de la casa, salió al patio, sintió la ondulación del piso, escuchó dos explosiones fuertes en su casa. Pensó que las produjeron los tres cables de alta tensión que pasan cerca de su casa. Pero no. Los cables estaban intactos. Las explosiones fueron fuertes, escuchó el ruido como dinamita que explotaba en el aire a 20 metros de altura sobre su casa. Fueron explosiones espontáneas. Los pobladores de Villa Marina también escucharon las explosiones. Estas ocurrieron en el momento de mayor sacudida del segundo movimiento. Las luces fueron de color blanquizco amarillento, menos intenso que el color de la candela, fugaces y sin eco, fue como una especie de bombardas que salen los destellos del centro y luego se esparcen formando círculo. Fueron simultáneas la explosión y la luz. Fue sólo luz y ruido. Duró lo que dura un flash de cámara. La primera explosión la vio completa, en la segunda se abrazaron los tres miembros de la familia que se encontraban en casa.

Distrito de Independencia

La señorita Audry V. Camacho Villegas, ingeniero civil, reportó que: Cuando empezó el terremoto, ella se encontraba en el laboratorio de estructuras del CISMID, Universidad Nacional de Ingeniería, bajó al patio. Vio como se movía el pabellón. Estando afuera y mirando al sur, vio una luz en el suroeste. Vio resplandores, luego un

destello. Se prendía una luz como si algo hubiese estallado, explotado, sin ruido, luz blanca con un poco de amarillos tenues, tirando para blanco, como un relámpago (lejano) en ese sitio. Se iluminó toda esa zona. Era un destello como un resplandor que nacía de la tierra, de abajo para arriba, de más o menos 3 cuadras de ancho. Empezaba abajo y luego se extendía como onda, como sol radiante. Lo vio durante el movimiento y casi finalizando el terremoto. Considerando que el sismo duró 3 minutos, lo vio a los 2 minutos y medio; fue como flash. No lo vio repetido.

Los Olivos

Al ocurrir el sismo, la Ing. Química Jessica Rodríguez se encontraba en uno de los locales del Mega Plaza de Los Olivos con su familia. Estuvieron en campo abierto. Vio *“el resplandor de un rayo al revés, color azulino. Iba de abajo para arriba por encima del techo de las casas. Duró lo que dura un flash. Apareció en el Sur hacia el mar”*.

Magdalena

La Bióloga Paola, profesional que trabaja en el Parque de la Leyendas, reportó que el 15 de Agosto, se encontraba en el límite entre Magdalena y San Isidro, saliendo hacia Jesús María. Vio *“la luminiscencia, a mitad y casi terminando el segundo sacudón. Vio dos a tres resplandores como relámpagos. Iluminó el cielo. Los relámpagos duraron más que un rayo normal, más o menos 3 segundos. Se podía percibir que era lejano. La iluminación llegó a iluminar el ambiente como la luz de la luna llena. Los tres relámpagos fueron seguidos, uno tras otro, con tal vez un intervalo de uno a dos segundos. Fueron de color blanco amarillento como los rayos de una tempestad”*.

Surco Pueblo

El señor Gonzalo Segura, taxista, se encontraba en su casa, en Surco Pueblo, el día del terremoto. Su casa está hacia la avenida Ayacucho. Es un edificio con terraza en el sexto piso. El señor Segura manifestó que: Vio *“la luminosidad. Fue como una explosión sin ruido, como media luna que iba creciendo como arco hacia arriba y desapareció como un flash. Fue de color blanco amarillento”*. El se encontraba viendo hacia el Morro Solar. *“La explosión fue detrás del Morro”*.

Chaclacayo

Para la localidad de Chaclacayo, se cuenta con el testimonio del Hermano Renzo Pino. Él se encontraba en Chaclacayo, Lima, el día del terremoto. Estuvo en un espacio cerrado cuando empezó el terremoto y un momento después que salió a campo abierto, vio “el resplandor. El resplandor fue arriba como una aureola de luz blanca, como los focos de luz blanca, como la luz del fluorescente, dispersa”. Vio la iluminación durante el sismo, pero ya finalizando el terremoto.

Testimonios de las Localidades en el Area Distal

En el área distal se cuenta con información de las siguientes localidades: Anahuaylas (Apurímac), Huancayo (Junín), Ancón, Chancay, Huacho y Huaura (Lima).

Andahuaylas y Huancayo

En la entrevista a la señora Angela Ochoa en Asia Vieja, la señora A. Ochoa manifestó que: Familiares de Andahuaylas, Apurímac, le contaron que “vieron la luz en el centro del pueblo. Vieron que salió una iluminación. No vieron arco iris”.

Por otro lado, el Dr. José Ishitsuka reporta que él no observó, pero que compañeros de trabajo sí observaron las luces en Huancayo.

Ancón y Chancay

En Ancón se obtuvo el testimonio del señor David H. Cuadros, miembro de seguridad del Observatorio de Ancón del Instituto Geofísico del Perú. El señor Cuadros informó que: Cuando cruzaba la pista de la carretera Panamericana Norte hacia el IGP, para cumplir con su turno noche, estaba caminando apurado, cuando escuchó bulla detrás suyo. Volteó y vio “*luz blanca con celeste cuando vio hacia arriba, como una gran masa grande, hacia el Sur, en el momento del sismo*”.

En Chancay, se tuvo la fortuna de lograr la colaboración de una joven residente. Cuyo nombre no fue posible obtener. El testimonio de esta vecina del lugar, es el siguiente: “*La luz salió del Sur, de abajo hacia arriba, color entre amarillo y celeste, como un cometa largo, como rectángulo, ancho hacia arriba, de luz amarilla azulina, salió cuando empezó el segundo movimiento fuerte, fue como un flash en cuanto a tiempo de duración, se perdió en el cielo. El rectángulo fue casi como un rayo, más o menos de 20 cm de ancho*”.

Huacho y Huaura

En Huacho, fue un poco difícil obtener información. Fue necesario recorrer las colinas altas pobladas. Sin embargo, los primeros informes se obtuvieron en la Capitanía del Puerto, donde el vigía de la Capitanía de Puerto de Huacho informó que: Se “vio iluminación como si fuera un trueno, se iluminaron el mar y el cielo. Luz parecida al trueno”. En el Asentamiento Humano Santa María de Atalaya, Huacho, una joven de nombre Rocío, residente del lugar, manifestó que: Observó que “*alumbraba “la luna”, luz de color como flash, durante el movimiento. Arriba en el cielo. El suelo se movía despacito. Todo el cielo se iluminó. No escuchó ningún ruido*”.

Por otro lado, otra joven de nombre Elizabeth, residente del Asentamiento Humano Manzanares Primera Etapa, Sector 4, informó; “*La luz apareció a mitad de movimiento, color blanco, brillo blanco, alumbró de arriba, apareció arriba, alumbró y se fue al toque*”.

Para obtener información en Huaura, se subió por una trocha carrozable a la cima del Cerro El Carmen. El testimonio de la señora Lidia Luz Santos es: Vio “*el cielo oscuro rojo, al mismo tiempo del sismo. Fue un rojo diferente al del atardecer. Vio todo el cielo entero rojo sangre. Duró durante el sismo y desapareció. El cielo estuvo despejado, no hubo luna*”.

PATRON ESPACIAL DE LOS FENOMENOS LUMINISCENTES

Las Figuras 10-13 muestran el siguiente patrón en la distribución espacial de los fenómenos luminiscentes.

Las estrellas fugaces (F) se observaron en las áreas epicentral y proximal, principalmente, Figura 12. La observación más distante se reportó de Marcona. No se observaron estrellas fugaces norte de San Jerónimo (río Cañete). El firmamento en Lima estuvo nublado con nubes a menos de 600 m sobre el nivel del mar. Casi todas las bolas luminosas (B) se observaron en área epicentral, probablemente, alcanzaron poca altura. Su origen está estrechamente relacionado a la dinámica de la capa límite atmosférica.

Los rayos luminosos (R) se reportaron principalmente a lo largo de la costa del área epicentral hacia el NE, hasta Chancay, Región Lima, Figura 11. Los rayos se

propagaron de sur a norte. Los sonidos (reventazón) (Sr) ocurrieron principalmente en el área epicentral. La reventazón más lejana sucedió en la vecindad de Chorrillos, ciudad de Lima. Esta distribución de los rayos y sonidos está estrechamente relacionada con la dirección de los vientos.

Los destellos (D) fue uno de los fenómenos más observados y reportados. Por el NW, se observaron hasta Huacho, y por el SE sólo hasta Palpa, Figura 10. Esta geometría es un poco difícil de explicar, ya que Lima estuvo nublada, pero Huacho reporta cielo despejado. La luminosidad fue intensa. Es probable que en el SE no prestaron mayor atención a este fenómeno. La distribución espacial de la iluminación general del ambiente (I) guarda simetría con respecto a la zona de ruptura.

La iluminación general del firmamento (Y), Figura 13, se concentra principalmente en el área epicentral, con los reportes solitarios de Huacho y Huaura. La ocurrencia en el área epicentral, es de esperarse por ser la zona de mayor intensidad del flujo energético. Huacho y Huaura vieron color “rojo sangre”, probablemente por las reflexiones-difracciones, y dispersión selectiva de la luz en las nubes de la zona de Lima. La luz localizada (L) fue reportada casi por todos los sitios.

DOCUMENTACION GRAFICA

Antes de describir los documentos fotográficos y sus colores, es propio mencionar el origen de la predominancia del color azul en el firmamento. Al entrar la luz natural en la atmósfera, las longitudes de onda visibles más cortas (violeta, azul y verde) son dispersadas más por los gases atmosféricos que las longitudes de ondas más largas (amarillo, naranja, y especialmente rojo). La luz violeta se dispersa 16 veces más que la luz roja. Al ver el firmamento, las ondas dispersadas de las luces violeta, azul y verde llegan a los ojos de todas direcciones. Debido a que nuestros ojos son más sensibles a la luz azul, estas ondas, vistas en conjunto, producen la sensación del azul que viene de todo nuestro alrededor. Por tanto, cuando miramos al firmamento aparece azul, por la dispersión selectiva de la luz azul por las moléculas del aire y partículas muy pequeñas. (Ahrens C.D., 1994). Las aureolas azules, que rodean la luz blanca en algunos de los documentos fotográficos que se presentan, se deben a este proceso. Los elementos químicos: arsénico, cesio, cobre-1, indio, plomo,

y selenio, y el gas propano, etc., pueden contribuir a la coloración azul, ya que sus espectros tienen este color. Sin embargo, los mencionados elementos son escasos en la atmósfera. Cuando todas las longitudes de onda del espectro de la luz natural son dispersadas homogéneamente, se ve luz blanca.

El sismo Pisco del 15 de agosto 2007 ocurrió al comenzar la noche, cuando ya no había luz de día. Esta circunstancia reforzó la espectacularidad de las luces cósmicas, que a pesar del impacto del movimiento sísmico en la sensibilidad emotiva de la población, un buen número de personas tuvieron la serenidad y control emocional para grabar imágenes en videos del fenómeno luminoso, la reacción de las personas y la vibración de postes de luz y paredes de edificaciones. Algunos de estos videos fueron de acceso público en INTERNET.

De los videos revisados, uno de ellos fue particularmente útil por su calidad. Las Fotos del 2 al 10 corresponden a una emisión lumínica que duró un poco más de dos segundos de grabación. Se capturó imágenes fijas consecutivas, separadas en fracciones de segundos, con la finalidad de documentar la evolución del fenómeno desde el inicio. El video tenía la etiqueta e4kodam. La Foto 2, corresponde justo antes del inicio del fenómeno, no hay ninguna luz cósmica, sólo la luz ambiental del lugar de grabación. La Foto 3 muestra instantes después del inicio del fenómeno lumínico, la parte iluminada es pequeña, casi toda de color azul. En la Foto 4, la zona iluminada aumenta, la parte con luz blanca comienza aparecer. La Foto 5 muestra la iluminación de todo el campo, la luz blanca predomina en la parte baja, el azul blanquecino cubre el resto de la imagen. En la Foto 6, no hay luz azul, la luz predominante es blanco-amarillento con tinte rojizo, algo verdoso en la parte superior. En la Foto 7, comienza a retornar el azulado en la parte superior y tiende a predominar el blanco algo rojizo en la parte inferior. La Foto 8, en la parte inferior, muestra la luz blanquecina y el azul domina el resto del área iluminada. En la Foto 9, la luz blanca desaparece prácticamente, predomina el azul blanquecino en todo el campo. En la Foto 10, a pocos décimos segundos después de la Foto 9, el fenómeno terminó. La Foto 11, corresponde a un video Liveleak, que ilustra la luz blanca y su gradación al azul, pasando por un tinte morado. En primer plano se ve el perfil de la edificación. La Foto 12, corresponde a un video de Chiripancenita. En primer plano se ve la edificación y sus luces. Se ve la luz blanca con un ligero tono de azul gradando a azul claro a azul morado en la parte derecha de la imagen. La Foto 13, ilustra el efecto de la luz blanca generalizada, no hay prácticamente coloración azul. Las Fotos 14 y 15 (Liveleak)

ilustran la luminosidad de color rojizo, como la puesta del sol al atardecer en un día parcialmente nublado en el horizonte.

EXPERIENCIAS, EXPERIMENTOS DE LABORATORIO Y MECANISMO PROPUESTOS

Experiencias Sísmicas Documentados

Luces asociadas con sismos han ocurrido desde siempre. Sin embargo, no se les tomó en serio hasta cuando se documentó este fenómeno fotográficamente.

Información de luces cosmósmicas se reporta desde antes de los años 462 A.C. en el área del Mediterráneo Oriental y Mar Negro (Stothers, 2004). Según Derr (1973), las observaciones mejor documentadas de las luces sísmicas son las de los investigadores japoneses para los sismos en las Islas Japonesas de 1930 a mediados de 1960. Ellos reportan fenómenos de iluminación del firmamento como aquel de los relámpagos, rayos (como los usados para buscar de noche objetos en la atmósfera) y columnas de luz, bolas luminosas. Los colores frecuentes mencionados son: Azul pálido o blanco o como aquel de un relámpago, aunque un gran número de reportes informan de los colores rojizo o naranja.

Derr (loc. cit.) también reporta un destello en el mar frente de California en 1922, y en 1926 un flash luminoso mar afuera de la Bahía Monterrey.

La mejor documentación de luminiscencia asociada con el proceso sísmico es la de St-Laurent (2000). La región de Saguenay (Provincia de Québec, Canadá) experimentó 67 sismos ($M > 0$), desde noviembre 1988 a fines de enero de 1989. El 23 de noviembre, a las 4:12 AM (tiempo local) ocurrió un evento premonitor de magnitud 4.8 m_{blg} . El 25 de noviembre a las 6:46 PM ocurrió el evento principal. En el bloque tectónico "Jacques Cartier", a 17 km sur del margen sureste del Graben Saguenay. El evento tuvo una magnitud de 6.5 m_{blg} (5.9 mb), y fue localizado a 29 km de profundidad, en la corteza inferior del cratón estable Precámbrico. El sismo tuvo muy pocas réplicas (84 eventos en seis meses). Algunos residentes de Saguenay y Lac St-Jean vieron 38 luminosidades inusuales, principalmente durante el sismo premonitor, sismo principal y las réplicas de noviembre 1988. St-Laurent remarca que 8 de los 32 fenómenos luminosos fueron observados antes del sismo premonitor del 23 de

noviembre. Los canadienses reportaron los siguientes fenómenos durante el sismo, hasta 9 minutos después: Efecto como de corona (a 19 km del epicentro), iluminación atmosférica breve (5 s) (a 50 km), iluminación atmosférica localizada (a 27 km), ~6 rayos luminosos color pastel (a 33 km), ~7 bandas luminosas blancas (a 35 km), iluminación atmosférica localizada (a 33 km), masas globulares muy pequeñas-cola-larga cerca al suelo (a 90 km), 2 masas globulares coexistente: 1 roja con humo rojo y 1 plateada (a 19 km). Después de 8 h 24 min reportan: como una llama luminosa sobre el suelo (a 27 km). Los reportes de los fenómenos continuaron hasta el 21 de enero de 1989. En suma, los fenómenos reportados son: Iluminación como la del relámpago o un flash de cámara: Luz blanca en el centro, duración 3-5 s, Iluminación atmosférica: gran duración e intensidad, bandas luminosas: Blanca azulina y violeta, masas globulares “luminosas” (incandescente), “lenguas” luminosas: Que fluyen cerca del suelo.

Un fenómeno extraordinario se reportó para el terremoto de New Madrid (USA) del 16 de diciembre de 1811: Luces en las aguas termales “Hot Springs”, North Carolina (Hough. 2000). El reporte menciona “la detonación de la montaña fue acompañada por flashes de fuego vistos que emitían de sus lados. Cada flash terminaba con un “snap or crack” como aquel que se oye al descargar una batería eléctrica, pero 1000 veces más alto”. Estas luces también son cósmicas, pero su generación es debida a un proceso diferente a los de Saguenay, Canadá, como se mencionará en las siguientes secciones.

Yasui en 1973 (en St-Laurent, 2000) sistematizó los fenómenos de luminiscencia cósmica observados en Matushiro, Japón, como sigue:

- *El cuerpo luminoso central es una semiesfera en contacto con la superficie del terreno. El color es blanco azulino, pero con reflexiones de las nubes, si están presentes, pueden dar coloración rojiza o amarillenta al cuerpo luminoso*
- *La luminiscencia generalmente sigue al sismo, puede durar pocos segundos o varias decenas de segundos*
- *La luminiscencia es restringida a varias áreas, ninguna de ellas corresponde al epicentro exacto. Tiende a ocurrir en la cima de colinas o montañas en rocas de cuarzo dioríticas falladas. El cuerpo luminoso puede desplegar un movimiento horizontal.*
- *“Spherics” generalmente acompañan la luminiscencia (nombre frecuentemente usado en física atmosférica – ondas electromagnéticas solitarias).*

EXPERIMENTOS DE LABORATORIO

Las experiencias de laboratorio tratan de identificar y reproducir, bajo condiciones controladas, procesos físicos, químicos o fisicoquímicos que puedan explicar fenómenos naturales, en este caso particular, aquellos que involucran la generación y transporte de cargas eléctricas y emisión de luz. En este respecto, es propio mencionar que la corriente eléctrica puede ser propagada en rocas y/o minerales en tres maneras: Conducción (óhmica) electrónica, conducción electrolítica y conducción dieléctrica.

En la conducción electrónica, la corriente fluye en el material que contiene electrones libres, como los metales por ejemplo. En la conducción electrolítica la corriente es transportada por iones a una tasa relativamente baja, como el agua con sales disueltas (agua de mar). La conducción dieléctrica tiene lugar en conductores pobres o aisladores, que tienen muy pocos transportadores o ninguno, como las rocas.

Origen y acumulación de carga eléctrica en la superficie terrestre

El fenómeno luminoso cosísmico es un fenómeno electromagnético que involucra el subsuelo y la atmósfera; en el caso del océano: la atmósfera, la capa de agua, y el fondo suboceánico. El hipocentro del sismo del 15 de agosto del 2007 se localizó ~40 km de profundidad, i.e., muy cerca a la interface manto-superior corteza terrestre, frente de Tambo de Mora-Chincha Baja. La zona de ruptura se extendió desde estas profundidades hasta cerca de la superficie exterior, al sur de la Península de Paracas. Las réplicas se distribuyeron en toda la zona de ruptura. Las luces cosísmicas se originaron en toda la zona epicentral y se propagaron hasta distancias superiores a los 400 km. Las propiedades eléctricas de las rocas en la zona de ruptura jugaron un papel preponderante en la generación de la carga eléctrica liberada en forma de radiación electromagnética en la banda luminosa.

Entre las propiedades eléctricas importantes de las rocas se encuentra: Los potenciales eléctricos naturales, la conductividad eléctrica y las constantes dieléctricas. En general las rocas ígneas y rocas metamórficas de alto-grado son buenas aisladores. Así mismo, con la excepción de la magnetita, los óxidos de minerales y los minerales que constituyen las rocas, incluyendo los minerales que son

ricos en metales de transición en diferente estado de oxidación, no son conductores de electricidad (Freund, 2003). Freund (loc. cit.) realizó una investigación exhaustiva buscando una explicación a luces pre-sísmicas que se han reportado en la literatura. Examinó la conductividad volumétrica de algunos materiales, particularmente, la de las rocas ígneas. Tomó en cuenta investigaciones previas que determinaron que la única conductividad eléctrica en minerales y rocas es causada por conductividad iónica. Para lograr ésta, se requiere altas temperaturas (caso del olivino: 700-800°C). Cualquier conductividad por debajo de esta temperatura, se le consideraba conductividad “fantasma o sucia” (“dirt”). En las medidas de conductividad volumétrica en el laboratorio, se aceptaba como normal la existencia de conductividad eléctrica superficial, por lo cual, la muestra la conectaban a tierra, a través de un electrodo. Sin embargo, surgió el cuestionamiento de esta eliminación, y consideraron la posibilidad que a temperaturas moderadas se reforzara la conductividad de superficie, antes de la llegada de la conductividad iónica, causada por las altas temperaturas, en esencialmente todos los óxidos y silicatos, y en vez de ser un defecto es una propiedad intrínseca del material.

Según Freund (2003), los primeros indicios los obtuvieron en la obtención del OMg al descomponer térmicamente $Mg(OH)_2$. Obtuvieron moléculas de hidrógeno (con O^{1-}) en vez de moléculas de agua (con O^{2-}). Esta experiencia condujo a considerar un proceso redox, por el cual se formaba un enlace $O^{\cdot-}O^{\cdot-}$, conocido como enlace “peroxy”. El mismo tipo de conversión redox también tiene lugar en otros cristales, incluyendo los minerales de silicatos que cristalizan en un ambiente acuoso, donde el enlace $O^{\cdot-}O^{\cdot-}$ puede ser reemplazado por $O_3Si^{O^{\cdot-}}SiO_3$, ya que cualquier óxido o silicato en estas condiciones está sujeto a incorporar pequeñas cantidades de agua en la forma de $OH^{\cdot-}$. esto implica que minerales en cualquier roca ígnea o metamórfica de alto-grado contendrá por lo menos una fracción de sus aniones oxígeno en el estado de oxidación “-1”, presumiblemente, en la forma de enlaces “peroxy” en sus estructuras cristalinas. Un O^{1-} en una matriz de O^{2-} representa un electrón-defecto (“hole”) que reside en el O en la banda de valencia 2p, también conocida como electrón-defecto positivo o “p-hole” positivo. Mientras el enlace peroxy permanezca intacto, los “p-holes” permanecerán atrapados, inmovilizados y no contribuyen a la conductividad eléctrica. Para que contribuyan, los enlaces $O^{\cdot-}O^{\cdot-}$ o $O_3Si^{O^{\cdot-}}SiO_3$ tienen que ser rotos. Cuando los “p-holes” son activados en un medio con constantes dieléctricas mayores al del medio que lo rodea, i.e., el aire, se redistribuirán formando una capa delgada cargada en la superficie. Las rocas como las

dioritas, andesitas, dunitas y minerales como olivino, feldespatos y granate responden a la redistribución de cargas.

Freund y otros investigadores, encontraron experimentalmente que la movilización de los “p-holes” puede lograrse no sólo por medio de altas temperaturas sino por el paso de ondas sísmicas compresionales, el fracturamiento de las muestras, deformación lenta hasta pasar el límite de elasticidad del material. En la Figura 7, se muestra el resultado de dos experimentos, uno en roca no identificada y en la Figura 8 los registros obtenidos en una diorita. Ambos experimentos fueron impactados con proyectiles a baja velocidad, e instrumentados para detectar en la superficie de la muestra: El arribo de las cargas positivas, y el flash de luz. En el experimento en la roca diorita, además del flash de la luz, se registró la variación del campo magnético y el campo eléctrico.

En suma, estos experimentos proveen una explicación del origen de la sobre carga eléctrica a que está sujeta la capa superficial terrestre en función de la litología local y los fenómenos sísmicos y sobrecarga tectónica.

Descarga luminosa

Los dispositivos que aplican descargas luminosas (“glow discharge”) y las espectroscopias asociadas, se usan en laboratorios de fisicoquímica para el análisis químico de sustancias. El nombre de descarga luminosa se debe a la luminosidad del plasma excitado. Átomos y moléculas en el medio se rompen eléctricamente permitiendo el flujo de la corriente cuando el plasma está sujeto a un campo eléctrico suficientemente fuerte. La primera descomposición se crea por los electrones libres debido a la colisión con las partículas cósmicas que constantemente bombardean la Tierra. Estos electrones son acelerados en el campo eléctrico. Si ganan suficiente energía para causar ionización de átomos de gas neutro, se inicia una reacción en cadena creando más y más electrones libres. La luminiscencia se produce porque los electrones tienen suficiente energía para generar luz visible por excitación debido a la colisión con los portadores del gas del plasma (www.glow-discharge.com)

La configuración más simple de la descarga luminosa consiste de una cavidad, donde se encuentra el plasma, entre dos placas de electrodos, paralelas, mantenidas a diferente potencial eléctrico. Una placa es cargada negativa, y la otra positivamente. Una vez que la descarga luminosa se inicia, el potencial cerca al electrodo negativo

decae rápidamente, el potencial varía lentamente en el plasma, y cambia nuevamente en la placa positiva. Una imagen de este proceso se muestra en la Figura 9. Observar la gradación de los colores de la luz: Blanco cerca al electrodo negativo, luego azulino, pasa a diferentes tonos de morado rojo, verde a los extremos inferiores. El proceso de descarga y la luminiscencia se asemeja a lo mostrado en la secuencia de las Fotos 2-10, sólo que la fuente eléctrica del sismo fue de corta duración.

Reacciones químicas y los fotones

De acuerdo a Alberty (1982), la absorción de luz de la longitud de onda apropiada produce estados excitados electrónicamente de moléculas. Estos estados excitados sufren transiciones a otros estados y reacciones para dar lugar a otras especies moleculares. Las reacciones fotoquímicas reciben su energía de reactivación por absorción de fotones de luz por las moléculas. La fluorescencia y la fosforescencia proveen una información cinética importante acerca de los estados excitados de las moléculas.

La fluorescencia puede considerarse como la emisión espontánea de un fotón por un estado excitado simple concomitante con el retorno del estado simple a su estado base. Fluorescencia es luz que emite una molécula después de la absorción de un fotón de energía mayor. Persiste mientras dura la radiación estimulante. Fluorescencia también es La absorción de luz en una longitud de onda y su re-emisión en una longitud de onda más larga. Juega un rol importante en la percepción del color de muchos objetos. www.uic.edu/~hilbert/Glossary.html

La composición de la atmósfera terrestre, por debajo de los 25 km de altitud, es nitrógeno (N₂) 78.08%, oxígeno (O₂) 20.94%, argón (Ar) 0.93 % para un aire seco. Los tres gases hacen un total de 99.95% del total de la mezcla de gases que constituyen la atmósfera (Barry y Chorley, 1987). La capa atmosférica más inferior es la troposfera: donde tiene lugar la mayoría de los fenómenos y turbulencia atmosférica, y contiene el 75% de la masa gaseosa total de la atmósfera. Por tanto, reacciones del tipo: $\text{NO}_2 + h\nu = \text{NO}^*_2$, $\text{NO}^*_2 + \text{NO}_2 = 2\text{NO} + \text{O}_2$, donde * indica una molécula excitada, son relevantes para la atmósfera terrestre (h es la constante de Plank, v es la frecuencia de la radiación, hv: paquete de energía o fotones) (Alberty, loc. cit.).

En la tropósfera, el NO₂ es uno de los principales responsables de la formación del ozono, el llamado “smog”. El NO₂ mismo da al “smog” un color café,

porque absorbe la luz azul. El NO₂ crea ozono a través de la siguiente reacción: NO₂ + hv → NO + O; O + O₂ → O₃ (<http://www.princeton.edu/~chm333/2004/Hydrogen/nox.htm>).

La fosforescencia es la emisión de luz desde una sustancia expuesta a radiación y que persiste como una “post luminiscencia” (“afterglow”) después de que la radiación excitadora ha sido removida. A diferencia de la fluorescencia, en la cual la luz absorbida es espontáneamente emitida alrededor de 10⁻⁸ s después de la excitación, la fosforescencia requiere excitación adicional para producir radiación, puede durar desde cerca de 10⁻³ s a días o años. En reacciones fotoquímicas, los procesos radiativos pueden ser lentos. La luminiscencia lenta se le llama fosforescencia y es el resultado de emisión de un quantum desde una molécula sujeta a una transición relativamente improbable. (<http://www.britannica.com/eb/topic-457522/phosphorescence>).

Sonidos explosivos

Las explosiones son simples reacciones cuyas velocidades resultan ser más y más rápidas con el tiempo. Normalmente, hay dos causas para un aumento rápido en la velocidad o tasa de reacción, dando lugar a dos clases de explosiones: Una debido a procesos térmicos, y la otra por “reacción en cadena ramificada” (“branched chain reaction”). Un ejemplo de la segunda clase es el mecanismo para las reacciones oxígeno-hidrógeno (Houston, 2001).

Los mecanismos de las “reacciones en cadena ramificadas” tienen varias etapas: Iniciación: Cualquier causa, cadena de ramificación: El número de radicales aumenta, cadena de propagación: Se consume un radical y se produce otro, y la etapa de terminación: No quedan radicales libre (Houston, loc. cit.). Se conoce que las reacciones en cadena producen explosiones cuando hay una mayor velocidad de formación de los productos gaseosos que de su consumo. En general, estos productos gaseosos son radicales libres, inestables, de corta vida, que tienen que encontrar su vía para estabilizarse. En el proceso, pueden ocurrir cambios instantáneos de presión, superando la presión normal atmosférica; dando lugar a una onda de choque radiante que excede la velocidad del sonido.

MECANISMOS PROPUESTOS

Antes de revisar los mecanismos propuestos para explicar el origen y evolución de las luces cosísmicas, es necesario precisar el significado de algunos términos utilizados en secciones previas. Uno de ellos es luminiscencia. El diccionario Webster (1968) define luminiscencia: cualquier emisión de luz causada por la absorción de energía radiante o corpuscular y no por incandescencia; cualquier luz fría; específicamente, fluorescente o fosforescente que ocurre en varios procesos químicos, biológicos, eléctricos, etc. a temperaturas relativamente bajas (Traducción del inglés). Es en este sentido que se utiliza dicho término en el presente documento. Las luces sísmicas están comprendidas en el término genérico de luminiscencia.

Mecanismo principal

Como se menciona supra, el presente trabajo trata sobre la radiación de luces cosísmicas desde una zona localizada que sufrió una dislocación por la ocurrencia de un sismo. El hipocentro ocurre cerca de la interface corteza-manto superior, y la ruptura se propaga hacia el sur este a través de la corteza terrestre hasta pocos kilómetros por debajo de la superficie exterior en la zona: Tambo de Mora-Chincha Baja y sur de la Península Paracas. El material rocoso superficial está constituido predominantemente por rocas cristalinas en su mayoría con rocas metamórficas en menor cuantía, y una capa delgada de sedimentos Cuaternarios. Por otro lado, la zona está muy cerca del ámbito de colisión de las Placas de Nazca y Sudamericana, y el régimen de esfuerzos tectónicos en la dirección E-W es permanente. Además, la superficie terrestre es una de las placas de la gran cavidad Tierra-Ionósfera, con un gradiente potencial muy alto, como se indicó supra.

En consecuencia, se dan todas las condiciones apropiadas para que uno de los mecanismos principales sea el siguiente, para el sismo principal y las réplicas:

.- Generación de la capa eléctrica de superficie mediante el proceso de migración de los transportadores de carga eléctrica “p-holes”, propuesta por Freund (2003).

.- La descarga eléctrica por el proceso descrito supra como descarga luminosa (“glow discharge”) al recibir el sobre flujo de “p-holes” en la superficie, por el impacto de los sismos.

La explicación de los fenómenos que se han reportado depende de la variación de las propiedades del plasma de la cavidad Tierra-Ionósfera, debido a la advección del aire por los fuertes vientos, la variación de la composición del aire de la capa límite, principalmente por el fuerte oleaje, y a las reacciones de las moléculas, iones, electrones, y otras partículas en la trayectoria de propagación del fenómeno electromagnético. En este sentido, es importante considerar el proceso de descarga de Townsend. Este es un proceso de ionización de gas donde una cantidad muy pequeña de electrones libres, acelerados por un campo eléctrico suficientemente fuerte, da lugar a una conducción eléctrica a través de un gas por la multiplicación de avalancha o reacción en cadena ramificada. Cuando el número de cargas decae o el campo eléctrico se debilita, el fenómeno cesa (http://en.wikipedia.org/wiki/Townsend_discharge). El mecanismo propuesto por Freund (2003) es complementado por los procesos de triboluminiscencia, el efecto piezoeléctrico en las rocas de alto contenido de silicio – cuarzo.

La triboluminiscencia es un fenómeno óptico en el cual luz es generada vía el rompimiento de los enlaces asimétricos en un cristal cuando el material es raspado, triturado o friccionado. Esta es una variante de luminiscencia, el término proviene del griego “tribein” (friccionar, sobar) y el latín lumen (luz). <http://en.wikipedia.org/wiki/Triboluminescence>

El efecto piezoeléctrico es la generación de carga eléctrica por ciertos materiales cuando se aplica una fuerza, o contrariamente, la deformación del material cuando se aplica un potencial eléctrico.

Mecanismo secundario

Debido a la ocurrencia del sismo de Pisco del 15 de agosto 2007 bajo el fondo marino, es posible que la sonoluminiscencia haya contribuido a la emisión de las luces cósmicas.

De acuerdo a “wikipedia.org”, la sonoluminiscencia es la emisión de cortos destellos de luz al implosionar o colapsar burbujas en un líquido cuando son excitadas por sonido. Es la conversión de ultrasonido en luz. Los flashes de luz de las burbujas son extremadamente cortos. Las burbujas son muy pequeñas cuando emiten la luz, alrededor de 1 micrómetro en diámetro, dependiendo del fluido del ambiente y el contenido de gas de la burbuja. La adición de pequeñas cantidades de gas noble al

gas de la burbuja aumenta la intensidad de la luz emitida. La longitud de las ondas emitidas es muy corta. Luz de longitud de ondas más cortas tiene energía más alta, y el espectro medido de la luz emitida parece indicar una temperatura en la burbuja de por lo menos 20,000 Kelvins. (<http://en.wikipedia.org/wiki/Sonoluminisce>).

INTERPRETACION DE LA INFORMACION REPORTADA

Como resultado de las entrevistas personales, se obtuvo información de 33 lugares, listados en la Tabla 1. En varios de estos lugares se consiguió más de una entrevista, obteniéndose información que complementaba la descripción del fenómeno en el lugar. Como se mencionó supra, ninguna persona vio el fenómeno en su integridad. La mayoría reporta los fenómenos luminosos durante el sismo principal; también hubo reportes de luces asociadas con las réplicas, especialmente en la Provincia de Pisco. El carácter luminoso del ambiente duró por varias horas, hasta el crepúsculo matutino del siguiente día.

La primera tarea, después de reproducir las grabaciones magnetofónicas y organizar las notas de campo, fue sistematizar la información y clasificar los fenómenos reportados predominantes. En la Tabla 2, Parte A, se presenta los fenómenos tipificados, según las características reportadas. En la Tabla 2, Parte B, se clasifican los colores más importantes y frecuentes reportados. En la Tabla 3 (Partes A y B), se resume una interpretación de la fenomenología descrita por las personas entrevistadas. A continuación, se describe brevemente los principales criterios tomados en cuenta para la agrupación de la información en cada uno de los fenómenos tipificados.

Luz localizada (L):

Las personas manifestaban que vieron una luz e indicaban la dirección o lugar hacia donde la vieron. En Chilca apreciaron el color morado violeta, y en Nazca indicaron que era una luz blanca. La distribución espacial de este fenómeno se presenta en la Figura 13. Las letras minúsculas que anteceden el símbolo “L”, es el color reportado de la luz.

Iluminación general del ambiente (I):

Las personas indicaban que podían ver en su entorno claramente como la luz del día, o como la luz de la luna llena. El 15 de agosto no hubo luna llena. La luna

estaba en el período de luna nueva, con el 8-9% del disco iluminado, estuvo muy cerca al horizonte. Se ocultó a las 20:20 h (T.L.). La distribución espacial de este fenómeno se muestra en la Figura 10. Las letras minúsculas que anteceden el símbolo “I”, corresponden a los colores de la luz reportados por los entrevistados.

Iluminación general del firmamento (Y):

En la mayoría de los sitios reportaron una iluminación rojiza, el más espectacular fue el reporte del Cerro El Carmen de Huaura: color “rojo sangre”. Sin embargo, en el sitio de Huacho, vecino a Huaura, reportaron de color blanco. Evidentemente, vieron dos etapas diferentes del fenómeno. Huacho reportó destello de color blanco. El sitio de donde reportaron en Huacho es una colina cerca al mar. En el área de Pisco reportaron luz amarillo rojizo. La distribución espacial de los reportes se presenta en la Figura 13. Las letras minúsculas que siguen el símbolo “Y”, corresponden al color de la luz que observaron.

Destello (D):

Este es el fenómeno más observado y documentado. Bajo esta denominación se han incluido los fenómenos como flash de cámaras fotográficas, a los reportes de resplandores, el surgimiento de la luz en arco y su progreso hacia arriba, las iluminaciones repentinas que surgían del “suelo”, etc. En general, son fenómenos transitorios de muy corta duración. Algunas personas manifestaron su apreciación con el dicho: “el que la vio la vio y el que no, se la perdió”. La fenomenología, en fracciones de segundos, se ilustra en las Fotos 2-10. La distribución espacial de los destellos se muestra en la Figura 10. Las letras minúsculas que siguen el símbolo “D” corresponden a los colores dominantes reportados. El símbolo especial “^” que antecede la “D” indica que la luz se propagó de abajo hacia arriba. Este reporte es muy frecuente en las zonas epicentral y proximal, donde se presenta una variedad de colores: Morado azulino, blanco azulino, amarillo rojizo, blanco, etc. Por lo general, la intensidad de la luz fue muy fuerte en la zona de la Aspereza A2.

Rayo luminoso (R):

Se clasifica como rayo luminoso las luces similares a las emitidas por los relámpagos pero de mucho menor intensidad y mayor extensión, las luces con gran estela que se propagaron de sur a norte. También, se ha considerado en esta categoría los rayos similares a las luces concentradas emitidas desde torres de control

de aeropuertos o faros. La distribución espacial de este fenómeno se muestra en la Figura 11, con el símbolo “R”. Asociada con este símbolo, a la derecha, hay una flecha vertical, que indica la propagación del rayo luminoso de sur a norte. Todos los reportes muestran este comportamiento. A la izquierda de la “R” se muestra el símbolo “^”, que indica la propagación de la luz hacia arriba. Además, hay letras minúsculas a la izquierda de la letra “R”, que indican el color de la luz.

Sonidos como reventazón (Sr) y sonidos indiferenciados (Si):

Se agrupa como sonidos “como reventazón” aquella información que describe el fenómeno similar a la de una explosión de dinamita, como el ruido de una bombardera de “los fuegos artificiales”, etc. Cuando el entrevistado no pudo identificar un sonido en particular, se le ha clasificado como indiferenciado (i). La distribución de este fenómeno se muestra en la Figura 11.

Luces como estrellas fugaces (F):

Este es un fenómeno que llamó poderosamente la atención a la población en la zona epicentral, particularmente. Los reportes indican que ocurrieron durante el sismo principal y duraron hasta el alba del día siguiente. Las luces fueron como las luces de bengala de los fuegos artificiales: Fugaces, que se prendían y apagaban; estrellas fugaces blancas, “lucitas azules” que caían al mar, luceros que se perdían como estrellas, como luces de bengala, etc. La distribución de los reportes de este fenómeno se presenta en la Figura 12 con el símbolo “F”. El símbolo “^”, indica el movimiento de las estrellas fugaces hacia arriba, y la flecha en la derecha indica el movimiento de este a oeste. Las letras minúsculas a la izquierda de “F” indican el color de la luz emitida por la “estrellita”. Este fenómeno está concentrado en el área epicentral y proximal.

Bolas luminosas (B):

En esta categoría de fenómenos se ha incluido los reportes de “luna llena” que iluminaba de lo alto del firmamento, bolas de fuego que cayeron al mar, la luna que cayó al mar, etc. La distribución de los sitios que reportaron este fenómeno se presenta en la Figura 12, con el símbolo “B”. La letra minúscula a la derecha del símbolo “B” indica el color de la bola luminosa.

TESTIMONIOS DEL SISMO DE AREQUIPA DEL 9 DE MARZO DE 1960

El 9 de marzo de 1960 ocurrió un sismo a las 18 h 54 min (T. L.), de magnitud 6.1 PAS., localizado, aproximadamente, en latitud 16.3°S, 72.0°W. En la década de los 60`s, las estaciones sísmicas en el continente sudamericano eran muy pocas.

E. Silgado (1973) lo califica como una réplica violenta del terremoto del 13 de enero de 1960. El sismo produjo daños en viviendas en la ciudad de Arequipa y fenómenos eléctricos atmosféricos extraordinarios, que a la fecha no se ha reportado. Se cuenta con testimonios presenciales para las ciudades de Arequipa, Mollendo y Camaná sobre luminiscencia cosísmica de este sismo.

Ciudad de Arequipa

La señora Ursula Torres, en ese entonces estudiante universitaria, reporta que: Se encontraba en los locales de la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, frente a la Urbanización La Negrita, sintió el sacudón del sismo y salió fuera del edificio a campo abierto. Vio “unos relámpagos raros en el cielo que iluminaron el ambiente”. Escuchó dos reventazones en el cielo “sobre las cabezas de las personas”, causó gran temor a la gente. “Fue horrible”. Al tiempo que ocurrieron las reventazones, el “alumbrado eléctrico de la ciudad se fue por un instante. Volvió pronto”. Además, vio “dos estrellas fugaces, de color rojo incandescente” (“como chispas de carbón encendidas de leños ardiendo”), que “se desplazaban de oeste a este, hacia los volcanes Chachani-Misti, y desaparecieron”. Todo esto sucedió cuando aún el terreno se sacudía por el sismo.

Ciudad de Mollendo

El Dr. Abraham Kilimajer (Otorrinolaringólogo) manifiesta que: Se encontraba en la Plaza Principal de Mollendo, “vio dos rayos relampagueantes de color rojo naranja durante la fuerte sacudida y casi terminando el sismo. Se iluminó todo el firmamento, de lo que estaba negro, se puso rojo. Uno de los rayos era grande y otro chico, con cabezas como bolas y colas como de cometa”. Entonces el Dr. Kilimajer tenía 11 años de edad.

Ciudad de Camaná

El historiador Augusto Mogrobejo Argote, Librería Damoyrs, informó que estaba en su casa, a dos kilómetros del mar, viendo hacia el este. El señor Mogrobejo “vio nubes luminosas, de color amarillo naranja, que venían de tierra a mar. Después ocurrió el sismo”. El señor A. Mogrovejo tenía, entonces, 12 años de edad.

La ubicación de los sitios donde se vieron los fenómenos luminosos asociados con el sismo de marzo de 1960 y clasificados de acuerdo a la Tabla 2, se presenta en la Figura 14.

FENOMENOLOGIA DE LA LUMINISCENCIA COSISMICA

En base de lo expuesto supra sobre la luminiscencia cosísmica del sismo de Pisco y el de Arequipa, y los experimentos de laboratorio; la fenomenología correspondiente al proceso de luminiscencia, se puede resumir como sigue:

Condiciones geológicas y tectónicas

Existencia de rocas ígneas y rocas metamórficas de-alto-grado en la corteza terrestre en la zona epicentral y vecinas, con la parte superior recubierta con delgadas capas de sedimentos clásticos. El medio constituye una buena fuente de transportadores “p-holes” (cargas positivas), creando una anomalía electrostática en la superficie terrestre, con su correspondiente efecto en la ionósfera.

Acumulación secular de esfuerzos tectónicos unidireccionales a lo largo de la plataforma continental y la zona costera, por la colisión de las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana en la zona de fosa marina Perú-Chile.

Condiciones eléctricas

La gran cavidad eléctrica entre la Ionósfera terrestre, cargada positivamente, y la superficie de la Tierra cargada negativamente. La Ionósfera representa la Placa Positiva del gran “Capacitor” de la cavidad. La superficie de la Tierra representa la Placa Negativa del mismo “Capacitor”. Para distancias geográficas regionales, se les puede considerar como placas paralelas.

El espacio entre las placas no está vacío. Está ocupada por una mezcla de material en estado gaseoso cuya composición y densidad varía en función de la distancia de las placas. Siendo más denso y heterogéneo el material sobre la placa negativa terrestre. Está constituido por iones, cationes, aniones, moléculas, aerosoles, etc., en movimiento turbulento en la parte inferior de la troposfera.

Una fuerte gradiente de potencial eléctrico entre las dos placas eléctricas, cerca la superficie terrestre (placa negativa) ~ 120 V/m.

Procesos

Proceso de generación continuo de “p-holes”, propuesto por Freund (2003), se acelera cuando el material, bajo un estado continuo de esfuerzos tectónicos, pasa del estado elástico de deformación al estado plástico. Bajo las condiciones eléctricas de borde o frontera, los transportadores concentrarán la carga eléctrica en la superficie de la capa rocosa dieléctrica.

Al iniciarse la ruptura en la fuente sísmica, la generación de cargas positivas y su transporte a la superficie se acelera, sobrecargando la capa superficial a un nivel que da lugar a procesos de radiación de corona o “descargas luminosas” (“glow discharge”), iniciando un proceso de reacción en cadena de absorción-emisión de fotones y formación-transformación de moléculas, radicales libres, iones, etc.

El campo eléctrico en la cavidad Ionósfera-Tierra está orientado hacia la ionósfera. Esto hace que los dipolos de las moléculas del aire se orienten hacia arriba, y se favorezca la propagación del fenómeno en dicha dirección.

En el caso del sismo de Pisco, las condiciones meteorológicas y oceánicas fueron tales que la composición química de la capa límite troposférica cambiaran continuamente. Los procesos de advección fueron fuertes, favoreciendo el transporte de “plasma atmosférico” sujeto a reacciones fisicoquímicas de fluorescencia-fosforescencia, procesos Townsend, entre otros, dando origen a las estrellas fugaces las bolas luminosas, etc., y los cambios violentos de volumen: Las reventazones por la generación violenta de material gaseoso cuya presión interna sobrepasa la presión ambiental. El transporte del plasma (los rayos) de sur

a norte reportado para el sismo de Pisco, es una consecuencia la acción de los vientos. Las coloraciones amarillentas, amarillo-rojizas de las luces son la contribución de las transformaciones de las sales de sodio del agua oceánica, las luces blancas las de magnesio, los colores rojo-parduzco por la formación de NO_2 que degenera a amarillento, etc. La dispersión (“scattering”) de la luz en la banda azul fue importante.

La luminiscencia del sismo de Arequipa de 1960, cumple las mismas condiciones que el de Pisco del 2007. Sin embargo, es notable el efecto de las “puntas” que jugaron los volcanes Chachani y Misti, como una evidencia de la sobrecarga electrostática de la capa rocosa superficial.

La alteración eléctrica y los procesos fisicoquímicos fosforescentes continuaron en la atmósfera por varias horas, después de la ocurrencia del sismo principal, produciendo la luminosidad tenue que se reportó y las llamadas “estrellitas” fugaces en zona de Pisco.

CONCLUSIONES

De lo expuesto en el presente documento y los testimonios de las personas entrevistadas, se concluye:

El sismo de Pisco del 15 de agosto 2007 produjo un fenómeno de luminiscencia cósmica de gran magnitud, que fue visible a más de 400 km de distancia de la zona fuente.

La luminiscencia más intensa ocurrió en la vecindad de las asperezas sísmicas al frente de Tambo de Mora – Chincha Baja y sur de la Península Paracas. La máxima intensidad reportada es aquella como la de luz de la llama que emite la soldadura autógena.

Las condiciones, litológicas y la acumulación de esfuerzos tectónicos en el área epicentral y vecinas, propuestas por Freund (2003) se cumplen para la generación de electricidad estática en la capa superficial rocosa de naturaleza dieléctrica por el proceso de generación de defectos positivos (“p-holes”) en la naturaleza cristalina de las rocas en la zona sismogénica.

La propagación de la ruptura en la zona de dislocación tectónica acelera la generación y transporte de las cargas eléctricas positivas hacia la superficie, a cuyo arribo y al sobre pasar el límite electrostático provoca la descarga eléctrica en la capa límite de la atmósfera (capa atmosférica inmediata sobre la superficie de la Tierra) y desencadena el proceso de luminiscencia atmosférica por “descarga luminosa” (“glow discharge”) o corona (efecto de descarga por “puntas”) bajo la fuerte gradiente del potencial eléctrico en el plasma de la cavidad Ionósfera-Tierra. El plasma atmosférico emite luz porque la energía de los electrones y su densidad en número son suficientemente altas como para excitar los átomos y moléculas del aire.

Durante la luminiscencia juegan un papel importante los procesos fisicoquímicos de fluorescencia, fosforescencia, desencadenamiento de procesos tipo Townsend: Multiplicación de la ionización por “avalancha”, y la variación en la composición y dinámica del aire que dan origen a las diferentes coloraciones, formas y clase de fenómenos.

Es posible que al proceso descrito hayan acompañado procesos de generación de luz como el de sonoluminiscencia, potenciales generados por el flujo de agua en medios porosos (como los sedimentos del fondo del mar), el efecto piezoeléctrico, etc. De haber sucedido, su contribución al fenómeno total no debe haber sido significativa.

Los resultados de laboratorio de Freund (2003) sobre el proceso de carga electrostática de la superficie exterior del material dieléctrico (rocas) por la migración de defectos “p-holes” (cargas positivas), por sobrecargas de esfuerzos continuados en el tiempo, demuestran la ocurrencia de cambios en el campo eléctrico y magnético, además de la emisión de luz. Así mismo, registró cambios en estos campos electromagnéticos debido a la deformación de la muestra de granito antes de alcanzar el estado de ruptura, por lo cual, preconiza que el registro de los cambios del campo eléctrico y magnéticos deben dar información premonitora a la ocurrencia de terremotos. Por las experiencias en los terremotos de Pisco y Arequipa, se debiera vigilar el campo eléctrico y magnético, por lo menos, a lo largo de la costa, donde el proceso de deformación por la colisión de las placas tectónicas de Nazca y Sudamérica es activo y continuo en el tiempo y ha generado grandes terremotos. Actualmente, hay varios gap-sísmicos en el litoral peruano que requieren vigilancia de

la evolución del proceso intersísmico: Ilo-Arica (Chile), Yauca-Ocoña, Chimbote-Tumbes, etc.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a casi medio centenar de personas que contribuyeron con su testimonio e información complementaria (videos) a la documentación de los fenómenos luminosos producidos por el terremoto de Pisco del 15 de agosto 2007. Algunas de las personas hicieron bosquejos de lo observado en las libretas de datos de campo. Agradecemos, asimismo, al Mg. Hugo Trigoso del Observatorio de Ancón, Instituto Geofísico del Perú (IGP), por la información astronómica consignada en el presente documento. Un especial reconocimiento al Br. Físico Rodolfo Moreno de la Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por la cartografía de campo y la elaboración de las ilustraciones, a la Mg. Quím. E. Ocola, Universidad A.M. de Texas, USA, por sus sugerencias, y al Ing. F. Mestanza por la información meteorológica. Finalmente, agradecemos a la Alta Dirección del IGP por el apoyo brindado a la presente investigación.

BIBLIOGRAFIA

- Alberty R.A. 1982. *Physical Chemistry*. John Wiley & Sons. Pp 824
- Ahrens C.D. 1994. *Meteorology Today. An introduction to Weather, Climate, and the Environment*. West Publishing Company. New York. Pp 591.
- Barry R.G. and R. J. Chorley. *Atmosphere, weather and climate*. Methuen. New York. Pp460.
- Couch R. and R. M. Whitsett. 1981. *Structure of Nazca Ridge and the continental shelf and slope of southern Peru*. GSA, *Memoir 154: Nazca Plate: Crustal Formation and Andean Convergence. A volume Dedicated to George P. Woollard*. Editors: LaVerne D. Kulm, Jack Dymond, E. Julius Dash, Donald M. Hussong. Associated Editor: Roxanne Roderick. Pp. 569-586.
- Dalmayrac B., G. Laubacher, R.. *Marocco*. 1980. *Geologie des Andes Peruviennes. Travaux et Documents de L' O.R.S.T.O.M*. Pp 501.
- Fernández U. M. 1993. *Geología de los Cuadrángulos de Pisco, Guadalupe, Punta Grande, Ica y Córdova*. Bol. 47, Serie A: *Carta Geológica Nacional*. Instituto Geológico Minero Metalúrgico. Sector Energía y Minas. Lima, Perú.
- Derr J. S. *Earthquake lights: A review of observations and present theories*. Bull. Seism. Soc. Ame. Vol 63(6), 2173-2187.
- Freund F. T. 2003. *Rock that crackle and sparkle and glow: Strange pre-earthquake phenomena*. Jour. Scientific Exploration, Vol. 17 (1), 37-71

- GHCC .2008. A lightning Primer from the GHCC.
<http://thunder.nsstc.nasa.gov/primer/primer3.html>
- Harrison R.G. 2008. *The global atmospheric electrical circuit and climate.*
<http://arxiv.org/ftp/physics/papers/0506/0506077.pdf>
- Hough S.E. 2000. A volcano in North Carolina? A closer look at a Tall Tale. *Seis. Res. Let.* Vol 71 (6). 704-710.
- Houston P. 2001. *Chemical kinetics and reaction dynamics.* Dover Publication, New York.
- IGM (Instituto de Geología y Minas). 1975. *Mapa Geológico del Perú 1975.* Ministerio de energía y Minas. Lima, Perú.
- INGEMMET. 2008. *Carta Geológica Nacional.*
http://www.ingemmet.gob.pe/publicaciones/serie_a/mapas/indice.htm.
- Ocola, L. 2008. *Aspectos físicos del maremoto de Pisco del 15 de agosto 2007, y las inundaciones máximas.* Este Volumen.
- Perfittini H. 2008. *Los diversos mecanismos de ruptura propuestos para el sismo de Pisco: Revisión y Análisis.* Este Volumen.
- Silgado E.. 1973. *Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1970).* Geofísica Panamericana. Instituto-Panamericano de Geografía e Historia: Comisión de Geofísica. Pp 179-243.
- Stothers R. Rb. 2004. *Ancient and modern earthquake lights in northwestern Turkey.* *Seis. Res. Let.*, vol 75(2), 199-204.
- St-Laurent F. 2000. *The Saguenay, Quebec, earthquake lights of November 1988-January 1989.* *Seis. Res. Let.* Vol 71(2) 160-174.
- Tavera H., I. Bernal y H. Salas. 2007. *El sismo de Pisco del 15 de Agosto, 2007 (7.9 Mw).* Departamento de Ica-Perú (Informe Preliminar). Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.
- Thornburg T. and L. D. Kulm. 1981. *Sedimentary basins of the Peru continental margin: Structure, stratigraphy, and Cenozoic tectonics from 6°S to 16°S latitude.* GSA, Memoir 154: *Nazca Plate: Crustal Formation and Andean Convergence. A volume Dedicated to George P. Woollard.* Editors: LaVerne D. Kulm, Jack Dymond, E. Julius Dash, Donald M. Hussong. Associated Editor: Roxanne Roderick. Pp. 383-422.
- Webster. 1968. *Webster`s New World Dictionary of the American Language.* D.B. Guralnik, Editor in Chief. The World Publishing Company. New York. Pp 1692.

TABLA 1. POSICION GEOGRAFICA DE LAS LOCALIDADES CON TESTIMONIOS SOBRE LAS LUCES COSISMICAS DEL SISMO DE PISCO DEL 15 DE AGOSTO 2007			
Número en Mapa	Localidad	POSICION	
		Latitud	Longitud
		°S	°W
1	Huara	11.07	77.6
2	Huacho	11.11	77.61
3	Chancay	11.59	77.25
4	Ancon	11.77	77.15
5	Chaclacayo	11.97	76.76
6	Lima	12.03	77.04
7	Callao	12.06	77.14
8	Huancayo	12.07	75.21
9	Yauyos	12.46	75.91
10	Chilca	12.51	76.73
11	Asia Vieja	12.76	76.59
12	San Jeronimo	12.83	75.92
13	Pacaran	12.87	76.07
14	Lunahuana	12.99	76.15
15	Cañete	13.08	76.38
16	Chincha Baja	13.41	76.13
17	Tambo de Mo	13.46	76.19
18	Andahuaylas	13.65	73.39
19	Huaya Chica	13.67	75.77
20	San Clemente	13.67	76.15
21	Pisco	13.71	76.2
22	Humay	13.72	75.89
23	Chaco Pampa	13.82	76.21
24	Yumaque	13.91	76.28
25	Parcona	14.04	75.69
26	Ica	14.06	75.73
27	Chucho	14.14	76.23
28	Tunga	14.25	76.12
29	Maroma	14.37	76.09
30	Palpa	14.53	75.18
31	Nazca	14.83	74.94
32	Caballas	14.94	75.49
33	Marcona	15.2	75.06

TABLA 2.- CODIGOS DE LAS LUCES COSISMICAS REPORTADOS DEL SISMO DE PISCO DEL 15 DE AGOSTO 2007: CLASIFICACION DE FENOMENOS Y COLORES

FENOMENOS	CODIGO	COLORES	CODIGO
LUZ LOCALIZADA	L	BLANCO	b
ILUMINACION GENERAL DEL AMBIENTE	I	AMARILLO	a
ILUMINACION GENERAL DEL FIRMAMENTO	Y	ANARANJADO	na
DESTELLO	D	NARANJA	n
RAYO LUMINOSO	R	AZUL	z
SONIDO COMO REVENTAZON	Sr	CELESTE	zb
SONIDOS INDIFERENCIADOS	Si	VIOLETA	v
LUCES COMO DE ESTRELLAS FUGACES	F	MORADO	m
BOLAS LUMINOSAS	B	ROJO	r
		ROJO SANGRE	rs
		ROJO INCANDESCENTE	ri
		LUZ MULTICOLOR	lm
		COMO LUZ DE LLAMA DE GAS	lg
		LUZ DE DIA	ld

TABLA 3.- LUCES COSISMICAS DEL SISMO DE PISCO DEL 15 DE AGOSTO 2007: INTERPRETACIÓN DE LA FENOMENOLOGIA REPORTADA - PARTE A.

		FENOMENOS REPORTADOS												Fecha de la Encuesta			
Ma pa	Lugar	Luz Localizada		Iluminación General del Ambiente		Iluminación del Firmamento		Destello		Rayo Luminoso		Sonido	Luces como Estrellas Fugaces		Bolas Luminosas		
		Sim bolo	Color	Sim bolo	Color	Sim bolo	Color	Sim bolo	Color	Sim bolo	Color		Revent. o indiffer.	Sim bolo	Color	Sim bolo	Color
Número																	2007 dd.mes
1	HUAURA					Y	rs										18.12
2	HAUCHO					Y	b	D	b								18.12
3	CHANCAY									^R	→ az						18.12
4	ANCON							D	bz								18.12
5	CHACLACAYO							D	b								11.1
6	LIMA	L	ll	I	ll			^D	ba-b			Sr					(*)
7	CALLAO							D	an	^R	an						18.12
8	HUANCAYO	L															18.12
9	YAUYS			I	ll			D	ba								22.12
10	CHILCA	L	mv					D	lm	R	→ a						17.12
11	ASIA VIEJA			I	b			D	b	R	lg	Sr					17.12
12	SAN JERONIMO			I	b								F	b			22.12
13	PACARAN									^R	ar						22.12
14	LUNAHUANA	L						D		R	→ zb						22.12
15	CAÑETE			I	b												17.12
16	CHINCHA BAJA							^D	ar			Sr					10.10.
		(*) 2007: 11.10, 30.10, 14.11, 21.11. 2008: 20.02, 22.02, 25.02															
NOTA: Las flechas y símbolo especial, junto a los símbolos de los fenómenos reportados, indican la dirección de propagación del fenómeno observado por el encuestado. ^: De abajo hacia arriba, →: De sur a norte, <= de norte a sur, ← De este a oeste.																	

TABLA 3.- LUCES COSISMICAS DEL SISMO DE PISCO DEL 15 DE AGOSTO 2007: INTERPRETACION DE LA FENOMENOLOGIA REPORTADA - PARTE B.

Ma pa Nú me	Lugar	FENOMENOS REPORTADOS																Fecha de la Encuesta 2007 dd.mm
		Luz Localizada		Iluminación General del Ambiente		Iluminación del Firmamento		Destello		Rayo Luminoso		Sonido		Luces como Estrellas		Bolas Luminosas		
		Sim bolo	Color	Sim bolo	Color	Sim bolo	Color	Sim bolo	Color	Sim bolo	Color	Sim bolo	Color	Sim bolo	Color	Sim bolo	Color	
17	TAMBO DE MORA			I	b	Y	r	D		R				I←=	lg	B	r	19.09,17.12
18	ANDAHUAYLAS	L																17.12
19	HUAYA CHICA			I	ll													15.12
20	SAN CLEMENTE			I	b	Y	r	^D	b-z	R		Si	F	b				16.12
21	PISCO	L		I		Y	ar	^D	ar			Sr	F					15.12
22	HUMAY			I		Y	r	^D	b			Sr	F					15.12
23	CHACO PAMPA									R→	b					B	b	11.10.
24	YUMAQUE	L		I				D	m-z			Sr						18.09
25	PARCONA							^D	b					^F				9.10.
26	ICA	L						D	an			Si	F	an				8.10., 9.10.
27	CHUCHO	L		I		Y		^D	b	^R		Sr				B	r	17.09
28	TUNGA			I				^D	b			Sr	^F					17.09
29	MAROMA															B		17.09
30	PALPA	L		I	ld			D	na							B		12.10.
31	NAZCA	L	b	I	b													12.10.
32	CABALLAS															F	b	15.09
33	MARCONA			I	ll											F		12.10.

NOTA: Las flechas y símbolo especial, junto a los símbolos de los fenómenos reportados, indican la dirección de propagación del fenómeno observado por el encuestado. ^: De abajo hacia arriba, →: De sur a norte, ←: De norte a sur, ←: De este a oeste.



Foto 1. Grietas en la Formación Paracas cerca de la Playa Sacasemita. La grieta tiene un ancho de casi 10 cm, se extiende hacia las faldas del cerro Carreta del fondo. Las grietas están a más de 40 m del borde del acantilado. Hubo varias grietas paralelas. La fotografía es hacia el sur.

Terremoto Peru - Luces azules en el cielo 15/08/2007



Foto 2. Fracciones de segundo antes del destello luminoso (Video: e4kodam). No hay luminiscencia natural.

Terremoto Peru - Luces azules en el cielo 15/08/2007



Foto 3. Fracciones de segundo después del inicio del destello luminoso (Video: e4kodam). No hay luminiscencia natural.

Terremoto Peru - Luces azules en el cielo 15/08/2007



Foto 4. Fracciones de segundo después de la Foto 3. La luz blanca comienza a aparecer (Video: e4kodam).

Terremoto Peru - Luces azules en el cielo 15/08/2007



Foto 5. Fracciones de segundo después de la Foto 4. La luz blanca predomina. (Video: e4kodam).

Terremoto Peru - Luces azules en el cielo 15/08/2007



Foto 6. Fracciones de segundo después de la Foto 5. No hay luz azul. Luz predominante blanca-amarillenta (Video: e4kodam).

Terremoto Peru - Luces azules en el cielo 15/08/2007



Foto 7. Fracciones de segundo después de la Foto 6. Comienza a retornar la luz azulina (Video: e4kodam).

Terremoto Peru - Luces azules en el cielo 15/08/2007



Foto 8. Fracciones de segundo después de la Foto 7. La luz azul domina la Foto. La luz blanca se reduce a la parte inferior (Video: e4kodam).

Terremoto Peru - Luces azules en el cielo 15/08/2007



Foto 9. Fracciones de segundo después de la Foto 8. La luz blanca desaparece prácticamente. La azul predomina (Video: e4kodam).

Terremoto Peru - Luces azules en el cielo 15/08/2007



Foto 10. Fracciones de segundo después de la Foto 9. El destello terminó. El video duró un poco más de dos segundos (Video: e4kodam).

TERREMOTO EN LIMA Y LUCES EN EL CIELO



Foto 11. Luz blanquecina y su gradación al azul pasando por un tinte morado (Video: Liveleak).

LUCES EXTRAÑAS EN EL CIELO DURANTE EL TERREMOTO



Foto 12. Ilustración de luz blanca y su gradación al azul. Luces de la edificación en el primer plano (Video:Chirinpancenita).

LUCES EXTRAÑAS EN EL CIELO DURANTE EL TERREMOTO



Foto 13. Luz blanca generalizada . (Video:Chirinpancenita)

LUCES ROJAS EN EL CIELO



Foto 13. Ejemplo de luminosidad rojiza (Video: Liveleak).

LUCES ROJAS EN EL CIELO



Foto 14. Ejemplo de luminosidad rojiza . El ambiente está oscuro (Video: Liveleak)

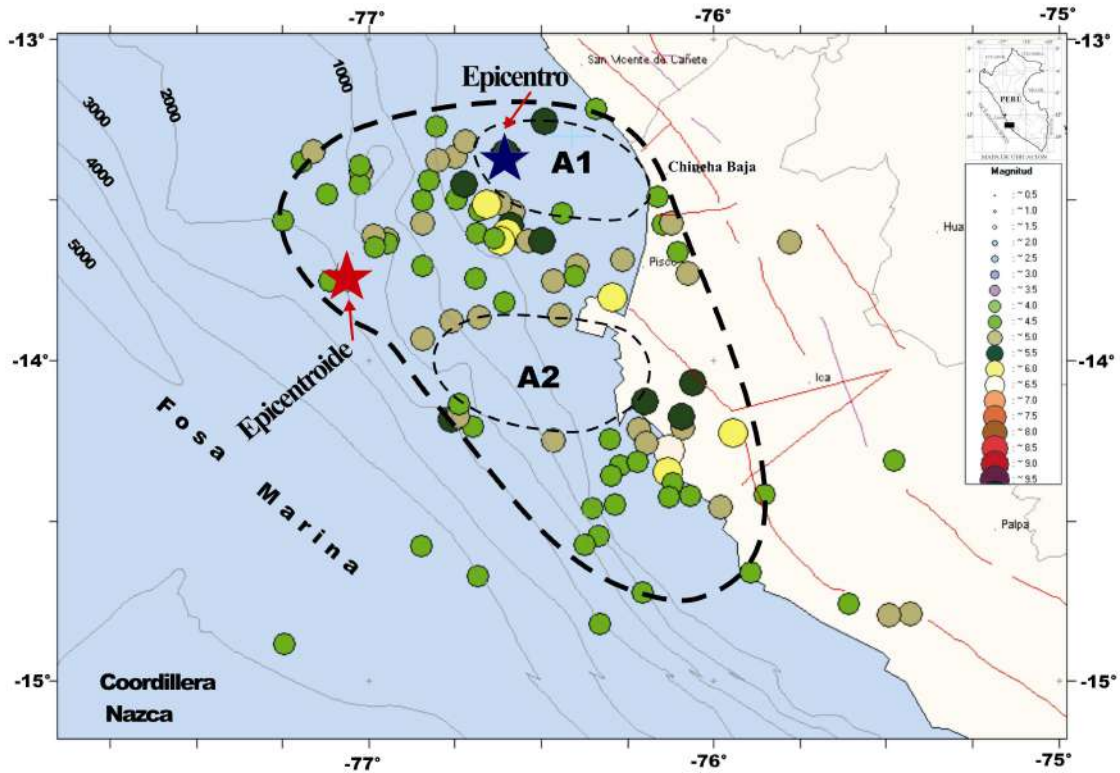


Figura 1. Zona epicentral: Sismos con magnitudes igual o mayor a 4.5 mb, datos del NEIC. Período: Agosto 15, 2007 – Febrero 1, 2008. Proyección en superficie del área de ruptura y bordes de asperezas (A1 y A2) (Ocola 2008)

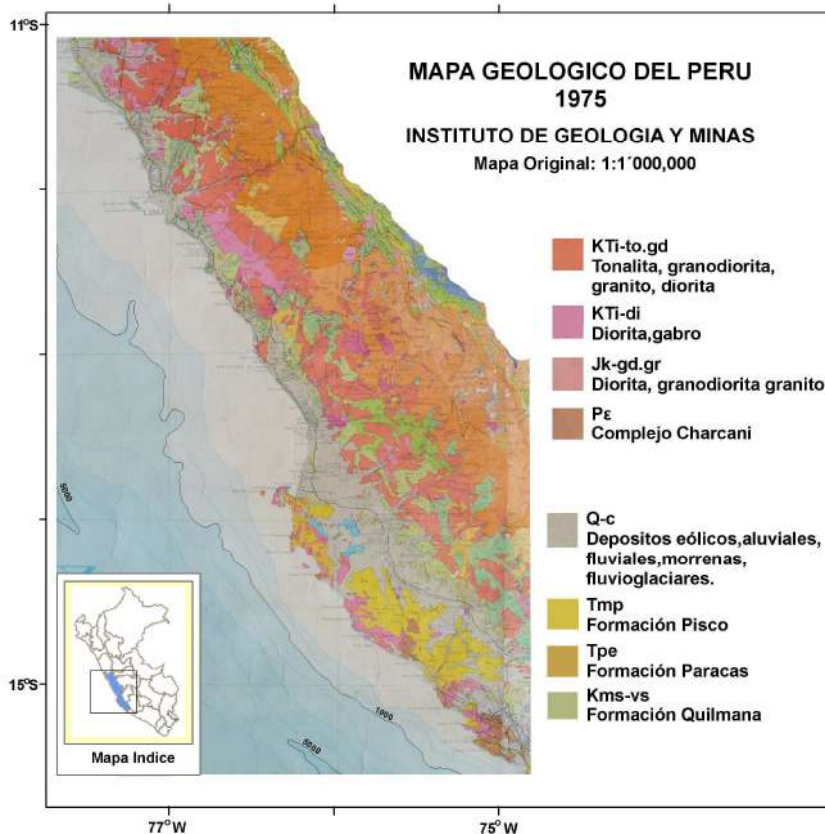


Figura 2. Geología continental, reducción del mapa geológico a la escala 1:1,000,000. La isóbata de 1,000 m delinea bien la plataforma continental. La isóbata de 5,000 m marca el eje de la fosa marina Perú-Chile. La pendiente continental es bastante pronunciada. La Cordillera de la Costa, la Plianicie y los Contrafuertes Andinos están claramente diferenciados

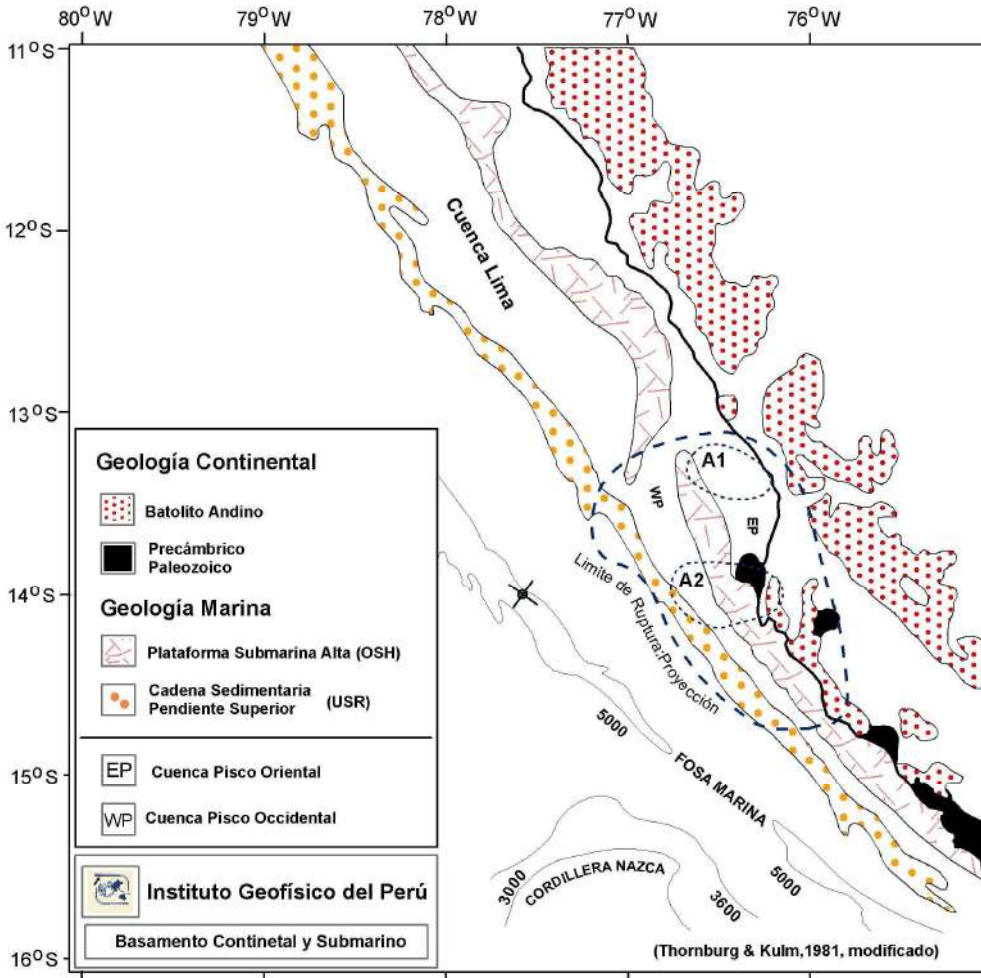


Figura 3: Rocas del basamento en el continente y en la plataforma continental. Al sur este de la Península de Paracas, la Cordillera de la Costa tiene parte continental y parte marina indivisa. Esta estructura continua bajo el mar hacia el NW (Estructura OSH). Las cuencas sedimentarias de Pisco Este y Oeste, y Lima están bien identificadas. Las líneas discontinuas marcan la proyección superficial de la zona de ruptura y las asperezas (A1 y A2). La X marca un extremo del perfil cortical Fosa-Línea de Costa (Thornburg and Kulm, 1981)

Estructura de la Plataforma Continental frente a Pisco: Modelo

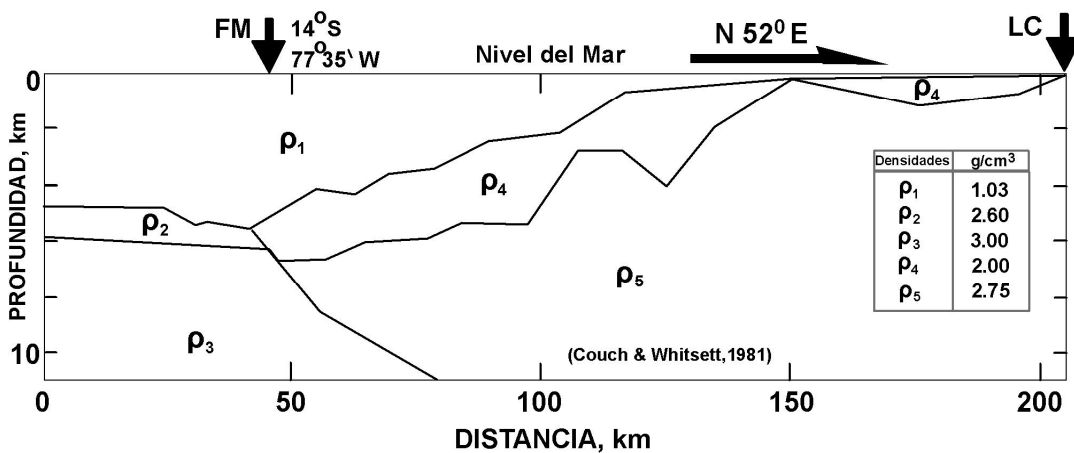


Figura 4. Perfil de la corteza en la zona de colisión de la Placa de Nazca y la Sudamericana, modelado en base de información gravimétrica y reflexión sísmica marinas. En el perfil se indican la ubicación en la Figura 3 del punto en la fosa marina y la dirección del perfil (N52°E) (Couch & Whitsett, 1981)

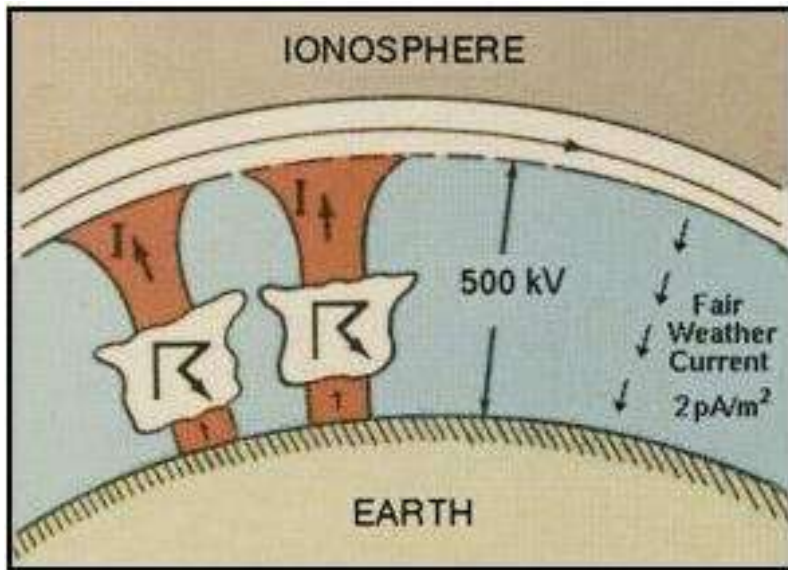


Figura 5. Cavidad Ionosfera – Tierra. En condiciones atmosféricas normales, la diferencia de potencial eléctrico es 200,000 a 500,000 V. La Ionosfera funciona como una placa cargada positivamente y la Tierra como una placa cargada negativamente (GHCC,.2008)

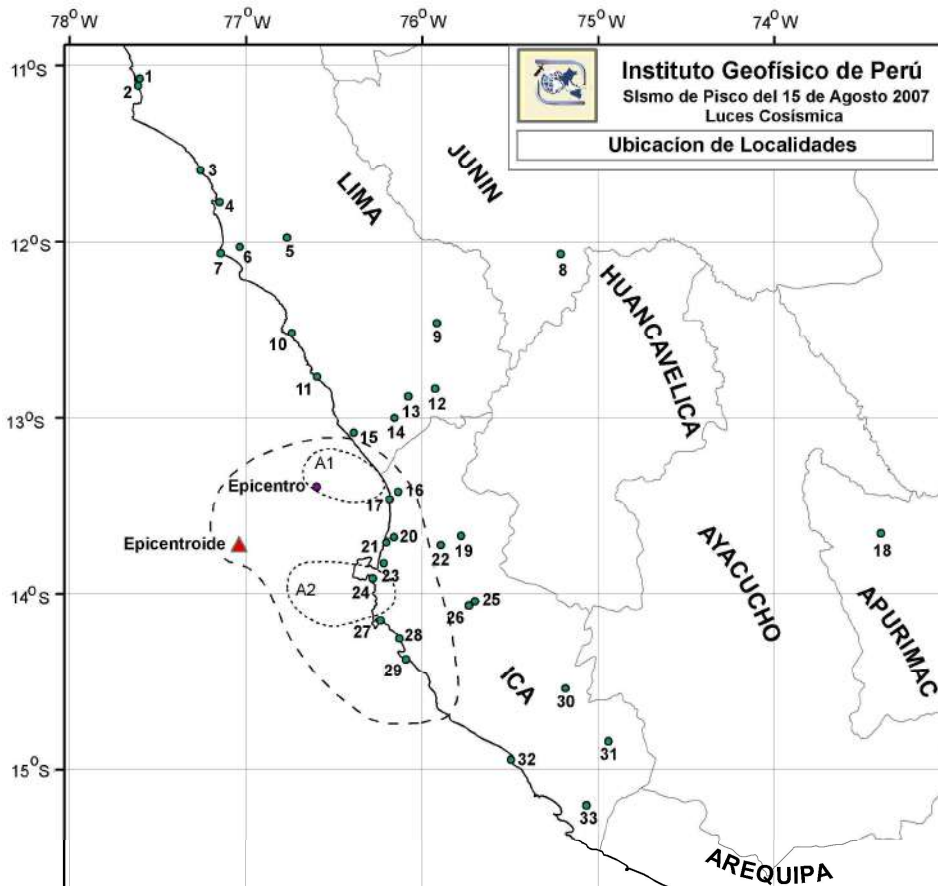


Figura 6. Distribución de los sitios en donde se obtuvo testimonios presenciales. Los números indican la posición en el mapa. Al pie del mapa, se da los nombres de las localidades. Los números se mantienen en las figuras que muestran los diferentes fenómenos luminosos documentados en la localidad respectiva.

Localidades				
1. Huaura	8. Huancayo	15. Cañete	22. Humay	29. Maroma
2. Huacho	9. Yauyos	16. Chincha Baja	23. Chaco Pampa	30. Palpa
3. Chancay	10. Chilca	17. Tambo de Mora	24. Yumaque	31. Nazca
4. Ancón	11. Asia Vieja	18. Andahuaylas	25. Parcona	32. Caballas
5. Chacabuco	12. San Jerónimo	19. Huaya Chica	26. Ica	33. Marcona
6. Lima	13. Pacarán	20. San Clemente	27. Chucho	
7. Callao	14. Lunahuaná	21. Pisco	28. Tunga	

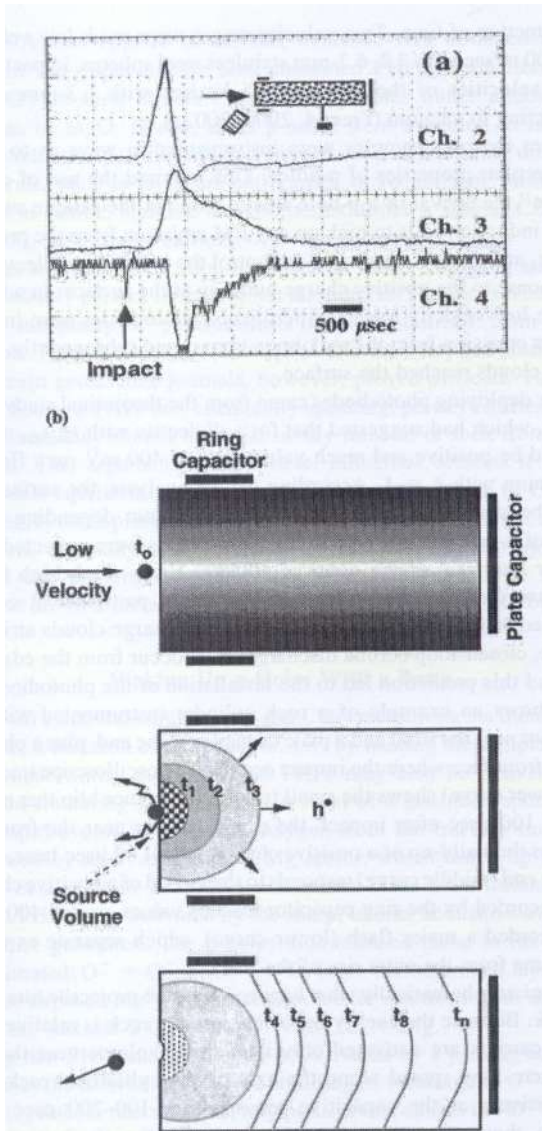


Figura 7. (a) Experimentos de impacto a baja velocidad, muestra en el Canal 4 una pequeña señal de luz al impacto, debido a la triboluminiscencia,. En el Canal 2 muestra el arribo de las cargas positivas en el sensor capacitivo del extremo frontal. En el Canal 3 muestra un arribo ligeramente tardío de la carga al sensor en el extremo posterior de la muestra. En el Canal 4 se muestra un flash de luz retardado.

(b) Una representación esquemática de la generación de cargas positivas en un volumen pequeño cerca al punto de impacto y su propagación a lo largo del eje del cilindro de la muestra de roca (Freund, 2003, Fig. 3).

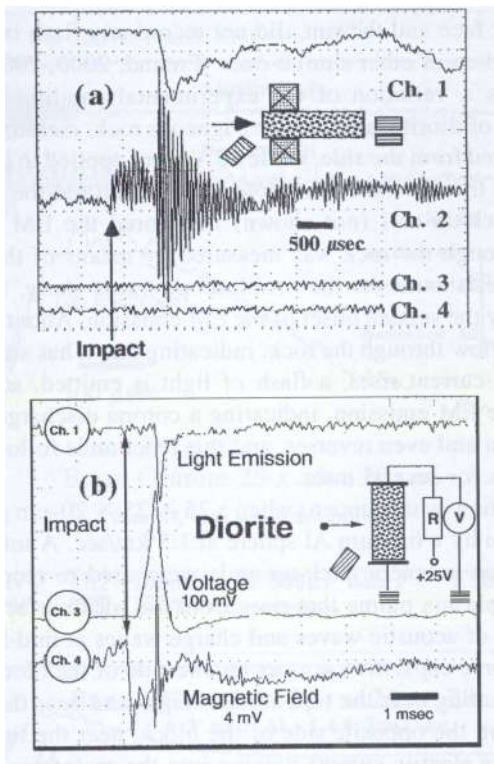


Figura 8. (a) Experimentos de impacto a baja velocidad, que ilustran la emisión electromagnética (EM) al tiempo del impacto y posterior, cuando ocurre el flash de luz.

(b) Disposición para mostrar que la roca se vuelve conductora cuando la nube de cargas “p-holes” (cargas positivas) se propaga del punto de impacto a través del volumen de la roca. (Freund, 2003, Fig. 4).

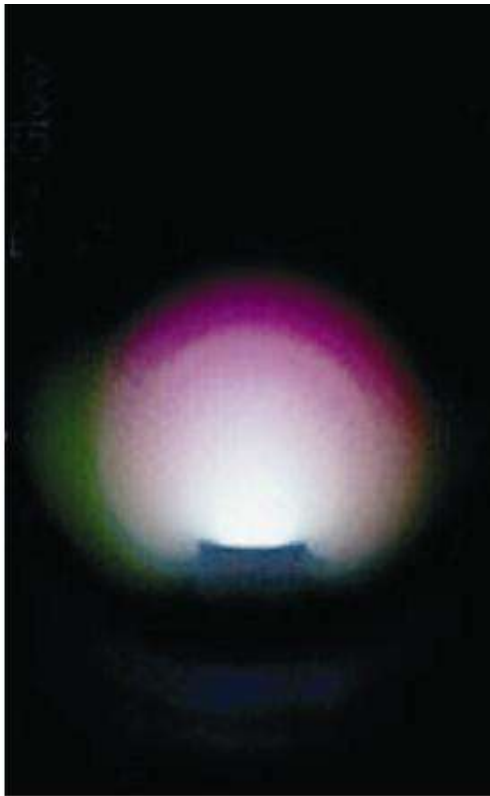


Figura 9: Experimento de laboratorio. Descarga luminosa (“glow discharge”), fenómeno que se desarrolla cuando prevalece un fuerte campo eléctrico en un medio gaseoso. Los átomos y las moléculas se descomponen eléctricamente. Observar la gradación de colores. La luz es más blanca cerca al electrodo. (Ilustración de www.glow-discharge.com)

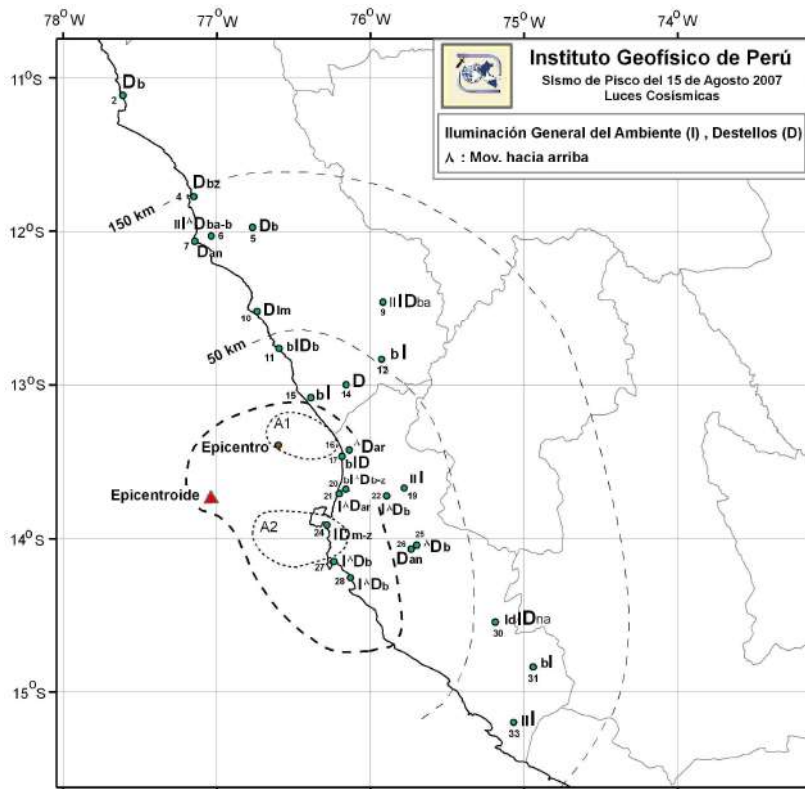


Figura 10. Distribución de los destellos (D) y la iluminación general del ambiente (I). En la figura se muestra, además, la zona de ruptura, las asperezas A1 y A2, el epicentro y el epicentro del sismo. Las líneas discontinuas débiles son los límites externos de las áreas proximal (50 km) e intermedia (150 km), Los símbolos, códigos de colores y la dirección de movimiento se dan en la Tabla 3: Parte A y Parte B. Los códigos de los colores están a la derecha del símbolo “D” como subíndices, la dirección del movimiento hacia arriba está como superíndice en lado izquierdo superior de la “D”. El código de los colores de la iluminación general del ambiente está como subíndice en el lado izquierdo de la “I”. Los números asociados con los puntos corresponden a las localidades.

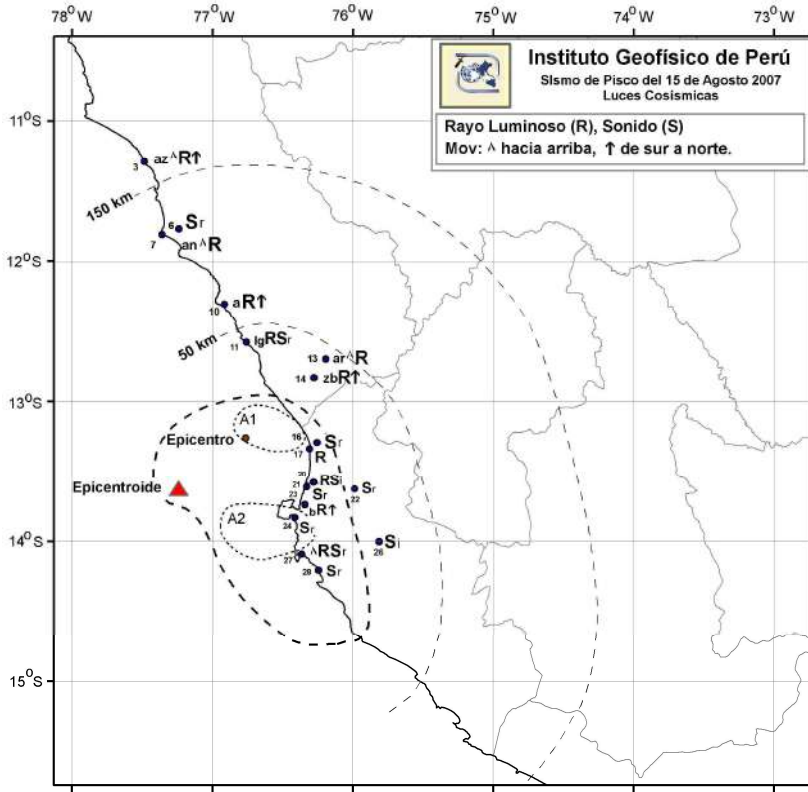


Figura 11. Distribución de los rayos (R) y sonidos (S). El mapa base es igual al de la Figura 10. Los símbolos, códigos de colores y la dirección de movimiento se presentan en la Tabla 3: Parte A y Parte B. Los códigos de los colores están a la izquierda del símbolo “R” como subíndices, el símbolo de la dirección del movimiento hacia arriba está como superíndice en lado izquierdo de la “R”. El movimiento horizontal se muestra con una flecha a la derecha de la “R”. Los subíndices a la derecha del símbolo “S” corresponden: ” r” para explosiones como reventazón e “i” para sonidos indiferenciados, normalmente persistentes. Los números asociados con los puntos corresponden a las localidades.

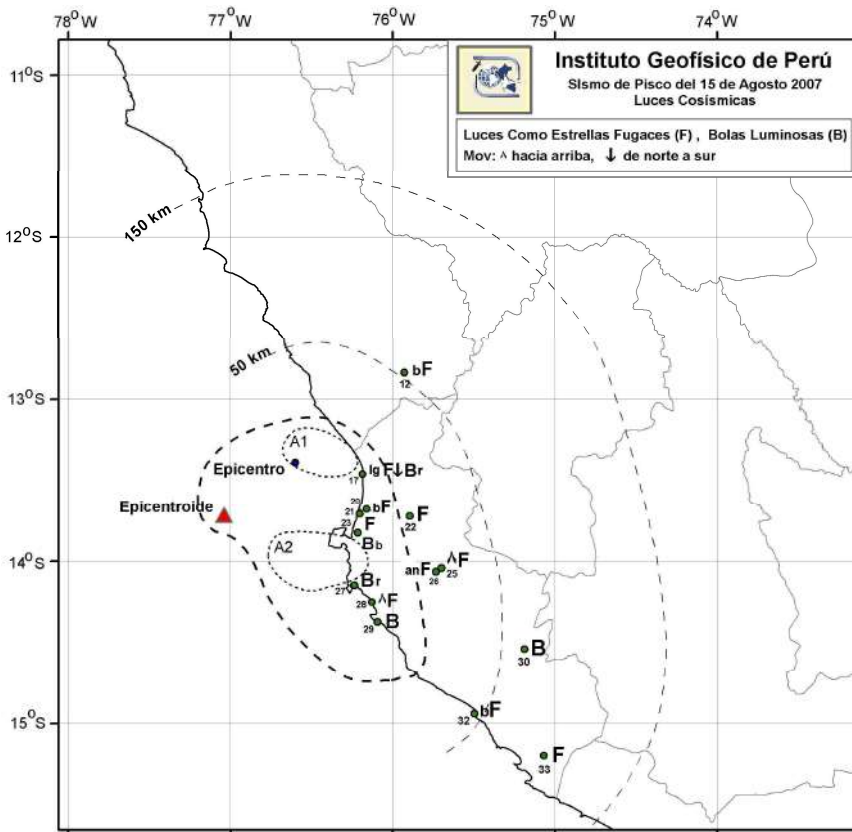


Figura 12. Distribución de las luces como estrellas fugaces (F), y las bolas luminosas (B). El mapa base es el mismo de la Figura 10. Los símbolos, códigos de colores y la dirección de movimiento se presentan en la Tabla 3: Parte A y Parte B. Los códigos de los colores están a la izquierda del símbolo “F” como subíndices, el símbolo de la dirección del movimiento hacia arriba está como superíndice en lado izquierdo de la “F”. El movimiento horizontal se muestra con una flecha a la derecha de la “F”. Los subíndices a la derecha del símbolo “B” corresponden al color. Los números asociados con los puntos corresponden a las localidades.

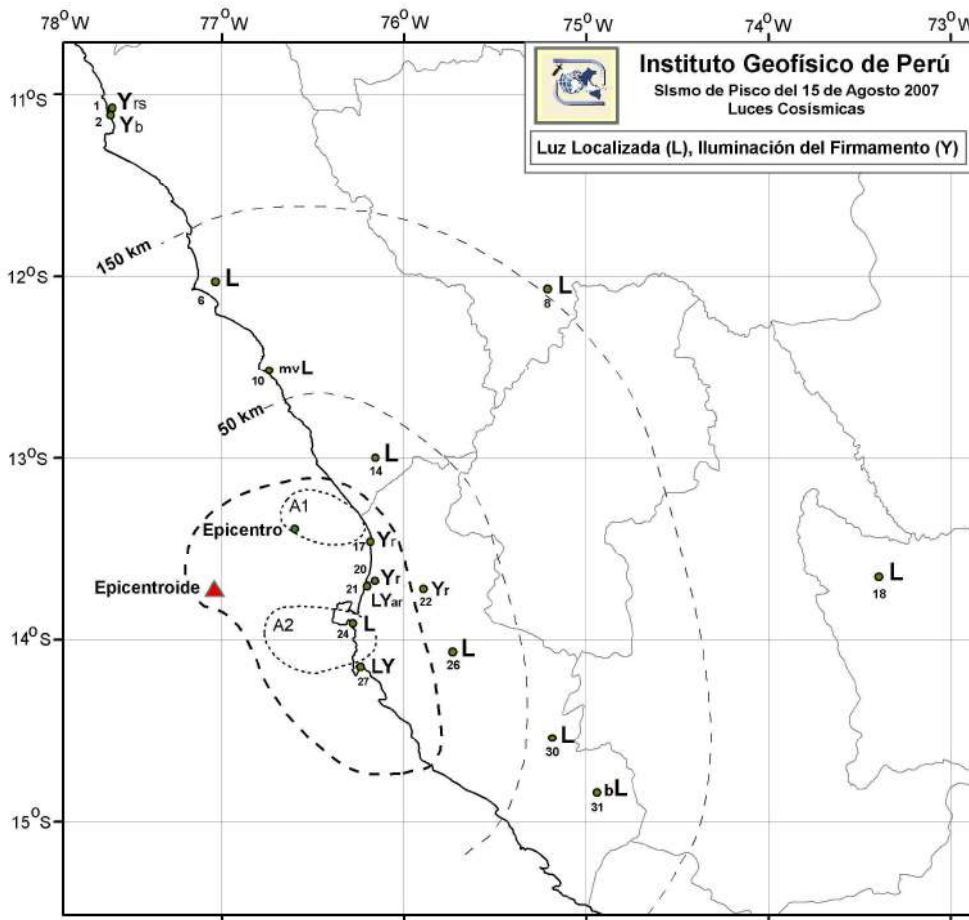


Figura 13. Distribución de las luces localizadas sin mayor información (L), e iluminación general del firmamento (Y). El mapa base es el mismo de la Figura 10. Los símbolos, códigos de colores se presentan en la Tabla 3: Parte A y Parte B. Los códigos de los colores están a la izquierda del símbolo “L” como subíndices. Los subíndices a la derecha del símbolo “Y” corresponden al color. Los números asociados con los puntos corresponden a las localidades.

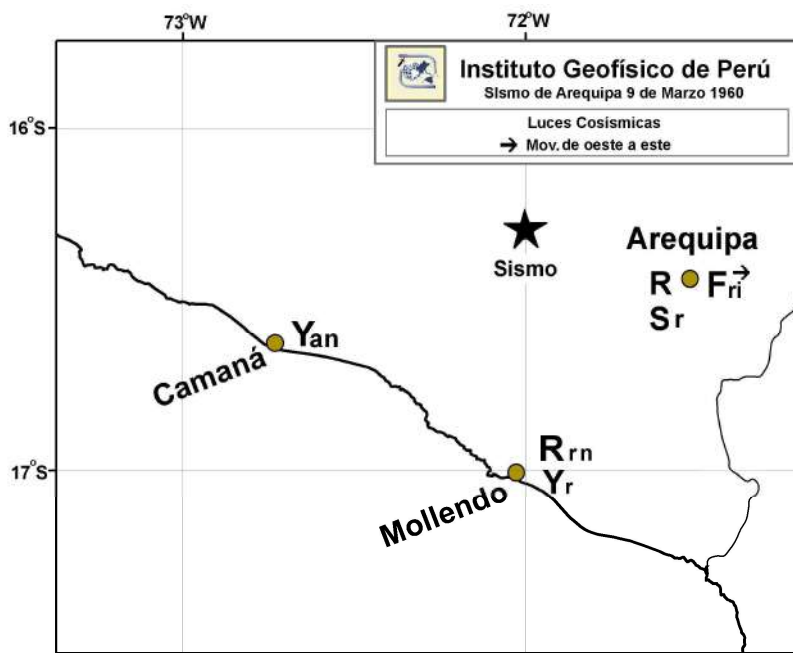


Figura 14. Distribución de las luces reportadas para el sismo del 9 de marzo de 1960, de una magnitud de 6.1 PAS. Este sismo se le considera como una réplica del terremoto de Arequipa del 13 de enero de 1960. Los símbolos de los fenómenos y códigos de colores son los mismos de la Tabla 2. Los subíndices a la derecha de los símbolos de los fenómenos corresponden al color.

TSUNAMI

OBSERVACIONES DEL TSUNAMI ASOCIADO CON EL TERREMOTO DE PISCO DEL 15 DE AGOSTO DEL 2007

Ronald F. Woodman Pollit
Instituto Geofísico del Perú

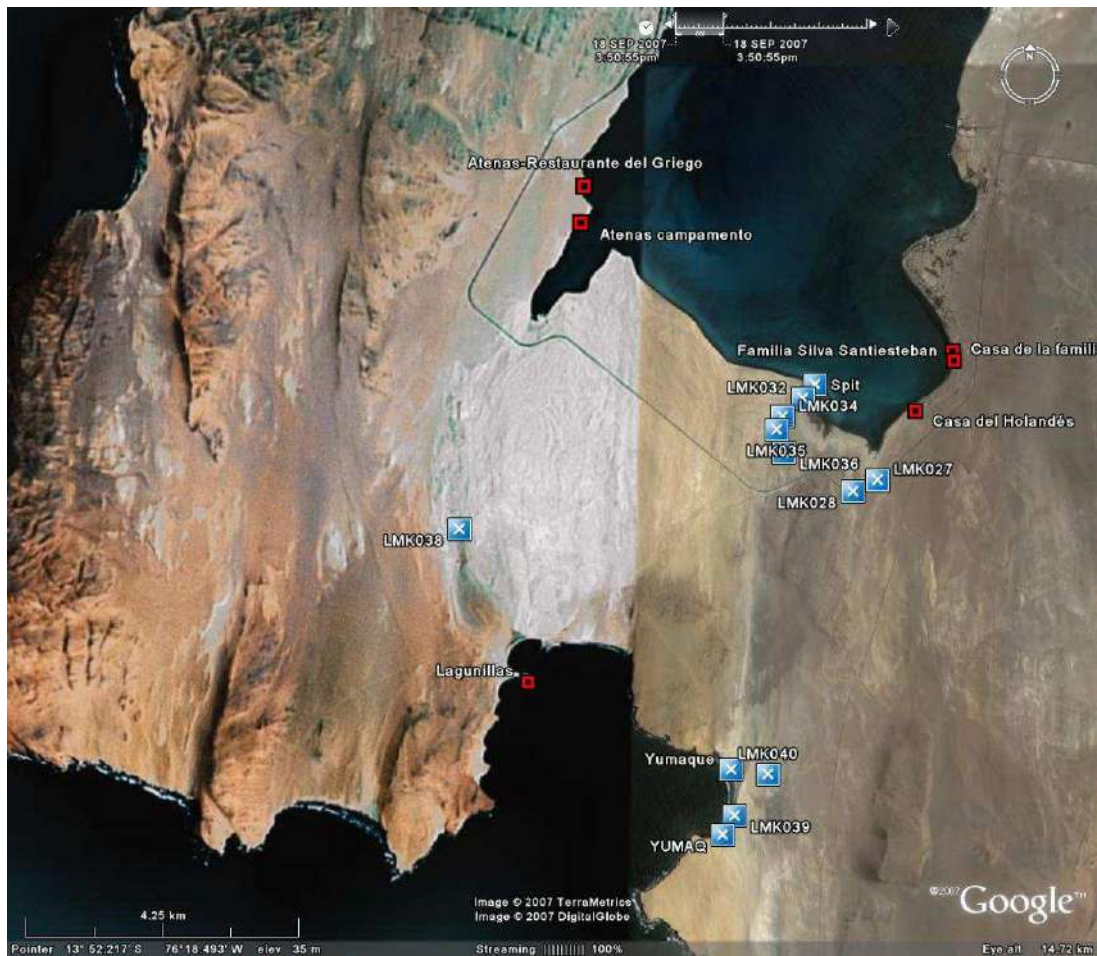
Nota al Lector.

El formato original de este reporte es como un archivo .kml de Google Earth. La forma adecuada de verlo es entrando a Internet, al portal del IGP (<http://www.igp.gob.pe>) y luego haciendo un click en el enlace Tsunami Pisco-Paracas en la esquina superior izquierda de la pagina (o entrando directamente a http://www.igp.gob.pe/tsunami_sismo.html). Esto activará un archivo kml y lo "volará" a los lugares visitados, le mostrara fotos con sus respectivas anotaciones y observaciones. Para este informe escrito, hemos extraído los mapas satelitales mostrando los puntos visitados con sus marcas y coordenadas GPS, y las fotos de interés con sus respectivas leyendas y anotaciones. Esta es la razón por las que su formato no es el de un informe común.

El texto en cursiva son observaciones adicionales que no se encuentran en la versión actual del archivo kml. Si tiene el CD y está conectado a Internet puede ejecutar el kml haciendo un clic en el archivo Tsunami_cd.kml.

RESUMEN

La altura alcanzada frente a la playa del balneario de Paracas fue del orden de 3 metros, pero en la costas sur de la península alcanzaron los 5.6 metros en la caleta de Ventanilla y 10 metros en el roquerío al sur de la playa de Yumaque. Sorprendentemente, la altura máxima frente a la caleta de pescadores ubicada en Laguna Grande, donde se esperaba el máximo impacto, fue solo de 1 metro, pero de 3 metros en el "rompeolas" natural que lo protege (medido en la playa Chucho). Hubo un segundo tsunami después de la media noche (con tiempos de ocurrencia un poco difusos) con un nivel no menor de 2.34 m sobre la marea más alta.



Mapa 1. Lugares visitados en las cercanías de la Península a los dos días de ocurrido el sismo, con excepción de la playa de Atenas.



Casa de la Familia Woodman

Casa de la familia Woodman (Lon-76.25039, Lat-13.85243). La casa de la familia Woodman se encuentra sobre una colina cerca de 8 metros sobre el nivel del mar. El área entre la casa y la orilla del mar tiene una pendiente suave. El mar alcanzó 3.10 m. (ver círculo rojo) sobre la marea más alta del día de la medición (24-8-2007). En estacas colocadas en la pendiente similar frente a las casas de los vecinos Colichón y Ruiz se estimó 3.30 m.

Con excepción de un par de casas y el Hotel Paracas que tuvieron problemas de suelo y cimentación, todas las casa de concreto armado y ladrillo resistieron muy bien el sismo. Pero el tsunami produjo daños considerables (no-estructurales, con excepción de algunos muros perimétricos) en las casas que se encontraban a aproximadamente un metro sobre el nivel de la marea mas alta.

Después del sismo se nota una subsidencia de la playa, y de sus bordes secos, del orden de unos 20 cm. Esto lo evidencia una loza de concreto que se encontraba al nivel de la marea seca (de luna nueva) y que hoy día se encuentra enterrada a 20 cm por debajo de este mismo nivel. Lo evidencia también la desaparición de la playa en marea seca entre el malecón y el borde del mar y la erosión del cordón litoral que existe al borde del mar al sur de la casa de la familia Sarfari.



Foto mostrando la erosión sufrida por el cordón litoral al sur de Paracas (Dominguito). Antes del sismo el cordón litoral de arena (de 3 a 4 metros de altura) estaba cubierto en su totalidad por lagartija (una suculenta que también se le conoce como verdolaga) que se observa en la cima del cordón. La cara del cordón que da al mar era una superficie suave y continua y la línea de contacto con la playa era recta y se encontraba a más de un metro a la derecha del límite actual. La erosión que se muestra es evidencia que el nivel de la marea es más alta que antes o, más apropiadamente, que la playa se ha hundido. Estimamos una subsidencia de 20-30 cm.



Casa de botes de los Silva Santiesteban

Cuarto de botes de la familia Sarfati (Lon -76.25059, Lat -13.85111).

Medición hecha al lado de la casa de botes de Sarfati. El mar dejó una marca horizontal muy conspicua sobre la pared blanca en el interior del cuarto de botes frente

a la casa de la familia Sarfari coincidente con las arenas mojadas por el tsunami. Se midió la altura usando un nivel Wild y se obtuvo. 3.33 m. sobre el nivel de la marea mas alta del día (24-'8-'07).



Casa del Holandés

Casa del Holandés (*Lon -76.25581, Lat -3.85956*)

Casa de Sjen Hoefloof. Se estimó la altura máxima de inundación, midiendo con una cinta de medir (metro) la altura de las manchas horizontales dejadas sobre la pared con respecto a las aguas dejadas en su cercanía por la marea más alta. Se estimó una altura de 2.30 m.



LMK027 (Lon -76.26136, Lat -13.86945)

Se observó que el tsunami rebosó la pista en este punto y los siguientes lugares de menor altura.

LMK028 (Lon -76.2649, Lat -13.87106)

Lo mismo que LMK027.



LMK036 (Lon -76.27500, Lat -13.86583)

Máximo nivel alcanzado por el tsunami *en las cercanías del museo de sitio*. Se marca con una estaca y piedra. No se mide altura, pero las coordenadas fueron medidas con un GPS.

LMK035 (Lon -76.27606, Lat -13.86263)

Se observan grietas en la roca (Formación Paracas)

LMK034 (Lon -76.27523, Lat -13.86076)

Se observan grietas en la roca

LMK032 (Lon -76.27231, Lat -13.85816)

Se marca la máxima altura con estaca y piedra. Se mide con respecto a la marea más alta. Altura observada= 3.72 m con respecto a la marea mas alta del día* (26-8-2007)

* Nivel de la marea más alta difícil de estimar. Podría ser unos 20cm más alta pero no más baja.



Spit (Lon -76.27058, Lat -13.85622)

Buena parte de este “spit” ha desaparecido en marea alta, incluyendo parte del cordón litoral adyacente (montículo lineal de arena a lo largo del borde de la playa estabilizado por verdolaga). *Las dos islas que se ven cerca de la orilla es lo único que quedó de un cordón litoral de arena. La foto se tomo tres días después del sismo. Seis meses después, quedan solo vestigios. Estas han sido erosionadas por el mar, evidencia de la subsidencia del suelo en toda la bahía.*



Atenas-Restaurante del Griego (Lon -76.30405, Lat -13.82861)

Se observa el borde de basura y objetos flotantes atrás del restaurante a 2.40 m sobre el nivel de la marea mas alta del día. Según Pedro Castillo, pescador, él se encontraba en su bote un poco al norte del lugar. Sintió el sismo. Luego de unos 10 minutos (podrían ser 15) notó que la marea estaba secando y decidió anclar su bote 30 metros

más afuera. Cuando termino de hacerlo, entro una ola reventando haciendo un ruido aterrador. Estima que la espuma tendría 1.50 de espesor. Le puso la proa del bote aun así hizo saltar al bote aparatosamente. Pasada la ola llego luego un rebote de playa. No hubo más olas reventadas pero toda la noche la pasó en vela, junto con otros pescadores, pues habían grandes correntadas cambiando continuamente de dirección.



Atenas campamento (Lon -76.30444, Lat -13.83377)

Se deja una estaca al borde de la basura flotante dejada por el tsunami a unos 100 m al sur del lugar de campamento (en primer plano). Se encuentra a 3.20m de la marea del momento (11 AM 16-9-07) o 2.60 m de la marea mas alta del día.

Según el Sr. Ormeño, "El Griego", dueño del restaurante Atenas, después del sismo, el nivel del mar promedio está unos 20 cm mas alto (subsistencia de la playa). Similar a la subsistencia observada en Paracas





LMK038 (Lon -76.3216, Lat-13.8771)

Incursión máxima de las aguas que entraron por Lagunilla. No se puso estaca pero las coordenadas fueron tomadas con GPS. Se encuentra a 2km de la playa existente antes del tsunami. Un bote de pescadores (en la foto) se encontraba a unos 1.5 Km. de la playa.



Lagunillas (Lon -76.31119, Lat -13.89829)

Máxima altura del Tsunami 5.6 m sobre la marea más alta del día (25/8/2007). El tsunami destruyó 4 restaurantes turísticos que habían resistido muy bien el sismo. Tumbo las paredes y arrebató el techo de algunas de las construcciones. Tres personas murieron por el tsunami. Juan Arce sobrevivió al tsunami. Se quedó tratando de salvar a una de las víctimas, una señora de edad, y cuenta que en un momento tenía la cara contra el techo buscando aire para respirar. Se aferró a una columna para que no lo arrastrara el mar. Observo 4 crecidas, la última la más alta. *Estima que la primera llegó unos 15 minutos después del sismo, antes observo que el mar se retiró dejando una roca frente a su playa en seco.*

La altura máxima se midió en el extremo de la mancha húmeda en el centro del borde izquierdo de la siguiente foto.



LMK040 (*Lon -76.27658, Lat -13.91086*)

Estaca marcando la incursión máxima (run-up) del tsunami detrás de la playa de Yumaque. Este es un área bastante plana. Sus coordenadas se midieron con GPS y se encuentra a unos 500m de la playa. Se midió posteriormente 4.05 m. de altura con respecto a la marea más alta del día (15-9-07). Para conformar esta medida con las otras mucho más altas en la misma playa (LMK039 y YUMAQ) hay que tener en cuenta que las otras forman parte de un acantilado vertical que amplificaría el nivel por reflexión. Adicionalmente, hay la posibilidad de un oleaje adicional producido por desprendimientos en el acantilado.

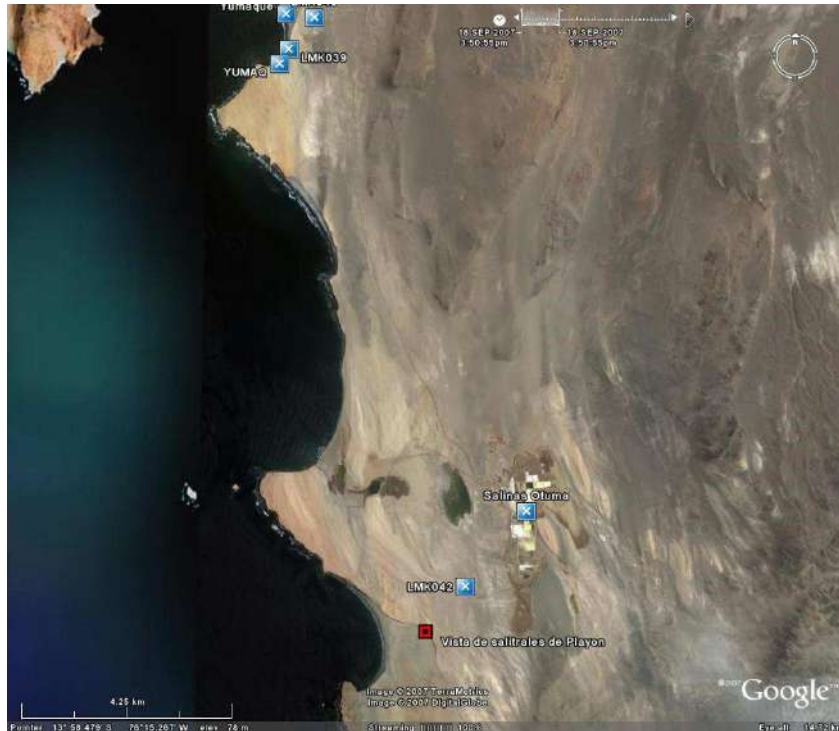
Zumaque

Playa Yumaque (*Lon -76.28188, Lat -13.91027*)



LMK039 (*Lon -76.2813, Lat -13.91673*)

Estaca sobre una duna eólica, que descansa sobre el acantilado rocoso, marcando la excursión máxima del tsunami a una altura de 8.5 m sobre el nivel de la marea más alta del día (26/8/2007).



Mapa 2. Foto satelital mostrando la posición relativa de Yumaque, Salinas Otuma y de Playón



YUMAQ (Lon -76.282983, Lat -13.91943)

Similar a LMK 039, pero la altura es más alta. La más alta registrada en toda el área visitada, con una altura máxima de 10.15 m. sobre la marea más alta del día. La marca de humedad y algas dejadas en el borde muestran ondulaciones que se pueden interpretar como olas bastante altas sobrepuestas sobre el nivel medio de la marea-tsunami. Quedan unas estacas marcando niveles parciales medidos y una en el punto más alto.



Salinas Otuma (*Lon -76.23569, Lat -14.00029*)

Los salitrales naturales entre Salinas Otuma y la playa Zarate se inundaron completamente. No se midió la altura de la máxima incursión de las aguas. La foto muestra la laguna natural a la derecha del camino a Mendieta desde la cuesta al sur de Salinas Otuma mirando hacia el norte.



LMK042 (*Lon -76.24685, Lat -14.01416*)

Grietas observadas en la roca cerca de la cima de un promontorio bastante alto y alejado del salitral de la zona baja. Si no fueron producidas por el sismo, fueron puestas en evidencia por el mismo.

Vista de salitrales de Playón (19-8-2007) (*Lon -76.25395, Lat -14.02240*)

Los salitrales de Playón y Mendieta se inundaron completamente. La foto muestra las lagunas formadas, existentes todavía, 3 días más tarde. El landmark muestra el lugar desde donde se tomo la foto, mirando hacia al sur. Este mostraba una serie de grietas (ver primer plano). *El mar esta a la derecha.*

Dunas de Playón (*Lon -76.27007, Lat -14.022340*)

Al fondo un cordón de Dunas. En este se ha colocado una estaca con las coordenadas de "Dunas de Playón" correspondiente al máximo nivel de las aguas a juzgar por la basura flotante dejada sobre las Dunas. Su altura sobre el nivel de la marea más alta de la fecha en que se hizo la medición (9-10-2007) es de 3.5 m. El borde oscuro que se aprecia en la foto alejándose del lugar de observación hacia la playa al centro de la imagen, es basura flotante, dejada por la permanencia temporal de las aguas inundantes y el viento. Este nivel es inferior a la línea dejada por la máxima altura de las aguas y evidenciadas por una delgada costra salitrosa producto de la evaporación de las arenas mojadas por esta. (no se muestra en la foto).



Laguna Grande (*Lon -76.25190, Lat -14.15103*)

Pueblo de pescadores. Se esperaba que fuera uno de los poblados más afectados por su cercanía al punto de máximo desplazamiento, pero la máxima altura del tsunami alcanzó solo 1 metro. Podría explicarse por lo reducido de la boca (antes del tsunami) en comparación con la extensión de la laguna, el tsunami no logró llenar la laguna en el corto tiempo que tuvo disponible.

Chucho (*Lon -76.23642, Lat -14.14829*)

Playa pedregosa abierta hacia el sur. La única protección es la Isla Independencia. Máxima altura del tsunami 3.4 m. sobre el nivel de la marea del momento (26-8-2007 2:00 PM.). Se clavó una estaca marcada con dos piedras.



Tunga (Lon -76.12928, Lat -14.25142)

Carhuas

Al extremo sur de la playa de Carhuas hay un caserío de pescadores dedicados al cultivo de conchas de abanico. Le llaman Tunga. Unos metros más al norte hay un conchal antiguo. Allí se observó, semanas después del tsunami, un borde de ola marcado por medias conchitas de choros muertos y partidos y otra basura flotante arrastrada y dejadas allí por la máxima incursión del tsunami. Se midió su altura, 2.90m sobre el nivel de la marea más alta del día (15-9-07), Corresponde a la mano izquierda del portamira en la foto. Un poco más al norte, pasando el extremo del conchal, el mar pudo rebasar el pequeño acantilado que limita la playa y penetro sobre una pendiente suave alcanzando solo 1.90m.

La diferencia entre estas dos cotas se puede explicar si consideramos que la primera puede incluir una ola superpuesta a nivel medio.



La foto muestra parcialmente el área inundada, tomada desde un alto al norte de la playa. Incursión del mar. Lon -76.09507, Lat -14.3200.

Morro Quemado

Al norte de Morro Quemado se encuentra Playa Ventosa. Anteriormente estaba delimitada por un cordón litoral de dunas. Estas fueron rebasadas y arrasadas por el tsunami, invadió las tierras bajas, en buena parte salitrosas, que se encuentran detrás del cordón litoral. El agua incursionó hasta el punto marcado en la imagen (Lon - 76.09507, Lat -14.3200), se ubicó usando un GPS. No se midió su altura.

Foto de la defensa del río tomada desde el puente.



Puente en Tambo de Mora (Lon -76.185722, Lat -13.46411)

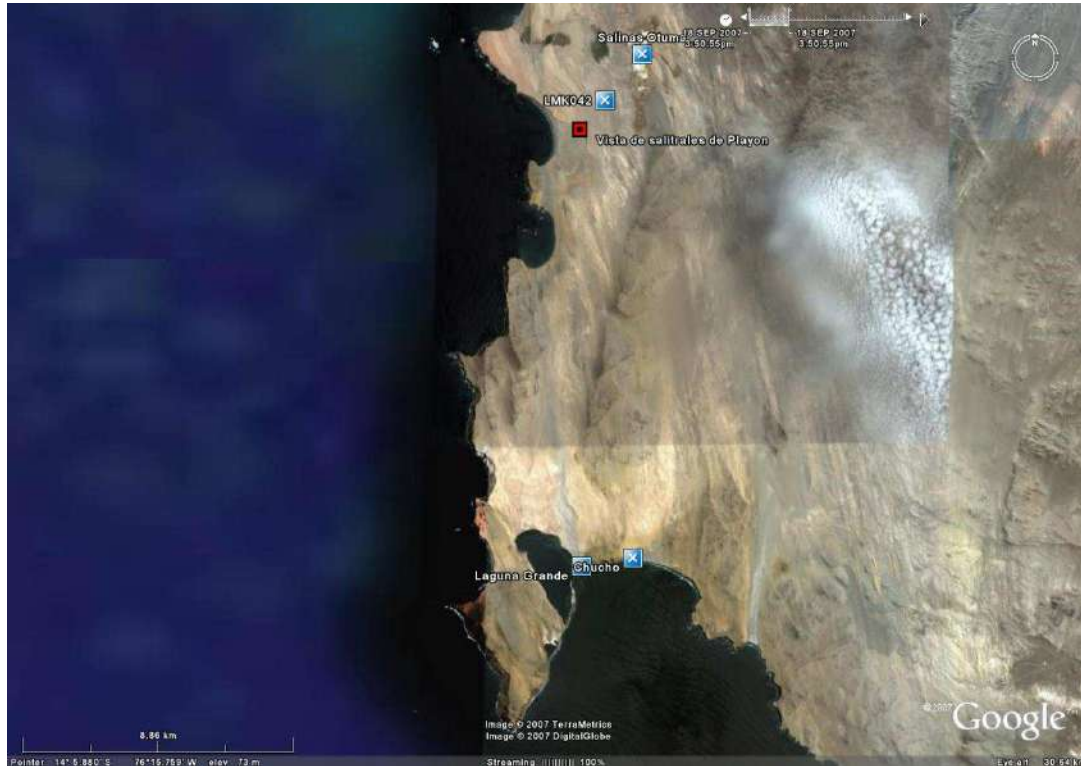
La foto muestra restos de yerbas dejadas por el nivel máximo del tsunami, atrapadas en la malla que contiene las defensas del río a aproximadamente 2 m. o más (a ojo de buen cubero) sobre el nivel de las aguas del río.



Foto de la playa

Club de Regatas San Antonio (Lon -76.68814, Lat-12.61022)

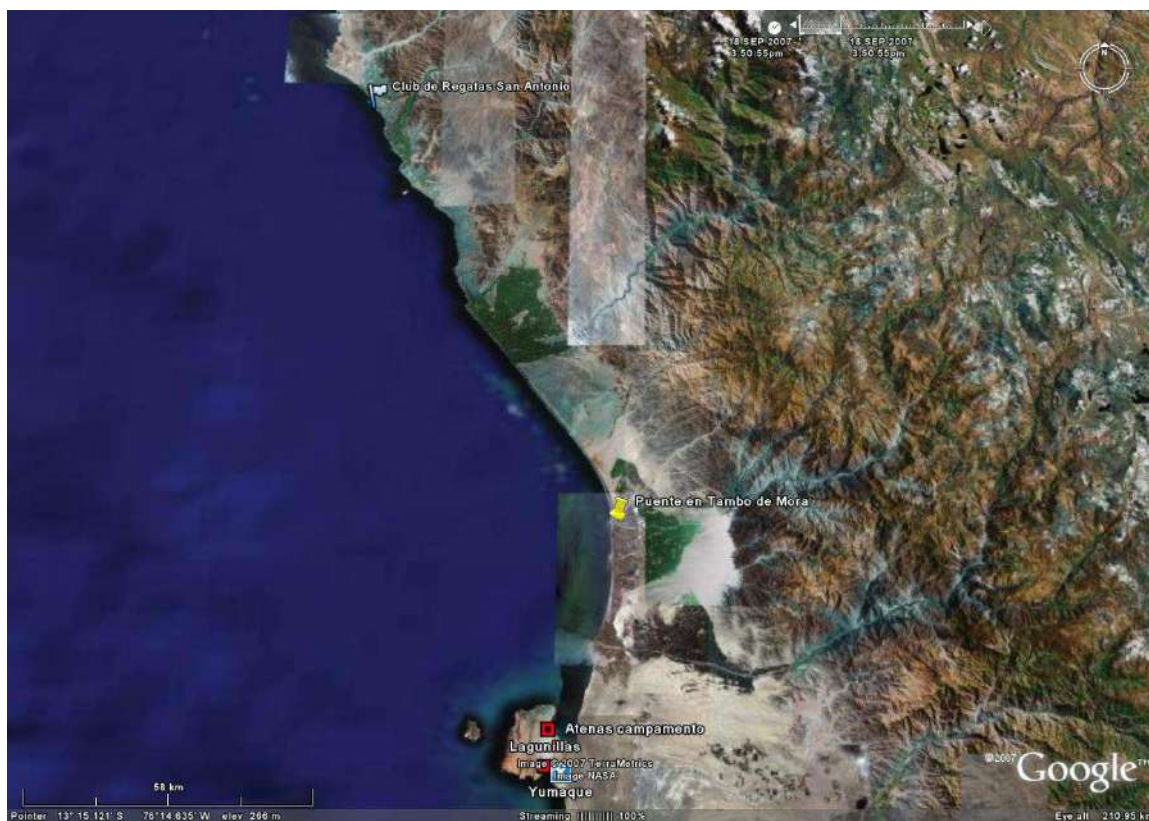
Se midió la altura del runup. La playa mojada se aprecia entre las sombrillas y el malecón. Altura 1.5 m sobre el nivel de la marea más alta del día.



Mapa 3. Mostrando la posición relativa de Laguna Grande en relación a Salinas Otuma



Mapa 4. Mostrando la posición relativa de Carhuas y Morro Quemado



Mapa 5. Mostrando posiciones relativas de Tambo de Mora, el Club Regatas y la península de Paracas

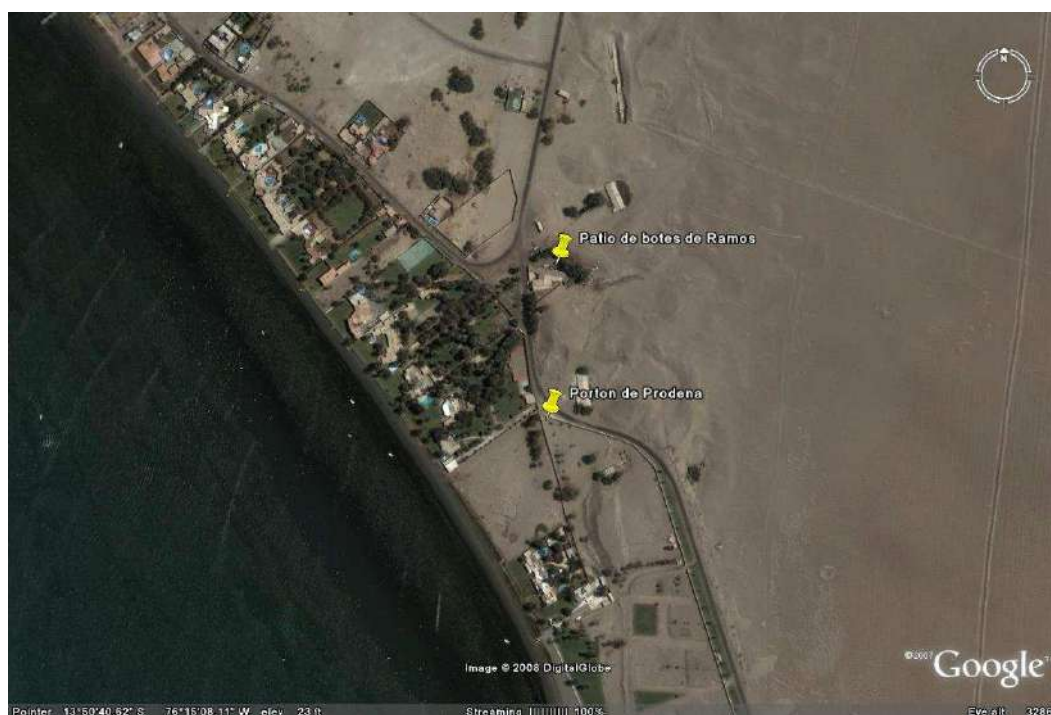
Un segundo Tsunami

Se tiene tres testimonios que relatan la existencia de un segundo Tsunami entre las 12:30 am y la 1:00 am. Según la familia Ramos, que ofrece servicios náuticos y que tiene una casa en la segunda rivera, detrás de la casa de la familia Custer, este segundo tsunami alcanzó una altura mayor que la anterior frente a su casa. La cota alcanzada por este segundo tsunami es de 2.35m en el patio de botes de la familia Ramos (13°50'42.5''S, 76°15'7.78''W) con respecto al nivel del mar dejado por la marea más alta del día (3-11-2007). El agua ingreso por el sur. A unos 170 metros de distancia en dirección sur se encuentra la puerta de entrada a Prodena, (13°50'42.5''S, 76°15'7.78''W) (hoy una urbanización), a unos 130 metros del mar, sin ninguna obstrucción entre el mar y la puerta. El tsunami dejó varias marcas sobre esta, la más alta tiene una cota de 3.02m sobre la misma referencia. Esto indica que no hubo un equilibrio estático entre estos dos puntos y que debe haber habido una correntada de agua, la que nunca logro llevar a la gran extensión que trataba de inundar al mismo nivel. Una cota mayor del segundo tsunami con respecto al primero se debería a que el segundo tsunami encontró la parte trasera de la primera rivera ya inundada a un cierto nivel y pudo alcanzar mayor nivel que el primero con el flujo limitado de aguas que recibía.

En todo caso es interesante el reporte de un tsunami de esta magnitud (de por lo menos 2.35 m) a esa hora. La réplica más intensa, anterior a este evento, ocurrió a las 12:16:54.82 am HL frente a la bahía Independencia (Lon -76.2929, Lat -14.3744), a una profundidad de 13.9 km y tuvo una magnitud de 6.2 ML (fuente, IGP). Habría que determinar el centroide del área de ruptura, el que a juzgar por la profundidad del hipocentro bien podría ser lo suficientemente superficial para explicar el tsunami generado.

Con respecto a la hora, el Oficial de Mar Beltran quien viene a Paracas después del sismo, estima que el segundo tsunami ocurre una hora después de las 11:30pm que el, estima, deja Pisco. Lo coge auxiliando a un auto de la policia que tiene problemas. Esteban Ramos auxilia al mismo auto y presencia el mismo incidente. Según Ramos la segunda llena ocurre entre las 12:30 y la 1 :30 am, no puede ser más preciso. Lo que confunde el relato es que Carlos Calderon, guardián de una de las casas, se encuentra en el techo de esta y escucha el estruendo de una gran ola que golpea el rompe olas frente a la casa y entra con gran estruendo tambien en el callejón que lo separa de la casa vecina. Según él, el evento ocurre a las 1:30 am según el reloj de

su celular. Es el único que menciona ver la hora en un reloj, pero esta no concuerda con la ocurrencia de la réplica fuerte de las 12:16 am



Mapa 6. Mapa satelital mostrando la posición relativa de la casa de la familia Ramos, el portón de Prodena y el mar



Patio de botes de la Familia Ramos. El segundo Tsunami llego después de la media noche y llego cerca del pie del árbol al fondo. El frente de la casa no lo alcanzó el primer tsunami.

El tsunami en Pisco.

En Pisco se visitó la Capitanía (13°42'36''S, 76°13'07''W) y se recogió el testimonio del Oficial de Mar Beltran. Según Beltrán, los suelos bajos al lado de la loza deportiva de la Capitanía de Pisco se inundaron con unos cm. de agua al terminar el sismo, antes de que llegara el tsunami. El tsunami llegó después de aproximadamente 15 minutos de ocurrido el sismo. Hubieron tres llenas con aproximadamente 15 min. de separación. La mayor fue la segunda y alcanzó el nivel mostrado en la foto.

Las chozas que se observan en la foto satelital de Google Earth al norte del muelle, a 320 metros de su base, ya no existían el 22-9-2007. La Capitanía fue demolida, no resistió el sismo, un asentamiento de unos 20-30 cm. rompió sus cimientos



Foto mostrando el nivel máximo (línea en círculo rojo) del tsunami en lo que quedaba de los cimientos de la Capitanía de Puerto de Pisco. Notar que el nivel no rebasó el piso del antiguo malecón. El malecón se encuentra hoy en día a cerca de 500 metros de la orilla del mar antes del sismo. El arenamiento lo han producido los sedimentos del río Pisco.

Volcanes de lodo

Se tiene un testimonio indirecto de un pescador aficionado que estaba cerca de la playa Mendieta que vio, durante el sismo, un chorro de agua salir del suelo del salitral y que alcanzó unos 2 metros de altura. Debe haber sido producto de la liquefacción de los suelos del salitral que queda detrás de las playas de Playón y Mendieta.....///

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL TSUNAMI DEL 15 DE AGOSTO DE 2007

Sheila Yauri, Hernando Tavera, Geremias Moncca y Bilha Herrera

Dirección de Sismología – CNDG

RESUMEN

En el presente estudio se evalúa y analiza las características del tsunami generado por el sismo de Pisco del 15 de Agosto del 2007. Este tsunami se originó 15-20 minutos después de ocurrido el sismo, alcanzando por el Norte las playas de Lima y por el Sur Paracas, siendo esta última localidad la más afectada con una altura máxima de inundación (run-up) de 6 metros y distancia máxima de inundación de 2000 metros en la playa Lagunillas. Los principales resultados se presentan en descripciones y mapas de alturas y distancias de inundación generados por el tsunami.

INTRODUCCIÓN

El Perú es uno de los países con mayor potencial sísmico debido a que forma parte del denominado “Cinturón de Fuego del Pacífico”. Dentro de este contexto la actividad sísmica esta asociada a la interacción de las placas de Nazca y Sudamericana, las mismas que dan origen al proceso conocido como subducción y mediante el cual, la placa de Nazca (oceánica) se introduce por debajo de la Sudamericana (continental) con una velocidad de 8-10 cm por año (DeMets , 1990 y Norabuena et al, 1999). Este proceso a dado origen a los mas grandes terremotos ocurridos en el Perú, generando en algunos casos tsunamis de carácter local, regional y transoceánicos. Uno de los tsunamis más antiguos del cual se tiene conocimiento es el ocurrido el 22 de Enero de 1582 que habría producido daños en toda la costa sur del Perú. Estudios realizados por Lockridge (1985), refiere la ocurrencia en el Perú de 34 tsunamis entre los años de 1586 a 1974 y de los cuales diez fueron los más destructivos, entre ellos el de 1960 (Lambayeque) y 1966 (Lima) que produjeron daños en la costa norte y centro del Perú. Según Dorbath (1990), los mas grandes terremotos asociados a tsunamis ($M_w > 8.5$ y Run-up > 10 m) ocurrieron en 1604 (Tacna y Arica), 1746 (Lima) y 1868 (Arica), produciendo daños mayores en las costas peruanas. El tsunami generado por este último sismo, afecto el borde occidental de Perú desde la ciudad de Trujillo (Perú) hasta Concepción (Sur de Chile), además de las costas de Japón, Nueva Zelanda, Australia, Hawai y otras.

Según el catálogo de tsunamis para el Perú (Carpio y Tavera, 2002), las costas peruanas desde 1500 hasta el 2001 habrían sido afectadas por un total de 123 tsunamis, de los cuales 117 tendrían su origen en sismos, 5 en deslizamientos y uno a la erupción volcánica del Krakatoa (Figura 1).



Figura 1.- Distribución espacial de sismos que generaron tsunami a lo largo de la costa peruana desde 1500 al 2001.

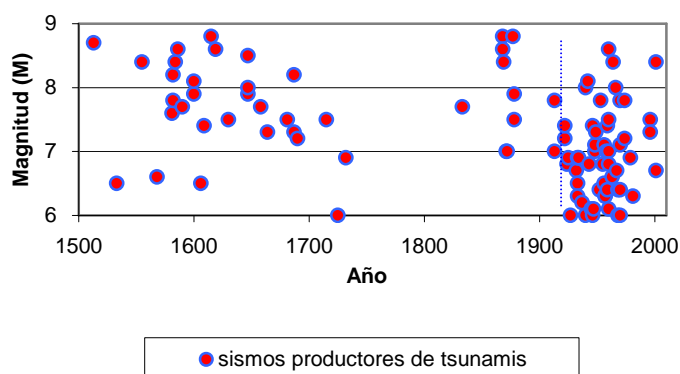


Figura 2.- Cronología de tsunamis en función de su magnitud para el período 1500-2001.

En la Figura 2 se presenta la cronología de los tsunamis ocurridos en el Perú, en función de su magnitud y en ella se observa que el Perú ha venido soportando los efectos de tsunamis con mayor frecuencia en los últimos 100 años. De tal forma, que los tres últimos tsunamis ocurridos en el Perú tuvieron lugar el 21 de Febrero, 12 de Noviembre de 1996 (Chimbote y Nazca, respectivamente) y 23 de Junio del 2001 (Arequipa), generando este último muerte y destrucción en la localidad de Camaná (Arequipa y sur del Perú) con olas de hasta 8 metros de altura y niveles de inundación de 1300 metros en la Playa “El Chiflón” cerca del río Camaná (Carpio et al, 2002).

Después de 6 años, el día 15 de Agosto del 2007, el Perú es nuevamente afectado por un sismo de gran magnitud dando origen a un tsunami que afectó a las costas de la región central de Perú. Después de ocurrido el sismo, personal del IGP se traslada a la zona afectada por el tsunami a fin de evaluar sus características y daños ocasionados en las costas de Chincha, Pisco, y Paracas. En este estudio, se describe de manera general la información recolectada, indicando las distancias de inundación y niveles de Run-up.

TSUNAMI DEL 15 DE AGOSTO DEL 2007

El 15 de Agosto del 2007, tras un gran sismo ocurrido a las 23:40 GMT (18:40 hora local), con epicentro a 74 km al Oeste de la ciudad de Pisco (13.67°S, 76.76°O), foco superficial y magnitud de 7.0 ML (magnitud local); se genera un tsunami que produjo daños importantes en las costas de Chincha, Pisco y Paracas, llegando en menor proporción a las playas de Lima (la Punta, Miraflores, Villa, Conchan y Lurín).

Según la dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú (DHN), la velocidad promedio a la que se desplazó la onda del tsunami fue de 135 Km/h, con periodos de 15 a 20 minutos y una longitud de onda de 35 Km. En la Figura 3, se muestra el mareograma obtenido en la estación Callao, observándose el registro de la variación normal de la mar seguida de un oleaje anómalo. Según el registro, el arribo de la primera ola del tsunami al Callao fue a las 19 horas y 34 minutos; es decir, después de 54 minutos de ocurrido el evento sísmico.

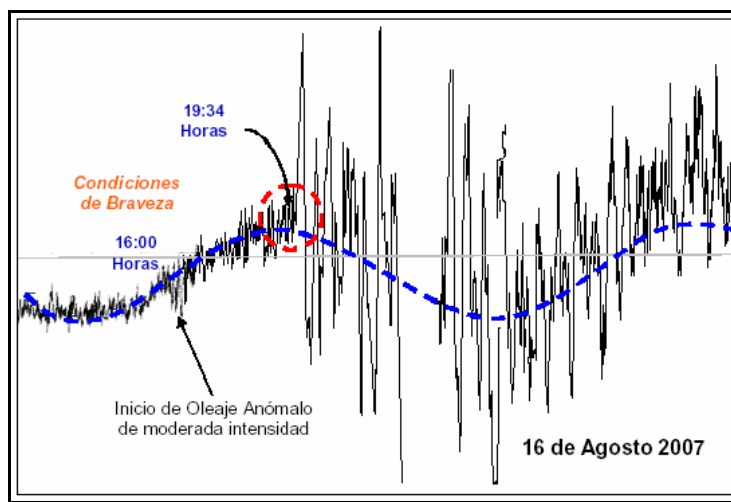


Figura 3.- Mareograma registrado en La Punta (Callao), correspondiente al tsunami del 15 de Agosto del 2007 (DHN).

A continuación, se describe las características del tsunami (niveles de inundación máxima y la altura de inundación (run-up)) observado en nueve puntos a lo largo de la línea de costa entre Chincha y Paracas en base a medidas de GPS, Ver Figura 4.

Chincha – Tambo de Mora: Según testimonios, después de 25 minutos de ocurrido el sismo en las calles Miramar y el Muelle (costas de Tambo de Mora) llegan dos olas que alcanzaron una altura máxima de inundación (Run-up) de 3 m y una distancia máxima de inundación de 520 m a la altura de la plaza Grau y en donde también se observó efectos de licuefacción del suelo.

En esta área, los daños ocasionados por el tsunami fueron mayormente en zonas de cultivo ubicadas cerca a la línea de costa y en menor magnitud en las viviendas, dado que estas se encuentran a una distancia promedio de 380 m de la playa. Los pocos daños observados fueron producto de la inundación que alcanzó niveles de 43 cm con respecto al suelo.

Pisco playa: Según testimonios, después de 15 minutos de ocurrido el sismo a la cooperativa Almirante Miguel Grau-ultima etapa (costado del río Pisco) llegan tres olas, siendo las dos ultimas de menor magnitud. La altura máxima de inundación (run-up) alcanzada fue de 3 m y distancias de inundación máxima de 765 m. En otro punto a la altura del muelle Fiscal, la distancia de inundación fue de 450 m alcanzando a la loza deportiva ubicada a un costado del muelle (Fotos 1 y 2).

En este lugar, los daños ocasionados por el tsunami fueron principalmente en viviendas ubicadas a una distancia de 711 m de la costa (costado del río). En la parte exterior de estas viviendas se midió una marca de agua a 45 cm con respecto al suelo (Fotos 3 y 4). A la altura del muelle fiscal, los daños fueron mínimos debido a la topografía y a la presencia del malecón que no permitió el ingreso del agua.

San Andrés: Según testimonios, después de 15 minutos de ocurrido el sismo la mar se retiró aproximadamente 200 m, para luego arribar a las costas de San Andrés una serie tres olas, siendo la primera lenta y alcanzando en promedio una altura de 50 cm. La segunda y tercera fueron mucho más grandes llegando hasta las viviendas. La altura máxima de inundación (run up) en esta zona fue de 2 m, con una distancia de inundación de 122 metros hasta la plaza de San Andrés.

En este punto, los daños ocasionados por el tsunami fueron principalmente por inundación en las viviendas cercanas a la línea de costa. Asimismo, se observó decenas de botes que fueron transportados e impactados frente a las viviendas que se ubican a un costado de la pista, a una distancia promedio de 70 m de la línea de costa (Foto 5) ó en otros casos a una y dos cuadras al interior del pueblo, quedando algunos destrozadas. En el exterior de algunas viviendas se nota las marcas del agua y las algas atrapadas en ventanas a una altura media de 1.54 m. Sin embargo, en el interior de otras viviendas se observó alturas de 0.80 m (Fotos 6, 7 y 8). En otro punto de la pista que conduce a Paracas, se observo la presencia de gran cantidad de arena, conchas y basuras dejadas por el tsunami (Fotos 9 y 10).

Playa Chaco: Según testimonios, después de 20 minutos de ocurrido el sismo, tres olas arribaron a la playa el Chaco, previo recogimiento del mar a distancias de aproximadamente 50 m, siendo la primera lenta en forma de renvalse, dando tiempo para que las personas salgan y cierren sus viviendas; mientras que, la segunda fue

mucho mayor arribando en forma de remolino con orientación Norte-Sur. La altura máxima de inundación (run-up) medida fue de 2 m, con una distancia máxima de inundación de 97 m frente al muelle artesanal El Chaco.

En general, los daños ocasionados por el tsunami fueron por inundación de las viviendas ubicadas frente al mar y puestos artesanales del Chaco ubicados a 20 m de la línea de costa (dañando puertas, ventanas y objetos del interior) y en donde se midió marcas de agua a 70 cm de altura con respecto a su base. Frente a las viviendas se observó algas atrapadas en las palmeras a 80 cm de altura, botes varados y depósitos de hiervas (Fotos 11, 12 y 13). Por otro lado, el muelle denominado "Atracadero El Chaco", fue levantado por las olas y dejada parte de su estructura flotando a una altura de 3.40 m (Fotos 14 y 15).

Paracas: Según testimonios del vigilante del Hotel Paracas, quien se acercó a la playa después de ocurrido el sismo, indica que la mar se retiró hasta una distancia aproximada de 100 m, lo que le permitió dar aviso a la gente del lugar. Después de 20 minutos de ocurrido el sismo arribaron a la costa una serie de tres olas que alcanzaron alturas máximas de inundación (run-up) de 3 metros y distancias máximas de 575 m. En otro punto ubicado en el centro del balneario, la mar ingresó a mayor distancia alcanzando a la laguna de Paracas para aumentar el volumen normal del agua (Fotos 16 y 17)

En esta zona, los daños fueron por inundación e impacto de las olas en las viviendas cercanas a la playa destruyendo en algunos casos ventanas, puertas y depositando algas y arena en su interior (distancia promedio de 7 m en la parte central y 30 m en los extremos) del balneario, ver Fotos 18 y 19. A esta inundación contribuyó la configuración de la Bahía y la pendiente suave de la misma. En las viviendas, la altura de la marca del agua es de 1.50 m sobre la superficie (Fotos 20, 21 y 22).

Santo Domingo: En esta zona la distancia máxima de inundación fue de 350 m debido a la topografía suave del lugar y porque parte de la zona está descampada, lo cual permitió que las olas se desplacen sin dificultad. En esta zona, se observaron palmeras arrastradas a decenas de metros de su posición original. Asimismo, en una de las viviendas ubicadas a 76 m de distancia desde la línea de costa se midió 85 cm de altura para la marca del agua (Foto 21).

Museo de Paracas: A la altura del museo de Paracas se observó que probablemente la mar tuvo un gran desplazamiento ya que alcanzó distancias máximas de inundación entre 700-870 m sin alcanzar el museo. A unos cientos de metros antes de llegar al museo (frente al cerro colorado), se observó que la mar sobrepasó la carretera que conduce a la Reserva Nacional de Paracas y puerto San Martín, en donde se midió una altura máxima de inundación de 6 m (Foto 23).

En esta zona, por ser desértica y deshabitada no hubo daños. Únicamente el mirador de aves de madera y base de concreto ubicada a unos cuantos metros de la playa fue socavado y parte de su estructura arrastrada por las olas a 48 y 54 m de su posición original en dirección Sur (Fotos 24 y 25).

Lagunillas: Según testimonios de los 3 sobrevivientes del lugar, después de 15 minutos de ocurrido el sismo de Pisco arribaron a sus costas una ola pequeña seguida de otra mucho mas grande produciendo gran ruido a su paso. La altura máxima de inundación fue de 6 m y hacia el extremo noreste de la caleta, lugar descampado y con topografía suave, la mar alcanzo una distancia máxima de inundación de 2000 m, lo cual generó cambios en la morfología de esta zona debido al flujo y reflujos del agua dando la sensación de hundimiento del terreno.

Los daños ocasionados en esta zona fueron por el impacto de las olas sobre las estructuras, que destruyeron los cuatro restaurantes turísticos existentes en la zona y de los cuales solo quedaron en pie sus columnas (Fotos 26 y 27). En este lugar se ha producido la muerte de tres personas por el impacto del tsunami (mujeres de 43, 56 y 86 años de edad). Asimismo, se ha observado la presencia de un lobo marino muerto a 150 m de la línea de costa y una bolichera varada a 1500 m de distancia.

Laguna grande: Según testimonios de los habitantes de la zona de Rancherío, después de 15 minutos de ocurrido el sismo dos olas arribaron a esta zona previo impacto en los acantilados. En la zona, la altura máxima de inundación (run-up) fue de 1 m, ingresando las olas por detrás de las 32 viviendas de adobe, quincha y esteras propiedad de los pescadores. En general, los daños en las viviendas fueron mínimos. El mayor impacto fue en la fauna marina ya que se observó en la playa cerca de una decena de lobos marinos muertos en grupos de dos y tres (Foto 28).

Por otro lado, en la zona denominada “El Muelle”, la mar subió cerca de 10 cm por encima del muelle sin generar daño alguno en las viviendas ya que se encuentran en la parte alta a una distancia promedio de 45 m del muelle.

DAÑOS CAUSADOS POR EL TSUNAMI

Los daños característicos causados por el tsunami fueron principalmente por inundación en viviendas y terrenos de cultivo ubicados cerca de la línea de costa desde Tambo de Mora hasta el Balneario de Paracas. En todo el tramo, la inundación promedio alcanzó una altura de 70 cm en el interior de las viviendas dejando malogrando todo tipo de objetos personales (colchones, ropas, artefactos, etc.). En la playa Lagunillas, los daños fueron por impacto e inundación quedando las cuatro viviendas existentes reducido a escombros, además de provocar la muerte de tres personas.

Otros tipos de daños en menor proporción fueron generados por socavamiento. Por ejemplo, la base del mirador de aves ubicada frente al museo de Paracas, fue socavada y parte de su estructura transportada a 54 metros de distancia. Asimismo, una parte de la estructura del muelle artesanal “El Chaco” fue removida quedando suspendida a 3.40 m de altura.

Por otro lado, el proceso de flujo del agua tuvo un papel importante en la producción de daños al transportar todo tipo de objetos a grandes distancias como los observados en San Andrés y el Chaco, donde los botes fueron impactados y en algunos casos destruidos frente a las viviendas ó en el caso de Lagunillas, donde estos fueron transportados a grandes distancias.

CONCLUSIONES

De acuerdo a la información analizada y evaluada, el tsunami generado por el sismo de Pisco del 15 de Agosto del 2007, fue de carácter regional alcanzando las costas de Lima por el Norte y Arequipa por el Sur. Los mayores daños se concentraron en las costas de Chincha, Pisco y Paracas, siendo de consideración en este último.

Ocurrido el sismo, el tiempo que demoro el tsunami al arribar a las costas de Chincha y Pisco fue entre 20 - 25 minutos; mientras que hacia el Sur en la playa

Lagunillas y Laguna Grande (Sur de la península de Paracas), las olas arribaron después de 15 minutos de ocurrido el sismo.

La altura máxima de inundación (run-up) en Chincha, Pisco y Paracas fue entre 2 y 3 m, alcanzando niveles de inundación de 520 m en Tambo de Mora (Chincha), 711 m en Pisco, 122 m en San Andrés y 575 en el balneario de Paracas. Al Sur de la península de Paracas, en la playa Lagunillas, la altura máxima de inundación (run-up) fue 6 m con niveles de inundación de 2007 m, perpendicular a la línea de costa.

La heterogeneidad en el proceso de generación y desarrollo del tsunami se debe principalmente a la complejidad del proceso de ruptura del sismo del 15 de Agosto, el cual fue lento durante los primeros 65 segundos, para luego incrementar su velocidad hasta completar los 210 segundos que fue la duración total de este proceso. Este sismo habría tenido dos fuentes de ruptura, siendo mayor la energía liberada por la segunda (Tavera et al 2007), lo cual explicaría la diferencia observada en tiempos de arribo y alturas de inundación de las olas hacia las costas Norte y Sur de la zona de ruptura. Por otra parte, la configuración geométrica de la bahía de Paracas (forma de U) y la topografía suave de la zona, fueron factores importantes que permitieron un aumento en la altura de las olas y de la distancia de inundación de todas las zonas afectadas por el tsunami.

BIBLIOGRAFIA

- Carbonel, S. L., Ruff, L. J. (1990). *Peligro de Inundación en las costas de Lima y Ancash: Informe Técnico, Instituto Geofísico del Perú.*
- Carpio, J., Tavera, H. (2002). *Estructura de un Catálogo de Tsunamis para el Perú basado en el Catálogo de Gusiakov (2002). Sociedad Geológica del Perú, V. 94, 45-59*
- Carpio, J., Zamudio, Y., Salas H. (2002). *Características del tsunami asociado al terremoto de Arequipa del 23 de Junio del 2001 (Mw=8.2). Terremoto de la región Sur del Perú del 23 de Junio del 2001. CNDG , p 121-128.*
- Dorbath, L., Cisternas, A. and Dorbath C. 1990. *Assessment of the size of large and great historical earthquakes of Perú. Bull. Seis. Soc Am. V. 80(3), p. 551-576*
- De Mets, C., Gordon, R., Aarhus, A., y Stein, S. (1980). *Geophysical Journal International, V101, 425-478.*
- Lockridge, P. A., 1985. *Tsunami in Perú-Chile: World data Center A for Solid Earth Geophysics Report SE.39-97p.*
- Norabuena, E., Dixon, T., Stein S. y Harrison, C. (1999). *Geophysical Research Letters, V26, 3405-3408.*

Tavera, H., Bernal I., Salas, H. (2007). El Terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007: Aspectos Sismológicos. Volumen especial sismo 15 de Agosto.

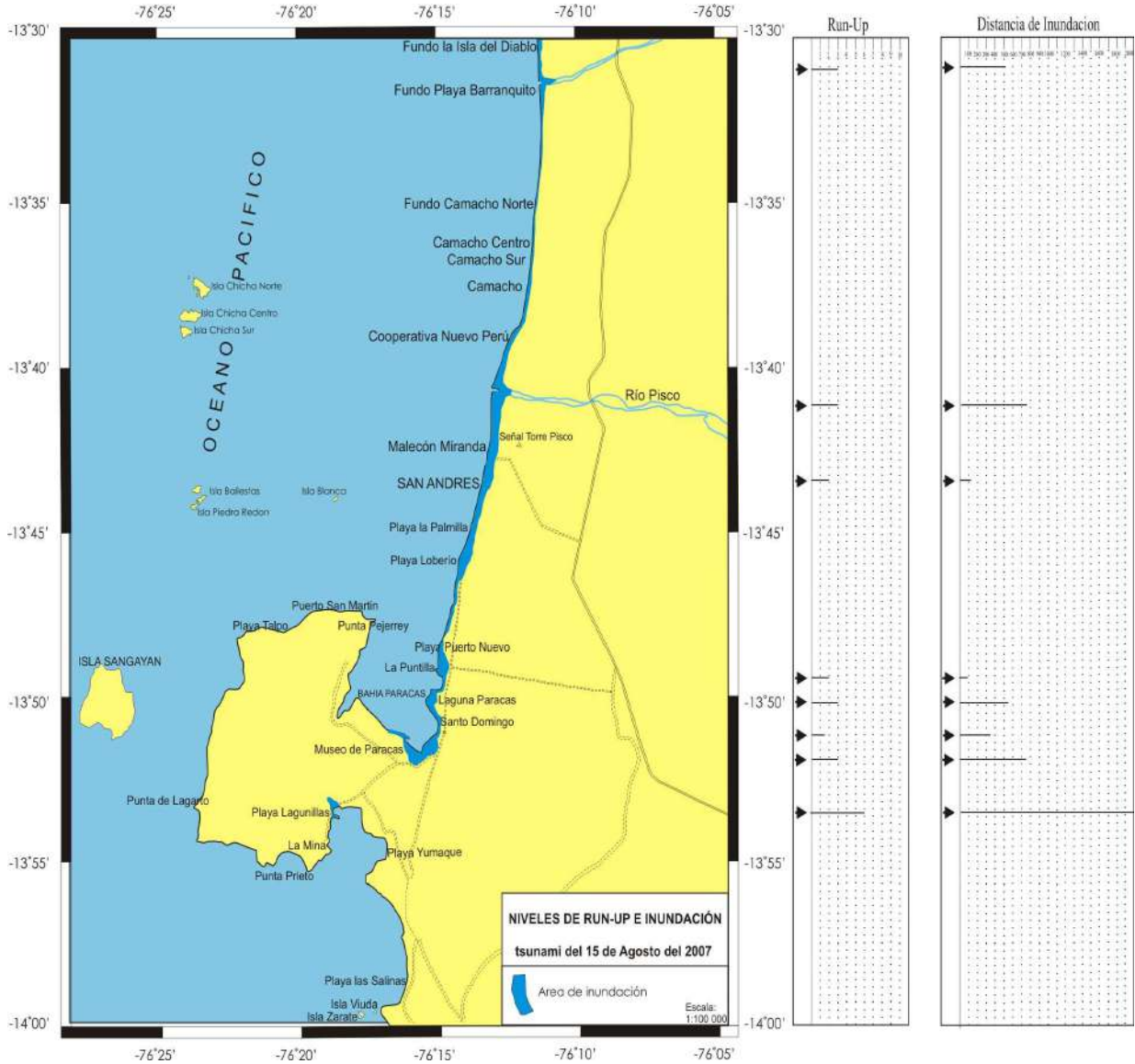


Figura 4.-Mapa de niveles de inundación y Run-up del tsunami del 15 de Agosto del 2007.



Foto 1.- Malecón de Pisco, donde se observa la loza deportiva alcanzada por el tsunami



Foto 2.- Costado del muelle Fiscal, donde se observa el agua depositada por el tsunami.



Foto 3.- Cooperativa Almirante Miguel Grau-última etapa, en donde se observa la basura depositada por el tsunami



Foto 4.- Cooperativa Almirante Miguel Grau-Ultima etapa, en donde se observa la marca del agua en las viviendas.



Foto 5.- Botes transportados e impactados frente a un restaurante turístico en San Andrés.



Foto 6.- Algas atrapadas en la ventana de una vivienda ubicada en San Andrés.



Foto 7.- Marca del agua y basura depositada por el tsunami en una vivienda de la villa militar en San Andrés.



Foto 8.- Marca de la inundación generada por el tsunami en el interior de una vivienda de San Andrés



Foto 9.- Pista que conduce a la localidad de Parcas, donde se observa conchas y basura depositadas por el tsunami.



Foto 10.- Depósitos de arena en la loza deportiva y Pista de San Andrés



Foto 11.- Entrada a la playa El Chaco, donde se observa la marca del agua dejada en la pared.



Foto 12.- Algas atrapadas en las palmeras ubicadas frente a las viviendas del El Chaco, donde además se observa botes que fueron transportados por el tsunami.



Foto 13.- Puestos artesanales frente al muelle El Chaco, donde se observa algas, yerbas y arena depositadas por el tsunami.



Foto 14.- Muelle levantado por el tsunami a una altura de 3.40 m.



Foto 15.- Erosión del suelo producto del flujo y reflujo, dejando expuestas las bases de las estructuras.



Foto 16.- Extremo oeste de la laguna Paracas, donde se observa la marca del agua que ingreso a la misma.



Foto 17.- Extremo este de la laguna de Paracas, donde se observa el renvalse de la misma.



Foto 18.- Efectos del tsunami, depósitos de algas y arena en el balneario de Paracas.



Foto 19.- Efectos del tsunami en Paracas, donde las viviendas se encuentran muy cerca de la línea de costa.



Foto 20.- Objeto arrastrado por agua, frente a una vivienda del balneario de Paracas.



Foto 21.- Altura de la marca del agua en las viviendas de Paracas, ubicadas muy cerca del mar.



Foto 22: Balneario de Paracas, donde se observa las viviendas muy cerca del mar y algas atrapadas en las plantas.



Foto 23: Pista que conduce a la Reserva Nacional de Paracas, en donde se observa el desplazamiento del agua, por encima de la misma.



Foto 24.- Agua depositada por el tsunami cerca de la pista que conduce al puerto San Martín.



Foto 25.- Mirador de aves de madera y base de concreto socavado y parte de su estructura arrastrada a 45 y 54 m.



Foto 26.- Destrucción de restaurantes turísticos debido al impacto de las olas, en Lagunillas-Sur de la península de Paracas.



Foto 27.- Área de inundación en Lagunillas-Sur de la península de Paracas.



Foto 28.- Laguna Grande – Rancherío, se observa cuatro lobos marinos muertos a causa del tsunami.

INFORME SOBRE LAS ALTURAS DE “RUN-UP” ALCANZADAS POR EL TSUNAMI ASOCIADO AL SISMO Mw=8.0 DEL 15 DE AGOSTO DE 2007 EN LA ZONA DE PISCO, PERU

Sergio E. Barrientos

Depto. de Geofísica, Universidad de Chile
Miembro de la Misión CERESIS/UNESCO

RESUMEN

Este reporte contiene dieciocho observaciones de “run-ups” efectuadas a lo largo de la costa de Perú -entre San Pedro de Turín, ubicado a unos 30 km al sur de Lima, y San Juan de Marcona, ubicado a unos 500 km al sur de Lima- alrededor de 10 días después de haber ocurrido el terremoto del 15 de Agosto del 2007. Se aumentó a 22 el número de observaciones con cuatro mediciones publicadas por el Instituto Geofísico del Perú. Las observaciones muestran una media de un metro de “run-up” a distancias superiores a 100 km, fuera del área de mayor liberación de momento o desplazamiento en la falla (dos núcleos separados por cerca de 100 km, con más de 4 m de deslizamiento frente a Pisco y más de 8 m, frente a Paracas). El tsunami alcanza localizadamente alturas superiores a los 5 m y hasta 10 m en algunos casos, en la Reserva Nacional de Paracas, el lugar más cercano de la costa a la zona de mayor liberación de momento sísmico. A distancias lejanas, el tsunami se dejó sentir instrumentalmente, como es el caso de Nueva Zelanda. En Acapulco, México, y en Crescent City, California, alcanzó una amplitud de 20 y 14 cm. En el centro-sur de Chile alcanzó una amplitud de 33 cm.

OBSERVACIONES

Durante el período comprendido entre la tarde del día jueves 23 de Agosto y el domingo 26 de Agosto de 2007 se visitaron 18 localidades al lo largo de la costa de Perú con el objeto de estimar las alturas de “run-ups” asociadas al tsunami causado por el sismo del 15 de Agosto. Estas localidades se ubican desde unos 30 km al sur de Lima, en San Pedro de Turín, hasta San Juan de Marcona, un poco más de 500 km al sur de Lima.

Estas observaciones se encuentran complementadas con aquellas realizadas por el Dr. Ronald Woodman y publicadas en la página web del Instituto Geofísico del Perú (www.igp.gob.pe).

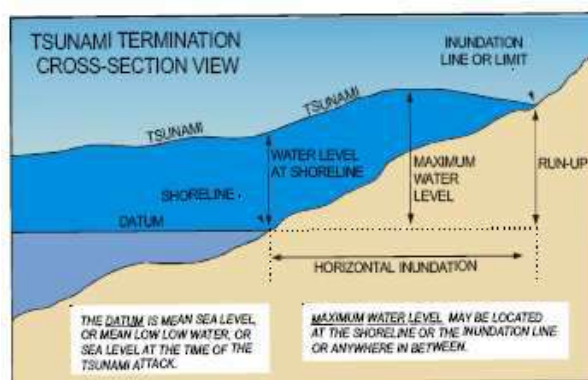


Figura 1.-. Nomenclatura de tsunamis en la costa. Tomado de Tsunami Glossary, del Centro Internacional sobre Información de Tsunamis de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental

El “run-up” (Figura 1) se define como la diferencia entre la altura que alcanza la máxima penetración del agua (máxima inundación) y el nivel del mar que existe en el momento de producirse el tsunami. La manera de efectuar las observaciones y reducciones para determinar la altura máxima que el tsunami alcanza en un lugar determinado se muestra en la Figura 2. En esta figura se aprecia el nivel del mar en el presente (a), el nivel de la marea máxima anterior (b) y la línea que demarca la inundación máxima (c). El dato que se adquiere en terreno es la diferencia de altura entre el nivel (c) y el nivel (b) utilizando un instrumento como un nivel convencional (geodésico) o un nivel de mano. Posteriormente, se corrige con respecto al nivel del mar en el momento que el tsunami alcanza la costa. Esto corresponde a un valor del “run-up” para un sitio determinado.

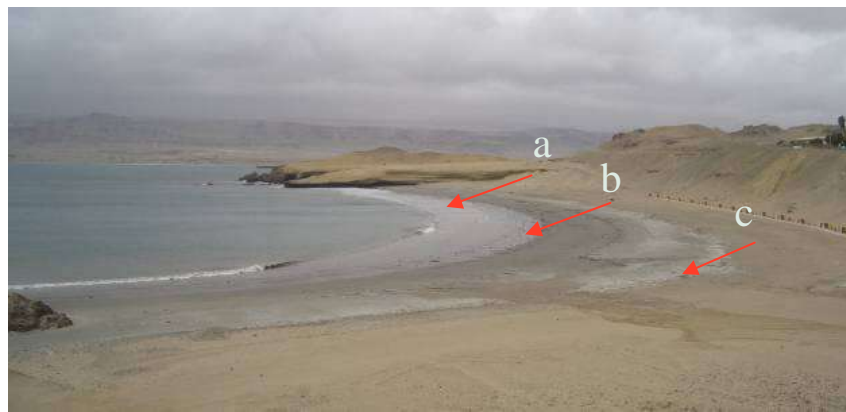


Figura 2.- Conceptos básicos en observación de run-up de tsunamis.

a): nivel del mar durante la observación

b): nivel del mar máximo dado por marea alta anterior a la medición

c): indicación de la máxima penetración del agua (inundación)

CORRECCIONES A LAS OBSERVACIONES

Luego de efectuar las observaciones es necesario corregir las alturas debido a los diferentes tiempos en los cuales fueron realizadas las observaciones. Como no se tuvo acceso a los registros de una estación local, es necesario recurrir a dos estaciones mareográficas que no se encuentren muy alejadas de los lugares visitados. La Fig. 3 muestra el nivel del mar esperado de acuerdo a las tablas de mareas para la estaciones mareográficas ubicadas en Callao (12.0333° S, 77.1500° W) y en Matarani (17.0° S, 72.1167° W). Como se puede apreciar, el nivel del mar en el momento en el que el tsunami llegó a la costa en las cercanías de Callao era de 59 cm, lo que se muestra como una línea segmentada de color azul. Análogamente, el nivel de mareas

en las cercanías de Matarani, del orden de 40 cm, es equivalentemente representado por la línea segmentada de color rojo en la misma figura.

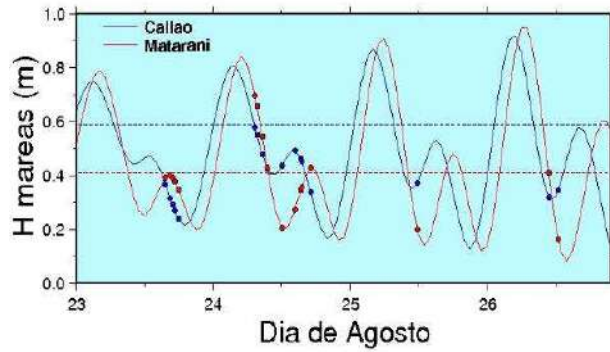


Figura 3.- Nivel de mar de acuerdo a las tablas de mareas en la estación mareográfica de Callao tanto durante el tsunami como durante los días de observaciones (línea azul). Las líneas rojas (segmentada y continua) muestran los niveles equivalentes para la estación ubicada en Matarani.

Adicionalmente, la Figura 3 se puede utilizar para calcular las correcciones debido a la variación de las mareas.



Figura 4.- Sitios donde se realizaron observaciones (círculos azules) a lo largo de la costa del Perú. Los círculos rojos muestran las ubicaciones de la estaciones en Callao y Matarani así como las dos elipses blancas representan los lugares de máximo desplazamiento en la falla.

La Figura 4 muestra los sitios en los cuales se realizaron observaciones de “run-up”, desde unos 30 km al sur de Lima hasta San Juan de Marcona, más de 500 km al sur de Lima. Se pueden observar además las ubicaciones de las dos estaciones mareográficas que permiten interpolar las correcciones tanto espacial como temporalmente y también las elipses blancas que representan el máximo desplazamiento en la falla o contacto entre la Placa de Nazca y la Placa Sud-Americana (más de 4 m en la elipse del norte, frente a Pisco y más de 8 m, frente a la Reserva Nacional e Paracas, ubicada hacia el sur).

Como la mayoría de los sitios de observación se encuentran más cercanos a Callao, se utiliza esta última estación como base para efectuar las correcciones de mareas. Cada observación se realizó a partir de la línea de marea anterior más alta, por lo tanto, se debe agregar de 15 a 34 cm –correspondientes a la diferencia entre la marea más alta y la línea segmentada- dependiendo del día en que se efectuó la observación.

Para la observación en San Juan de Marcona, que se localiza en forma equidistante de Callao y Matarani, hay que considerar una interpolación espacial de las correcciones. Un valor de 35 cm es apropiado incrementar la observación efectuada el día 25 de Agosto en esta localidad.

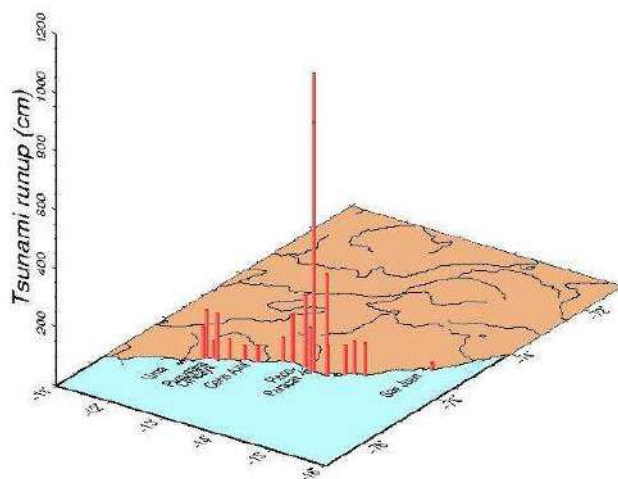


Figura 5.- Alturas alcanzadas por el run-up en diferentes localidades a lo largo de la costa del Perú. Máximas alturas de los run-up, muy focalizadas, se encontraron en la zona de la Reserva Nacional de Paracas.

En la Tabla Resumen anexa, se establece el lugar, el día y la hora en que se efectuó la observación, así como la corrección efectuada. En esta tabla se anexan 4 observaciones que aparecen publicadas en la página web del Instituto Geofísico del Perú. Estas observaciones adicionales corresponden en parte a aquellas realizadas en la Reserva Nacional de Paracas y donde localmente se alcanzaron los valores más altos de “run-up” del tsunami. La mayoría de estas observaciones se describe como efectuada a partir de la línea de más alta marea anterior, de modo que se efectúa el mismo procedimiento empleado anteriormente para corregirlas. Sin embargo, una observación se refiere a la marea existente en ese momento (Chucho, 2:00 p.m. local), de manera que su corrección es distinta a aquellas realizadas a otras observaciones y se efectúa con respecto al nivel del mar actual y no con respecto al máximo de la marea anterior.

Una vez efectuadas las correcciones, las observaciones corregidas se muestran en la Figura 5. Un error estimado en las observaciones alcanza a unos 10 cm.

DISCUSION

Las observaciones realizadas a lo largo de la costa por cerca de 500 km, muestran una media del orden de un metro de “run-up” a distancias superiores a 100 km, fuera del área de la Reserva Nacional de Paracas y entre ésta y Pisco. En la región de la Reserva Nacional de Paracas, se observan localizadamente alturas de “run-up” superiores a los 5 m y hasta 10 m en algunos casos. Sin embargo, estas alturas son producidas por configuraciones locales de topografía/batimetría ya que en zonas muy cercanas también se observan “run-ups” de mucho menor magnitud (menores que 2 m). También es importante el tsunami en la zona comprendida entre Pisco y la Reserva Nacional de Paracas, con alturas de “run-ups” superiores a los 2 m. Estas observaciones son en principio consistentes con el modelo de desplazamiento en la falla publicado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (dos zonas de desplazamiento máximo en el contacto entre la Placa de Nazca y Sud Americana, ver elipses blancas en la Figura 4).

Lamentablemente no en todos los lugares se pudo conversar con testigos, pero en el sector norte de las observaciones, la primera inundación (de tres) fue reconocida como la de mayor altura, en tanto que en la zona de Tambo de Mora y

Pisco fue la segunda que invadió más el terreno y en Paracas se observaron hasta cuatro frentes de inundación.

En el campo lejano, mareógrafos ubicados en Chile midieron hasta 37 cm (Arica) y 33 cm (Talcahuano) de amplitud. En Hilo, Hawaii, alcanzó 40 cm y en Nueva Zelanda se reporta haber registrado este evento en los instrumentos ubicados en la costa Este, incluyendo Chatham Is.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS) y UNESCO por haber hecho posible este estudio. Al Dr. D. Huaco, quien facilitó el trabajo en el terreno, al Dr. R. Woodman por haber entregado indicaciones de los lugares más afectados por el tsunami y por último al Sr. Carlos Velásquez por haber conducido el vehículo que nos permitió llegar a los puntos donde se efectuaron las observaciones.

TABLA RESUMEN

Día	Hora	Latitud	Longitud	Run up (m)	Corr. (m)	Run-up Corr.	Descripción
23/08/07	15:40	12° 17.227'	76° 52.869'	1.08	0.17	1.18	San Pedro de Turín
23/08/07	16:20	12° 18.818'	76° 50.299'	1.66	0.17	2.83	Playa El Silencio
23/08/07	16:55	12° 24.064'	76° 46.613'	0.60	0.17	0.77	Playa Santa María
23/08/07	17:20	12° 28.856'	76° 47.911'	1.20	0.17	1.37	Puerto de Pucusana
23/08/07	18:00	12° 37.894'	76° 49.263'	0.70	0.17	0.87	El León Dormido
24/08/07	07:20	13° 01.651'	76° 28.986'	0.55	0.20	0.75	Cerro Azul – Puerto Viejo
24/08/07	07:40	13° 01.695'	76° 29.180'	0.55	0.20	0.75	Puerto Viejo Oeste
24/08/07	08:35	12° 49.692'	76° 32.745'	0.50	0.20	0.70	Playa Sarapampa
24/08/07	09:40	13° 19.829'	76° 14.418'	0.80	0.20	1.00	Jahuay
24/08/07	12:05	13° 28.110'	76° 11.402'	1.60	0.20	1.80	Tambo de Mora
24/08/07	14:20	13° 43.747'	76° 13.382'	2.45	0.20	2.65	Pisco, Caleta de San Andrés
24/08/07	15:20	13° 49.938'	76° 14.944'	1.10	0.20	1.30	Paracas Chaco
24/08/07	15:30	13° 50.335'	76° 15.477'	1.25	0.20	1.45	Paracas, lado Oeste
24/08/07	17:05	13° 53.572'	76° 18.493'	1.50	0.20	1.70	Lagunillas, Res. Nac. de Paracas
25/08/07	11:30	15° 21.537'	75° 09.641'	0.25	0.35	0.60	San Juan de Marcona
26/08/07	10:50	14° 38.074'	75° 55.354'	1.10	0.34	1.44	Caleta la Hierba
26/08/07	12:30	14° 28.284'	75° 58.333'	1.10	0.34	1.44	Playa la Cueva
26/08/07	13:10	14° 22.529'	76° 05.037'	1.00	0.34	1.34	Playa Barlovento
26/08/07	14:00	14° 08.900'	76° 18.333'	3.40	-0.25	3.15	Chucho (* observación IGP)
26/08/07		13° 55.600'	76° 16.983'	10.15	0.34	10.49	Playa Yumaque (* obs. IGP)
26/08/07		13° 55.000'	76° 16.883'	8.50	0.34	8.84	LMK039 (* observación IGP)
25/08/07		13° 53.883'	76° 18.667'	5.60	0.24	5.84	Lagunillas (* obs. IGP)



Ejemplo de inundación en una casa ubicada en Pisco, específicamente en la Caleta de San Andrés. El Sr. Juan Gilberto Ibarra Delgado, dueño de la casa verde que se muestra en las fotos, indica la altura de "run-up" al interior de los cuartos. En la foto panorámica se aprecia la distancia y diferencia de altura entre el nivel del mar y la altura del ventanal (2.65 m) cuyos vidrios fueron quebrados por la presión del agua. Observación efectuada el día 24 de Agosto a las 14:20.

ASPECTOS FISICOS DEL MAREMOTO DE PISCO DEL 15 DE AGOSTO 2007, Y LAS INUNDACIONES MAXIMAS

Leonidas Ocola

Instituto Geofísico del Perú

geo_gps@geo.igp.gob.pe

RESUMEN

El 15 de agosto 2007, a las 23 h 40 min 58 s, ocurrió un sismo, cuyo epicentro el IGP localiza en Lat. 13.67°S, Lon. 76.76°W, Prof. 40 km, con una magnitud 7.9 Mw, frente a las localidades de Tambo de Mora – Chincha Baja. La distribución de las réplicas con magnitudes igual o mayores a 4.5 mb, determinadas por el NEIC, delimitan el área de ruptura, la cual, presenta dos zonas con ausencia notoria de eventos: Una frente a Tambo de Mora – Chincha Baja, y la otra al sur y mar afuera de la Península de Paracas. Estas dos zonas coinciden con las áreas de Asperezas propuestas por los modelos de mecanismos focales de varios autores. El objetivo de la investigación es determinar las inundaciones máximas en valles y depresiones topográficas entre Lomas (Región Arequipa) y Lurín (Región Lima), y obtener información presencial sobre la fenomenología del maremoto. Debido a lo tardío de las inspecciones de campo (septiembre y diciembre, 2007), fue indispensable contar con testimonios de testigos presenciales en los sitios estudiados y la búsqueda exhaustiva de evidencias geológicas y ambientales, como: licuefacción de terrenos en lechos de ríos, contraste de humedad en suelos arenosos en las depresiones topográficas, además de la identificación de los restos de arrastre del agua dejados en el terreno, arbustos, etc. La máxima inundación se produjo en la depresión topográfica de Lagunillas en la Península Paracas: 2.4 km. Las distancias de inundación de las depresiones topográficas y ríos principales, desde Río Grande hasta el Río Lurín, varían entre 624 m y 2.4 km. Durante las inspecciones de campo, se encontró conspicuas fracturas en terrenos competentes en la vecindad de la proyección superficial de la Aspereza 2: Sur de la Península Paracas, de los modelados de la fuente sísmica del terremoto. La fenomenología del maremoto evidencia la influencia notable de los fuertes vientos y oleaje marino asociado, la influencia del levantamiento cosísmico del continente, y la importancia del frente de la cordillera de Nazca relacionada al grupo de ondas de baja frecuencia que se registraron en la Estación Mareográfica de San Juan de Marcona de la Dirección de Hidrografía y Navegación.

INTRODUCCION

El 15 de agosto 2007 ocurrió un sismo que afectó las Regiones de Ica, Lima, y Huancavelica causando una destrucción masiva de viviendas y edificaciones de adobe y de otros materiales de alta vulnerabilidad en las ciudades de Pisco, Ica, Chincha, Cañete, y centros poblados como Tambo de Mora, Sunampe, San Clemente, Huaytará, entre otros. El sismo fue localizado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) en las siguientes coordenadas: Latitud: 13.67 °S, longitud: 76.76 °O, profundidad: 40 km, magnitud: 7.9 Mw, tiempo de origen: 23 h 40 min 58.0 s (T.U.) (Tavera et al., 2007). Sin embargo, el NEIC da las siguientes coordenadas para el hipocentro: Latitud: 13.368°S, longitud: 76.603°O, profundidad: 39 km, y una magnitud de 8.0 Mw. El centroide es localizado en las siguientes coordenadas: Latitud: 13.73°S, longitud: 77.04°O, profundidad: 33.8 km, magnitud: 8.0 Mw, tiempo del centroide: 23h 41 min 57.9 s (T.U.) (Global CMT Catalog, 2008). El epicentroide está alrededor de 32 km al WSW del epicentro del IGP, y está mucho más cerca a la fosa marina de Perú-Chile, al borde de la pendiente continental. Las réplicas del sismo y la sismicidad de la región

vecina, de magnitudes iguales o mayores a 4.5 mb, reportados por el NEIC, que han ocurrido en el área del sismo del 15 de agosto 2007, hasta el mes de febrero del 2008, se muestran en la Figura 1.

Un fenómeno cosísmico importante del terremoto de Pisco fue el desplazamiento del continente hacia el mar y el levantamiento del continente. Un monumento GPS, en la Punta Paracas, se desplazó 1.60 m hacia el mar y se levantó (subió) 50 cm, con respecto a la condición presísmica (Contribución del Dr. E. Norabuena, en Ocola, 2007).

La luminiscencia atmosférica, que afectó al territorio peruano, por lo menos, entre las latitudes 11°S y 15°S, fue uno de los fenómenos cosísmicos poco comunes que causó gran preocupación a la población, y será objeto de un reporte separado.

Otro fenómeno cosísmico importante fue el maremoto que afectó el litoral peruano desde el Callao hasta San Nicolás, Marcona (Ica). Los efectos de este fenómeno han sido extensamente estudiados en lo que se refiere a inundación de playa e impacto en centros poblados. Se ha publicado varios reportes de observaciones y medidas de campo, concentradas, principalmente, en la zona epicentral y norte, por ser la más poblada y la más accesible. Entre los principales reportes se tiene los informes de: Woodman (2007), Fritz et al. (2007), Barrientos (2007), DHN (2007). La mayoría concentra las observaciones del impacto del maremoto en las playas y centros poblados, desde Laguna Grande hacia Lima. Sin embargo, Barrientos recorrió algunas playas hasta San Juan de Marcona (Región Ica) estimando el "run-up" en los sitios reportados. Ninguno de los informes mencionados hicieron observaciones en los valles de los principales ríos y depresiones topográficas en el litoral de la zona afectada por el maremoto, salvo la depresión de Lagunillas. En el presente documento, se reporta los resultados de las observaciones realizadas en los principales ríos y depresiones topográficas entre San Nicolás (Marcona, Región Ica) y Cañete (Región Lima), además de algunas playas abiertas, y se proporciona elementos físicos para su interpretación.

La primera misión de campo se realizó en el mes de septiembre, por dificultades logísticas. Esta situación creó una restricción en los puntos de observación: La necesidad de encontrar testigos presénciales para que dieran su testimonio, describieran la fenomenología observada e indicaran los puntos de

inundación máximas. En casi todos los sitios se cumplió esta condición. Las observaciones se realizaron entre Lomas (Región Arequipa) y Lurín (Región Lima). En la Región Ica, hay que atravesar los desiertos de Nazca e Ica para llegar a la playa. En muchos tramos, no hay carreteras o trochas definidas.

El propósito de las observaciones de campo fue determinar la máxima distancia y altura de inundación desde la posición media del agua del mar en la playa al tiempo de observación, y el punto máximo identificado por el residente local, verificado, por las evidencias ambientales de campo, que efectivamente llegó el agua al sitio donde el lugareño indicaba. El procedimiento de campo, en la toma y reducción de datos, fue el empleado por Ocola y Huaco (2006, 2006a) en los maremotos de Chimbote de 1996 y el de Camaná del 2001. Para distancias y alturas máximas de inundación no se toman como referencia el nivel de la marea alta del día anterior por lo subjetivo y la dificultad de reconocer la marca pertinente. Especialmente cuando la playa es pedregosa o son conchales. El nivel medio del mar se determina midiendo distancia y alturas desde un punto sobre la cresta de la berma marina, luego se corrige por la altura de la marea ambiental a la hora promedio de las observaciones mediante las Tablas de Mareas de la DHN (2007a). En las Figuras 2 y 3 se muestra los sitios observados y los resultados obtenidos.

CONDICIONES OCEANICAS-METEOROLOGICAS PRE-MAREMOTO

El impacto del maremoto en el litoral depende, entre otros factores, de las condiciones meteorológico-oceánicas en la zona afectada. Se contó con la información de la vigilancia meteorológica y oceánica del país y la emisión rutinaria de los boletines informativos, para fines de Defensa Civil.

Según el Boletín Meteorológico Diario del COEN (2007), las condiciones meteorológicas pronosticadas por Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) para la costa central y sur del 15 de agosto eran: Vientos del sur hasta 20 km/h. Por otro lado, el pronóstico de la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú (DHN) sobre las condiciones oceanográficas fue de oleajes anómalos en el litoral de la costa sur y centro del país, con una intensidad moderada en la tarde del día 15 de agosto a fuerte intensidad en la madrugada del jueves 16 de agosto, con vientos de moderada a fuerte intensidad en el litoral: Area aproximada Atico-Cañete, por vientos con velocidades de 37-44 km/h. Según DHN(2007), el oleaje

anómalo de moderada intensidad se inició alrededor de las 15 h (TL) en San Juan de Marcona. En La Punta (Callao) el mismo fenómeno se inició a las 16 h. El maremoto ocurre en condiciones de braveza del mar con fuertes vientos del sur, oleaje anómalo de fuerte intensidad. En consecuencia, la inundación producida por el maremoto del 15 de agosto es un efecto combinado: Braveza del mar y maremoto simultáneo.

OBSERVACIONES DE CAMPO Y RESULTADOS

Los datos de campo se tomaron en dos misiones. En la primera misión se observó los efectos de la inundación desde Lomas (Región Arequipa) hasta Tambo de Mora (Región Lima) del 11 al 19 de septiembre 2007. La misión estuvo constituida por L. Ocola, R. Moreno, P. Ascencios, J. Trujillo. La segunda misión se realizó del 15 al 17 de diciembre 2007, y se inspeccionó del río Tambo de Mora al río Lurín (Región Lima). Los miembros de esta misión fueron: L. Ocola, R. Moreno y F. Román.

Aunque el objetivo principal de las inspecciones fue localizar las máximas zonas de inundación causadas por el maremoto y determinar distancias y alturas respecto a la línea de mar, por las condiciones meteorológicas no siempre fue posible determinar las alturas. La nivelación geométrica se hizo con el nivel de la brújula Brunton y un distanciómetro láser. Hubo sitios donde la fuerza del viento fue tal que era imposible mantener la estabilidad para medir ángulos verticales. En esos casos, sólo se tomaron datos GPS en los puntos extremos: Cresta de la berma marina y punto terminal de la inundación, se midió las distancias y pendientes de las subidas y retiradas de las olas en la playa en la extensión del perfil. La distancia se determinó con una cinta-métrica y la inclinación sobre el terreno con el inclinómetro de la brújula.

Se inspeccionó las desembocaduras de los siguientes ríos, de sur a norte: Ica, Pisco, Matagente, Tambo de Mora, Cañete y Lurín. Además, se obtuvo información de Río Grande. Se hicieron observaciones en las depresiones topográficas de Lomitas, Morro-Quemado, Yumaque, y Lagunillas. Se determinaron distancias y alturas en las playas abiertas de Lomas, Maroma, y Tunga, y en las caletas La Pedregosa (San Nicolás), La Hierba, y Lagunillas, y en el puerto de Caballas. A continuación, se describe los principales sucesos en los sitios inspeccionados. Los resultados de alturas máximas y distancias de inundación, así como la posición geográfica (puntos en la berma marina) se listan en la Tabla 1, y la ubicación de los sitios inspeccionados y resultados se presenta en las Figura 2 y 3.

Playa Lomas

Lomas es una caleta localizada en las faldas de un promontorio rocoso de la Punta Lomas. En esta localidad, se contó con el apoyo del Sr. Luis A. Barra Martínez, pescador, 20 años residente en la caleta. El señor Barra reportó que el mar no sufrió mayor alteración de lo normal en la tarde del 15 de agosto 2007. La playa es abierta, de arena, pendiente suave, plana, con abundante conchuela blanca y parte de una bahía. El señor Barra transitó por la playa después del terremoto. Observó hasta donde llegó entonces el agua de inundación, siguiendo los desechos depositados y la marca de agua. Días antes de la inspección de la Misión, hubo una marejada fuerte. El nivel de inundación sobrepasó a la del maremoto. El señor Barra, sin embargo, identificó el nivel de máximo de inundación del maremoto, en base de los restos de desechos mayores que reconoció. Se determinó una distancia máxima de inundación de 86 m y una elevación de 2.2 m.

Caleta La Pedregosa

La caleta está localizada al sur este de la Bahía de San Nicolás, en el lugar denominado La Pedregosa. Las viviendas y chozas se encuentran al N y al pie de un acantilado conglomerático. Se contó con el testimonio del señor Senén Abdón Oré Ayala, pescador, residente de la caleta. El día del sismo, sintió que “el agua se va y la tierra se eleva”. Estimó que el agua se retiró de 20-30 m, no puede precisar, por estar oscuro. La playa es pedregosa. Hay muchas rocas. Al sur de la caleta, el agua llegó a la carretera, alcanzando una distancia máxima de 21 m y una altura de 2.4 m. A unos 100-150 m al noroeste de la caleta, el agua subió por una depresión del terreno pedregoso, en el lugar donde en tiempos de Hierro Perú utilizaban una zaranda para seleccionar bolas para el molino de minerales. El agua se empozó por 3-4 días. Aquí, la distancia de inundación fue de 82 m y alcanzó una altura de 1.8 m.

Al pasar la Garita de control de la Empresa Minera Shougang hacia la Caleta, el vigilante informó que él pasó el terremoto en la Garita. Mencionó que se cortó la luz y comenzó el terremoto. El ambiente estuvo nublado y frío. La empresa ordenó evacuar a los trabajadores del muelle. El mar se retiró unos 200 m después del sismo. Poco a poco se normalizó. Regresó a su nivel ~12 de la noche del 15 de agosto, 2007. De la Garita, se ve muy bien el mar y las playas de San Nicolás.

Río Grande

En la Caleta La Pedregosa (San Nicolás), el señor Oré informó que en Santa Ana: Río Grande se había producido una gran inundación. La carretera San Nicolás-Santa Ana estaba interrumpida. Se tenía que ir por Changuillo. Para llegar a Santa Ana, se logró el apoyo del señor Jonathan Cerón, residente de Changuillo. El Señor Cerón informó que la carretera por el Río Grande a Santa Ana estaba interrumpida por derrumbes y por la inundación del maremoto. Se tenía que ir por trochas que existen en el desierto de Nazca-Ica. Al llegar al final de desierto, se debe bajar a la playa por un arenal, para el cual el vehículo no estaba preparado. Además, las condiciones atmosféricas eran muy desfavorables: Densa neblina, fortísimo viento, intenso frío, fuerte migración de arena. Se tenía la certeza de llegar a Santa Ana, pero no de regresar. Por lo que, se desistió llegar al sitio. Sin embargo, gracias al íntimo conocimiento de la zona del señor Cerón, se cambió la misión para inspeccionar el Puerto Caballas. Allí encontramos al señor César Quispe, pescador, quien había pasado el terremoto y el maremoto en el puerto. Además de lo observado en Caballas, informó lo siguiente sobre la inundación del Río Grande: La ruta normal que usa para llegar al Puerto Caballas es por Santa Ana. La trocha está destruida, fue inundada por el maremoto, Santa Ana se llenó de agua. En la parte aguas arriba del Río Grande, la carretera está cerrada por derrumbes del cerro de arena. El tramo inundado y cubierto por derrumbes, usualmente, lo transitaba en 15 minutos en su moto a una velocidad de 16-18 km/h. Estimaba que, por lo menos, 1.5 km río arriba fue cubierto por la inundación del maremoto. Este dato se consigna para la inundación de Río Grande.

Puerto Caballas

En el puerto Caballas se contó con la información del señor César Quispe, pescador, residente de Río Grande: Santa Ana, permuta continuamente entre Ica y Caballas en una motocicleta. El Señor Quispe mencionó que el nombre Caballas deviene de la forma como se “rompen” las olas cerca de la playa: Hilera de rizos blancos que semejan a las crines de un caballo en carrera. El señor César Quispe se encontraba en su cabaña de pescador durante el terremoto y maremoto. Entraron a la bahía tres oleadas. La tercera ola fue la mayor. El agua ha limpiado el lado noroeste de la arena de las dunas y enarenó la parte centro y suroeste, cambiando la configuración de la arena de la playa. Como resultado, la playa se ha enarenado y la línea de playa se ha retirado hacia el mar. Antes del maremoto, existía una poza cerca de la playa donde tenían carnada de pescar (marucha), después del maremoto ya no existe, sólo queda una pequeña hondonada que es peligrosa. Cuando se produjo la

inundación máxima, el agua llegó hasta la primera grada sobre el terreno de la escalinata de entrada a la iglesia (Foto 1). La acción de las olas fue violenta: Botes fueron arrastrados, volteados, dañados y parcialmente enterrados, un vehículo motorizado fue volteado y arrastrado hacia el mar. El agua llegó hasta las casas de los pescadores. El señor Quispe observó que las olas venían del sur, chocaban en la parte norte de la bahía y rebotaban hacia la bahía. La bahía quedó inundada por dos días. Las condiciones atmosféricas del día de la inspección cambiaron muy rápidamente. Al llegar al Puerto, estaba soleado con ligero viento. Pocos minutos después se desató un vendaval continente-mar de gran fuerza arrastrando arena: Era difícil mantenerse de pie a campo abierto. La distancia de la línea de mar a la primera grada de la capilla es de ~200 m, con una elevación de 2.6 m

Río Ica

Este fue uno de los sitios de difícil acceso. No se pudo conseguir guía local. No hay trocha única entre Ica y la desembocadura del río del mismo nombre. Al igual que la travesía a Caballas, en el desierto hay un sin número de huellas carrozables, más o menos transitables. Afortunadamente, en Zamaca, nos dieron indicaciones generales de cómo llegar a la desembocadura del río Ica. En esta travesía por el desierto, el navegador GPS fue vital. La travesía del desierto tomó alrededor de 4 h.

Al cruzar el último contrafuerte costero, se presenta repentinamente la playa y una amplia planicie sembrada de dunas de arena con matorrales verdes en la cima hacia el noroeste y una franja verde hacia el sureste (Foto 2). Esta última franja es la que se desarrolla a lo largo del río Ica: Abundante vegetación y pasto. El río termina en una barrera baja y amplia de arena, separa el mar y la laguna marginal. La vegetación se desarrolla en ambos lados de la laguna, para continuar río arriba. No se encontró testigo presencial del maremoto. La inspección se concentró en buscar evidencias del flujo del agua en los matorrales en y cerca del cauce principal del río y al seguimiento de arcilla disecada – cuarteada recientemente: Bordes limpios sin arena ni hojas secas entre las grietas de las partes disecadas. Una de las evidencias importantes encontrada es la basura arrastrada río arriba atascada en un matorral a 42 cm sobre el suelo, con los extremos de las ramas apuntando río arriba, a 1.6 km desde la playa (Foto 3). El punto más alejado donde se encontró arcilla disecada en el lecho del río está a 2.2 km. El espesor de los fragmentos cuarteados de las arcillas fue más grueso hacia la playa y más delgados hacia extremo terminal de la inundación. En todo el tramo inspeccionado, no se encontró evidencias de licuefacción de terrenos.

Depresión de Lomitas

La depresión de Lomitas se encuentra en la prolongación del extremo sureste de la Bahía Lomitas, al norte de la localidad de Lomitas. Se contó con el testimonio del señor Saturnino Ipurre Charino, trabajador del Ministerio de Agricultura, residente de Lomitas. El señor Ciro Huamán de Cayango fue el guía para la travesía del desierto de Ica.

La parte baja de la depresión de Lomitas es fácilmente inundable. Existe una laguna entre el continente y el mar. La laguna está limitada por una barrera marina de arena. Después del maremoto, la laguna se llenó de agua de mar y permaneció llena hasta la fecha de inspección de la Misión. El señor Ipurre estima que permanecerá llena, por lo menos, un par de meses más. Esta laguna era fácilmente inundable por las marejadas. El día del terremoto no se retiró el mar. Llegaron dos olas de gran fuerza y velocidad. La reventazón de las olas sonó muy fuerte, fuera de lo común. El agua de inundación del maremoto sobrepasó la laguna. El señor Ipurre marcó el sitio de la máxima inundación. La inundación máxima alcanzó una distancia de 627 m. El reflujo fue suave. Sin embargo, en la zona de la punta en Lomitas, que es rocosa, el agua regresó al mar como río y con fuerza.

Caleta La Hierba

En la caleta La Hierba se contó con el testimonio del testigo presencial señor Eugenio Paredes Quispe, quien vive en el lugar. El señor Paredes es una persona de avanzada edad. Pasó el terremoto echado en su cama, en su casa de carrizo. El sismo la sacudió como una hamaca. Después del terremoto se quedó dormido. Se despertó más o menos 2 h después, con el ruido de los botes que se golpeaban uno contra el otro frente a su casa y se movían, porque todo estaba inundado. El señor Paredes indicó los sitios hasta donde subió el agua del maremoto, además, mencionó que las olas marinas venían del sur. Antes del terremoto, la línea de playa estaba más hacia el mar, unos 40 metros. Los botes estuvieron guardados en dicho lugar antes del maremoto. El día de la inspección, los botes estaban a pocos metros frente a su casa. Para el señor Paredes, el mar ha ganado terreno. La altura máxima y distancia máxima, con respecto al nivel del mar del día de la inspección, es de 48 m y 2.9 m, respectivamente. Antes de encontrar al señor Paredes, se establecieron dos perfiles al sur de la caleta. Se obtuvieron los siguientes resultados: Distancias máximas: 38- y 28-m, con elevaciones 2.6- y 2.7-m, respectivamente.

Playa Marona

Esta playa se encuentra al sur del cerro Morro Quemado. Es una playa abierta. Se llegó a esta playa gracias al guía: señor Nemesio Sarmiento Palomino y a la pericia del chofer del vehículo: señor J. Trujillo, en muchos tramos del recorrido no hubo carretera. El señor Sarmiento es pescador de Chucho y agricultor de Pisco, donde vive regularmente, y realiza pesca en las playas entre Chucho y Caballas. Se moviliza a lo largo de la costa en una motocicleta.

La playa Maroma, denominada así por los pescadores (N. Sarmiento y D. Acasiete), está al sur este del lugar denominado Palo Vento en los mapas al 100.000 del IGN. Es una playa muy amplia, pura arena, al pie de un acantilado casi vertical de unos 9-10 m de altura que es el frente de una terraza cubierta con arena suelta. Lo espectacular de esta playa es el gran número (varios cientos) y variedad de aves marinas.

En esta playa tuvimos la gran suerte de encontrar al señor Walter Heinz, pescador-empresario, testigo presencial, quien se moviliza a lo largo de la playa en un carro 4x4 chico. El día del maremoto, se encontraba acampado en la playa Morro Quemado: Playa que está al pie del Cerro Morro Quemado a ~2 km al noreste de donde se realizó la entrevista. El señor Heinz informó que pasó el terremoto en la playa. Tuvo que agarrarse para no perder el equilibrio, el sacudón fue muy fuerte. Se produjeron grietas a la altura del campamento. En la playa abierta, el mar se salió unos 300 m más allá de la salida normal. Localizó el sitio aproximado hasta donde llegó el agua. Indicó que en el rincón (pie del cerro) el agua "se empozó". Se llevó una choza y la cocina de un pescador. Mencionó que era día de luna nueva y la marea estaba alta. La perturbación marina fue sólo un maretazo. Sin embargo, puntualizó que la mayor inundación estuvo al otro lado del Morro Quemado. La distancia máxima de inundación al sitio indicado por el señor Heinz fue de 155 m y 1.1 m de altura máxima.

Depresión Morro-Quemado

Esta es una depresión muy amplia. Tiene una base de ~5 km y una pendiente de ~1.1°. Hay una trocha en forma de U que va aguas arriba bordeando la depresión que es fácilmente inundable, aún por las marejadas. Durante la inspección era fácil distinguir superficialmente la tierra que había sufrido la inundación de la no inundada. Sin embargo, era muy difícil de encontrar restos marinos por la distancia y pendiente. Se utilizó como criterio el contraste de humedad de excavaciones de 10-20 cm en la

arena. Así se determinó el punto donde localizar la máxima inundación. La zona inundada fácilmente mostraba humedad a los 10 cm de profundidad. Por otro lado, era imposible llegar a la barrera de arena que separa la laguna marginal del mar en el centro de la depresión, por estar parcialmente inundada la barrera. Se tomó GPS en los puntos de máxima inundación y en el extremo NE de la depresión, para el cálculo de la distancia máxima de inundación. La distancia máxima de inundación calculada es de 1.2 km. Durante la toma de datos, el viento fue muy fuerte. A esta inundación se refería el señor Walter James en la Playa Maroma.

Playa Tunga

En esta playa se contó con el testimonio del señor Richard Gutiérrez, pescador de conchas. El señor Gutiérrez mencionó: Después del terremoto la ola vino como un río (corriente fuerte), y discurría de sur a norte. El agua subió hasta las casas del campamento, inundando los pisos. Todos los residentes corrieron cerro arriba para ponerse a salvo. El maremoto se llevó hacia el norte el “pacache” (especie de canastas con mallas de pescar) y un yate pequeño. En la parte sureste del campamento hubo un apilamiento grande de conchas, éstas fueron arrastradas y dejadas a nivel de suelo. Las casas están al pie del acantilado. La distancia máxima de inundación se estima en 56 m con una altura de 1.3 m.

Depresión de Yumaque

Se han reportado varias medidas y estimaciones sobre elevaciones de inundación para la zona de playa de Yumaque. Sin embargo, existe un elemento morfológico muy importante sobre el cual no hay datos. Este elemento es una depresión topográfica entre colinas suaves. La depresión mantenía agua en la laguna marginal que se formó entre la berma marina y el continente, en la fecha de la inspección, 18 de septiembre 2007.

El extremo de máxima inundación fue localizado gracias a información previa del Dr. R. Woodman y al señor Dagoberto Acasiete, pescador, quien frecuenta estos parajes para realizar sus labores de pesca artesanal. El Sr. Acasiete indicó el sitio, el mismo que fuera corroborado con una marca de hierro y piedra. Esta marca fue puesta por el Dr. R. Woodman (Com. Personal, 2007). El límite final, sin embargo, se estableció observando el alineamiento de plumas de aves, paja, palos chicos pedazos de madera, etc., y las depresiones y elevaciones del terreno. Una vez establecido el punto extremo, se realizó un perfil midiendo distancias con el distanciómetro láser y

ángulos verticales con la brújula. El perfil terminó en el nivel del mar. Se tomó posiciones GPS en el punto final y en el punto sobre la berma marina del perfil. Las distancias calculadas en base de los datos GPS y de la nivelación con el distanciómetro láser concuerdan razonablemente. La distancia horizontal máxima medida es de 602 m, con una altura de 3.4 m.

Es propio indicar que, el señor Acasiete manifestó que antes del sismo no existía la barrera de arena “que hoy se encuentra cerca de la playa con una bajada profunda...”. Por otro lado, mencionó que en el acantilado del extremo norte de la playa, “caminando por la orilla hay un balcón en la punta; el agua llegaba, antes, al filo de lo que ahora es un balcón; se nota que el terreno se ha levantado.”. El balcón está fuera del agua. Esta observación concuerda con los resultados de levantamiento de la Península de Paracas determinada por medio de medidas GPS.

R. Woodman (2007) reportó la altura de 10.2 m “sobre la marea más alta del día”. Esta es la altura extrema alcanzada por el maremoto de Pisco. Se encuentra localizada en una duna sobre los acantilados de Yumaq (Foto 4), al suroeste del perfil reportado en esta sección, y en extremo sureste de la Playa Lagunillas, según la carta al 100,000 del IGN. El agua alcanzó esta altura, probablemente, por el impacto de los remolinos locales que reportan en la Caleta Lagunillas (Sección 3.12).

La Depresión de Lagunillas

La depresión de Lagunillas es la continuación de la morfología de la Bahía Lagunillas en la Península Paracas. Es una depresión en arco que se extiende en la dirección aproximada de N25 °O. En las Playas Maroma y Tunga, puerto Caballas, y puente Tambo de Mora reportaron que el agua de inundación provenía del sur. Es lógico esperar que uno de los sitios de mayor impacto fuese en la depresión Lagunillas. El agua de inundación llegó con gran violencia y cantidad, creó una vasta laguna. Arrastró varios botes. Uno de ellos fue varado en el borde occidental de la depresión, cerca de la curvatura máxima de la inundación. Se determinaron tres puntos GPS: Berma marina, bote y punto terminal. El bote está a 1,442 m de la berma y a 1,454 de la marea ambiental del 18 de septiembre 2007. La distancia desde la posición del bote al punto terminal es 961 m, en consecuencia la distancia máxima de inundación es de 2.42 km. La distancia entre el punto en la berma marina y el punto terminal es 2.2 km. No se determinó la altura de la inundación máxima.

Caleta Lagunillas

La Caleta Lagunillas está emplazada en lo que antiguamente parece haber sido una pequeña isla separada de la Península Paracas. En los mapas al 100,000 del IGN, el lugar aparece con el nombre de Frontón. Con el tiempo, el continente se ha levantado, y los lugareños han agregado material para consolidar la unión a la península, por lo menos, durante la marea alta. Conforman una pequeña punta bañada por casi todos sus lados. Al producirse el maremoto, la pequeña península fue golpeada por olas del sur, este, oeste, etc., alcanzando el agua una altura de 5.2 m sobre el nivel del mar. La altura corresponde al nivel del techo del primer restaurante en la entrada por carretera a la pequeña península.

Varias personas dieron su testimonio sobre la fenomenología del maremoto. La del señor Jorge Ganchay Ponte es la siguiente: El agua se retiró. Fueron cuatro olas las que causaron la inundación. La cuarta ola fue la más fuerte. Un pescador que estuvo “enlanchado” vio que la laguna (Bahía) se hizo un remolino y los tumbos llegaban hasta la mitad del cerro de dos colores de la entrada del mar a la laguna (Bahía). El agua venía como un río. El señor Ganchay quedó atrapado dentro de uno de los restaurantes, se salvó respirando por la rendija de una estera del techo del restaurante. El señor Juan Arce informó que las olas venían de ambos lados de la pequeña península y chocaban entre sí. El agua traía piedras, hierros, palos, etc. que golpeaban todo. El agua llegó hasta el techo de las casas.

Cinco personas desaparecieron por el arrastre del agua, 3 mujeres y 2 varones. La fuerza del agua las los sacó de los restaurantes.

Además de la erosión de los terrenos blandos causada por el agua, se encontró grietas en la roca, causadas por el sismo, al sur del restaurante del Sr. J. Arce, el más alejado de la entrada a la pequeña península. En una inspección previa de la zona, se encontró un gran número de grietas en roca de la Playa Sacasemita, al oeste de Laguna Grande y varias grietas en la zona turística la Catedral. Es evidente que el sacudimiento extremo del terreno, que produjo el sismo del 15 de agosto 2007, ocurrió en el área correspondiente a la proyección superficial de la Aspereza 2 (Figuras 2, 3).

Río Pisco

Muy cerca de la desembocadura del Río Pisco en el mar, se encuentra el asentamiento humano Boca de Río, en terrenos que antes eran pantanos. El testimonio del señor Luis Pachas, residente del lugar, informó que entraron tres oleadas. La tercera fue la más rasante y veloz. Arrancó “chambas” de pasto de 100-180 kg de peso y las movió como corcho. Un automóvil Tico fue volteado y arrastrado unos 300-400 m. Indicó que hay un kilómetro del sitio de la encuesta (en la carretera al Río Pisco, pasando el asentamiento Humano) al mar, y el agua avanzó unos 300 m más tierra adentro. Tanto el señor Pachas como el señor Ricardo Enchante, otro residente del lugar, informaron que durante el terremoto, la tierra se rajó y salió agua en gran cantidad, la que corría pendiente abajo. Después del segundo sacudón, el agua le llegaba a la rodilla. En sitios, se produjo cráteres por donde salió agua en chorros. Detrás de la casa del Sr. Enchante, el cráter tenía 1.5-2 m de radio. Después de la inundación por el agua de la licuefacción de los terrenos, sobrevino la inundación del maremoto. La inundación marina borró las grietas y conos de la licuefacción.

No tuvimos la suerte que nos acompañasen en la inspección del lecho del río. Pero nos indicaron que el agua subió hasta el frente de unos sauces conspicuos en la zona.

El río es ancho, gravo-arenoso de pendiente suave. El día de la inspección, discurría una pequeña cantidad de agua dulce en las partes bajas del cauce. La inspección se hizo río arriba hacia los sauces que nos habían indicado los residentes del Asentamiento Humano Boca de Río. Se encontró abundante conos y grietas de licuefacción tanto en las partes altas del lecho del río como en la orilla derecha. La licuefacción ocurrió durante el terremoto. El maremoto inundó el río borrando los conos y grietas de licuefacción. La primera tarea fue encontrar evidencias que permitieran establecer el límite entre las evidencias de la licuefacción borradas y no borradas por el maremoto, para luego inspeccionar el terreno por restos marinos. La Foto 5 muestra conos de licuefacción no alterados en material gravoso-arenoso y la Foto 6: conos no perturbados en material arenoso del cauce del río. En la Foto 7, se muestra conos de licuefacción obliterados por inundación terminal del agua del maremoto en partes bajas del lecho del río. En la Foto 8, se muestra restos marinos: algas, pasto, etc. , orientados en la parte terminal de la inundación del maremoto. Estas evidencias permitieron fijar el punto extremo de la inundación.

En la desembocadura del río Pisco, una barrera de arena separa la pequeña laguna terminal del mar. El curso terminal del río discurre por un lecho cortando la barrera casi al centro de la desembocadura. Un gran número de aves marinas cubría esta barrera, predominando los pelícanos. La distancia máxima desde la línea del mar al extremo de la inundación del maremoto es 1.14 km.

Río Matagente

En la parte baja del río Matagente, lo más impresionante fue las grietas dejadas por la intensa licuefacción en los terrenos de cultivo aledaños a la margen derecha del río: Grietas de más de un metro de largo, ~10 cm de ancho, y más de un metro de profundidad: Una lampa entraba hasta el mango sin dificultad. El terreno es arenoso. El señor Nicolás Mecía Córdova, dueño de los terrenos de la margen derecha, fue el testigo presencial. Personalmente nos indicó hasta donde subió el agua del maremoto río arriba. En el sitio indicado, el curso más bajo se encuentra en la margen derecha del cauce y voltea abruptamente a la margen izquierda para continuar río arriba, Foto 9. Hasta ése cambio de curso llegó el agua del maremoto. En el cruce, en el lado río arriba, se encontró una grieta intacta de licuefacción de arena, a 12 m del curso del agua, Foto 10. De esta manera, se comprobó, lo que se aplicó en el río Pisco para localizar el límite de inundación.

La zona de la desembocadura del río Matagente es amplia. Hay una barrera de arena que divide el mar de la laguna terminal de una longitud ~120 m río arriba. El agua del río discurre por un corte en la barrera. El punto de la inundación máxima y el punto en la berma marina se localizaron con GPS, y se realizaron las medidas normales para determinar la posición de la línea del mar, a partir desde la berma marina, en el momento de la inspección. La distancia máxima de inundación es de 628 m.

Río Tambo de Mora

En Tambo de Mora: Cruz Verde, margen izquierda del río Tambo de Mora, al pasar un puente en arco desde Tambo de Mora, se obtuvo testimonios en dos fechas distintas. La del señor Carlos Cotos del 19 de septiembre y la de la señora María Bautista y el señor Rolando Rodríguez el 16 de diciembre 2007. El señor Cotos indicó que el mar se retiró al inicio, y hubo tres olas. La primera, "llenado en silencio", llegó hasta cerca la iglesia en la Av. Cruz Verde, la segunda un poco más lejos. La tercera

fue la más fuerte, remató todo, arrastró botes pasando las construcciones. El tiempo estimado entre olas es de ~20 minutos. El agua salió en silencio, con fuerza, pero como un río. La gente que trató de alejarse de Cruz Verde, ~20 personas, quedaron atrapadas en el puente, porque el agua inundó ambos lados del puente. El señor Rodríguez mencionó que fueron cinco olas, la tercera la más fuerte. Durante el terremoto, su pozo de agua rebalsó.

No hubo oportunidad de desplazarse al punto máximo de inundación el 19 de septiembre, por ser demasiado tarde. La inspección del punto extremo fue realizada el 16 de diciembre 2007. La señora María Bautista, quien manifestó que camina río arriba diariamente, identificó el sitio. El agua de la inundación del maremoto llegó cerca del pie de un dique de grava que lo utilizan los lugareños para trasvasar el agua de la margen izquierda hacia el asentamiento humano Vilma León de la margen derecha.

La posición del punto en la desembocadura en el mar fue difícil de establecer. Existen canales profundos y anchos que dificultan el acceso. El mar ha construido una pequeña barrera de arena, la cual es cortada por el curso actual del río. La distancia máxima de la inundación a lo largo del río a la línea de mar es de 1.14 km.

Río Cañete

La inspección del río Cañete se realizó el 17 de diciembre 2007. Se contó con la colaboración del señor Alfredo Mendoza Quiroz de 76 años, agricultor, residente de Herbay Bajo, Cañete. Su chacra está en la zona de inundación del río. Se inspeccionó río arriba identificando evidencias de la inundación. Se encontró, entre los arbustos, entre otras evidencias, una tramayata (red de pescar con pequeños flotadores, barra de metal y una pequeña piedra como peso) de ~4 kg de peso que fue transportada por el agua del maremoto desde el mar hasta una distancia de 270 m desde la barrera en la desembocadura del río. Los terrenos de las márgenes del río están cultivados. Existe abundante vegetación en el cauce mismo del río.

El punto máximo de inundación fue localizado por el señor Mendoza en una especie de islote, donde el cauce tiene cierta pendiente y el agua circula relativamente rápido.

En la desembocadura del río, hay una barrera pedregosa con guijarros rocosos de hasta 50 cm de largo, no hay matriz de arena. La barrera separa la laguna terminal del mar. La pendiente de ambos lados de la barrera es fuerte: 12-17 ° con la horizontal. El señor Mendoza mencionó que la barrera ha bajado de altura después del maremoto. La laguna desagua por el extremo noroeste. Tanto la vegetación como la barrera marina deben haber aminorado la velocidad de inundación. La distancia máxima de la inundación en el Río Cañete es de 365 m.

Río Lurin

El río Lurin se encuentra canalizado hasta la playa misma. En la desembocadura, hay una pequeña barrera de grava con pequeños guijarros redondeados de 5-15 cm de diámetro y arena. El día de la inspección era sobrepasada intermitentemente por las olas del mar, alimentando-y-desaguando la laguna que se extiende desde la barrera hasta el puente de la carretera panamericana. La laguna está cubierta de vegetación acuática. En la margen derecha hay una trocha que llega a la playa y pequeños sembríos de cebollas hacia la carretera y una propiedad, cercada con un muro de cemento, hacia la playa. Una persona que estaba cosechando el producto informó que el maremoto no causó efecto en la poza del río. Otra persona en el edificio de la propiedad cercada dijo que no pasó nada en su propiedad ni en la trocha al borde de la laguna permanente el día del maremoto. En el terreno no se encontró evidencias de erosión ni inundación.

FENOMENOLOGIA MAREMOTOGENICA

La generación y características de un maremoto dependen de: La historia con que se producen los desplazamientos del fondo marino como consecuencia de la propagación de ruptura y desplazamientos en las superficies de fallamiento al producirse el sismo, la morfología submarina, y las condiciones dinámicas atmosféricas y oceánicas. Perfettini (2008) revisa y analiza los mecanismos de ruptura propuestos por O. Konca, M. Vallee, y el de Yagi para el sismo de Pisco del 15 de agosto 2007. Se debe agregar el mecanismo propuesto por Ji y Zeng (2007), entre otros. Hay cierto consenso en la existencia de dos zonas de desplazamiento fuerte: Rotura de dos asperezas. Una de ellas está frente a Chincha Baja – Tambo de Mora (área A1, Figura 1) y la otra se localiza frente a Sacasemita – Lagunillas (área A2, Figura 1). Hay concordancia en que la ruptura se inicia en la aspereza A1 a ~40 km de profundidad y se propaga, en un minuto, a la aspereza A2 a profundidades 10-20 km.

Por otro lado, NEIC (2007) localiza el centroide a ~65 km de la fosa marina Perú-Chile, al SW de la Aspereza A1, e indica que la diferencia del tiempo del centroide y la del hipocentro es 60 s. Así mismo, Norabuena (en Ocola, 2007) reporta un desplazamiento cosísmico de la Península Paracas de 1.6 m hacia la fosa marina y un levantamiento del continente de 50 cm. El punto GPS está localizado en el límite NE de la Aspereza A2. El levantamiento continental cosísmico explica el retiro inicial del mar reportado por las personas. La proyección en superficie del área de ruptura de los modelos mencionados tiene una longitud ~140-170 km, y la fosa marina tiene una profundidad superior a los 5,000 m. El principio del pistón hidráulico debió contribuir a la generación del maremoto. La generación de intensos remolinos en la Bahía Lagunillas que causaron gran impacto en la zona de los acantilados y las condiciones morfológicas locales explicarían las alturas extraordinarias reportadas del maremoto.

En los sitios inspeccionados hay consenso en que la propagación de las olas de inundación avanzó de sur a norte. En el tiempo del maremoto, hubo marejada y vientos fuertes del sur. El esfuerzo eólico transmitido a través de la superficie marina debió ser muy importante para generar corrientes tan fuertes. Por otro lado, se reporta que los sitios permanecieron inundados por largo tiempo. En este respecto, el mareograma de la DHN (2007) de San Juan de Marcona (Figura 4) es ilustrativo. En el mareograma se indica el inicio del oleaje anómalo de moderada intensidad, la condición de braveza y el inicio del registro del maremoto a las 19h 11min. Después del inicio del registro del maremoto, siguen 10 ondas con amplitudes máximas similares. El período medio de estas ondas es 23 min. Este resultado concuerda con la apreciación del residente de Tambo de Mora, Carlos A. Coto P., que las olas tenían ~20 min de período. Este tren de ondas termina, en el mareograma de San Juan, ~23 h (TL).

El marégrafo de San Juan está localizado frente la proyección de la Cordillera de Nazca hacia el continente. La isóbata de los 4,000 m del frente de la Cordillera de Nazca tiene una longitud de ~150 km, y el desnivel, entre el fondo de la fosa marina de Perú-Chile y la cima de la Cordillera, es ~3,000 m. Por otro lado, el extremo sureste de la zona de fractura del terremoto del 15 de agosto está frente a la parte norte de la Cordillera de Nazca. Algunas de las 10 olas registradas en San Juan pueden ser reflexiones múltiples de las ondas del maremoto entre el frente de la Cordillera de Nazca y el continente.

CONCLUSIONES

De los datos de campo suministrados por las personas presenciales del fenómeno de inundación del maremoto y de las observaciones de campo e información sobre el sismo de Pisco del 15 de agosto 2007, se concluye:

Las máximas distancias de inundación entre las latitudes $13^{\circ} - 15^{\circ}$ S, en ríos y depresiones topográficas varía entre 365 m y 2.4 km, siendo una de las más espectaculares la de la Depresión de Lagunillas en la Península de Paracas. Las distancias máximas en playas abiertas varían entre 30 m y 155 m. Las alturas máximas en playas abiertas y caletas varían entre 1.1 m y 5.2 m.

La identificación de fenómenos de licuefacción de terrenos no alterados/alterados por el agua del maremoto en los cauces de los ríos, conjuntamente con la búsqueda e identificación de material alóctono arrastrado río arriba por el agua de inundación fue una guía confiable en la determinación del límite terminal del maremoto.

Las casi cuatro horas de arribo de ondas de amplitud grande con períodos medios de 23 min desde el inicio del registro del maremoto en la Estación Mareográfica de San Juan de Marcona probablemente se deba, en parte, a reflexiones múltiples de las ondas del maremoto en el frente continental de la Cordillera de Nazca.

La fenomenología descrita por los pobladores del maremoto se explica razonablemente por el levantamiento cosísmico del continente en la zona epicentral (retiro inicial del mar), los fuertes vientos y oleaje del sur, y la complejidad del proceso de ruptura en la zona de la fuente sísmica.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al gran número de personas que contribuyeron a identificar los puntos terminales de la inundación del maremoto y dieron su testimonio sobre los fenómenos observados. Agradece también a los señores Paul Ascencios (estudiante de física de la Universidad Nacional de San Marcos), a los señores Joshua Trujillo y Freddy Román, por su participación en la toma de datos de campo; y, al Br. Físico Rodolfo Moreno por su participación en la toma y reducción de datos de campo, y en

apoyo en la preparación de ilustraciones gráficas. Agradece también, a la señora Ursula Torres por su apoyo en las entrevistas a residentes locales en los sitios inspeccionados. Un especial agradecimiento al Instituto Geográfico Nacional por autorizar la participación del señor J. Trujillo en la primera misión de campo. Agradezco a la Alta Dirección del Instituto Geofísico del Perú por su apoyo en la investigación realizada, y al Dr. Edmundo Norabuena por proporcionar la información GPS del punto en la Península de Paracas.

BIBLIOGRAFIA

- Barrientos S.E., 2007. Informe sobre las alturas de "run-up" alcanzadas por el tsunami asociado al sismo Mw=8.0 del 15 de Agosto de 2007 en la zona de Pisco, Perú. www.ceresis.org.
- DHN. 2007. Informe post tsunami. Ministerio de Defensa. Marina de Guerra del Perú. Dirección de Hidrografía y Navegación. Departamento de Medio Ambiente. Lima, Perú.
- DHN. 2007a. Tabla de mareas 2007. Puertos de la costa del Perú. Océano Pacífico – América del Sur. Ministerio de Defensa: Marina de Guerra del Perú. Dirección de Hidrografía y Navegación.
- Fritz H.M., N. Kalligeris, E. Ortega, and P. Broncano, 2007. 15 August 2007 Peru tsunami runup and inundation. http://www.eeri.org/lfe/pdf/peru_coast_tsunami.pdf
- Global CMT Catalog (2008). <http://www.globalcmt.org/cgi-bin/globalcmt-cgi-bin/CMT3/>
- Ji Chen (UCSB), and Zeng Yuehua (NEIC). 2007. Preliminary Results of the August 15, 2007 Mw 8.0 Coast of Central Perú Earthquake. http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2007/us2007gbcv/finite_fault.php
- Ocola L. y P. Huaco. 2006. El maremoto de Chimbote del 21 de febrero de 1996: Observaciones de campo y medidas de mitigación. Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.
- Ocola L. y P. Huaco. 2006a. Memoria: El maremoto en Camaná del 23 de junio del 2001, el hundimiento cósmico de la costa sur de Perú, y la mitigación de desastres. Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.
- Ocola, L. 2007. Notas sobre la competencia científica institucional, difusión y manejo de información, carencias-dificultades, y esperanzas. Reunión Internacional Lecciones del Sismo del 15 de Agosto 2007. Organizado por INDECI.
- Perfettini H. 2008. Los diversos mecanismos de ruptura propuestos para el sismo de Pisco: Revisión y Análisis. Este volumen.
- Tavera H., I. Bernal y H. Salas, 2007. El sismo de Pisco del 15 de Agosto, 2007m (7.9 Mw) Departamento de Ica – Perú. Informe Preliminar, IGP, Lima, Perú.
- Woodman, R. 2007. Tsunami Pisco-Paracas. www.igp.gob.pe.

TABLA 1. Distancias y alturas máximas de la inundación del maremoto de Pisco del 15 de Agosto del 2007.

Sitio	POSICION *		INSPECCION		Inundación de Terreno	
	Latitud	Longitud	Fecha	Tiem Local	Dist. Max	Altura Max
	°S	°W	dd.me.añ	h:min	m	m
Rio Cañete	13.132	76.399	17.12.07	11:05	365	N/D
Rio Tambo de Mora	13.461	76.188	16.12.07	15:32	1144	N/D
Rio Matagente	13.528	76.188	19.09.07	15:39	628	N/D
Rio Pisco	13.683	76.222	19.09.07	11:47	1276	N/D
Depresión Lagunillas	13.892	76.316	18.09.07	16:20	2415	N/D
Caleta Lagunillas	13.897	76.312	18.09.07	15:10	N/D	5.2
Depresión Yumaq	13.911	76.282	18.09.07	12:22	624	3.6
Tunga	14.252	76.128	17.09.07	15:15	56	1.2
Depresión Morro Quemado	14.326	76.097	17.09.07	01:30	1200	N/D
Maroma	14.371	76.092	17.09.07	12:56	155	1.1
Caleta La Hierba	14.636	75.926	16.09.07	13:45	38	2.6
Depresión Lomitas	14.710	75.848	16.09.07	12:06	627	N/D
Rio Ica	14.873	75.566	15.09.07	11:10	2181	N/D
Puerto Caballa	14.942	75.495	14.09.07	16:22	200	2.6
Rio Grande	14.997	75.453	N/D	N/D	1500 (**)	N/D
Caleta La Pedregosa	15.253	75.221	14.09.07	10:58	51	2.1
Lomas	15.564	74.846	14.09.07	07:38	86	2.2

NOTAS

1. Posición del perfil (*) sobre la cresta de la berma marina
2. N/D: Datos no disponible
3. (**) Información del señor César Quispe, residente de Santa Ana.

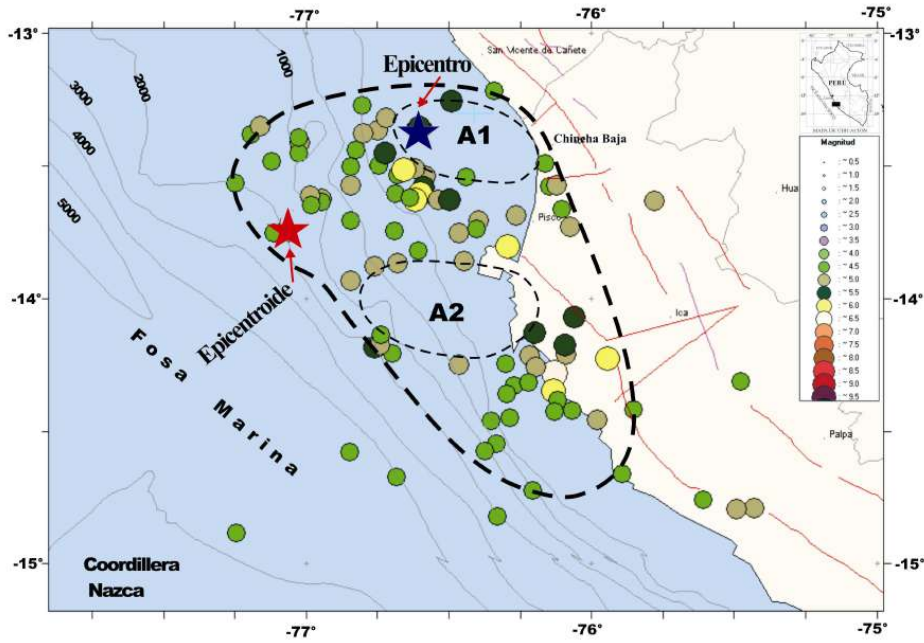


Figura 1.- Zona epicentral: Sismos con magnitudes igual o mayor a 4.5 mb: Datos del NEIC. Período: 15 de agosto 2007 - Febrero 1, 2008. Proyección en superficie del área de ruptura y bordes de asperezas (A1 y A2) inferidas de la distribución de las réplicas, y guiada por la morfología de los modelos de la fuente sísmica publicados.

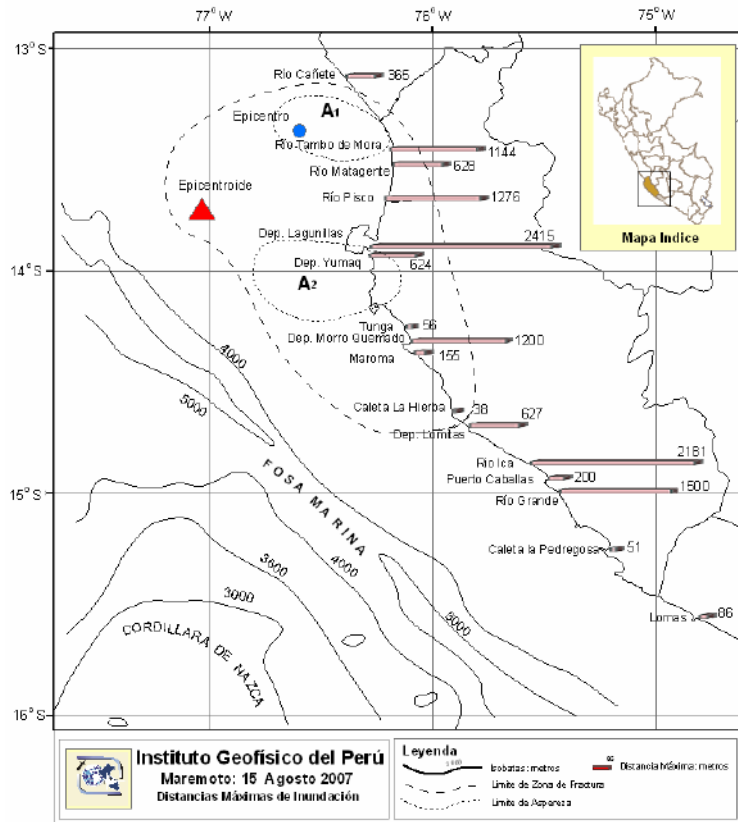


Figura 2.- Sitios inspeccionados: Ríos, depresiones topográficas y playas. Distancias máximas de inundación del maremoto del 15 de agosto 2007. Línea discontinua: Límite de la zona de ruptura inferida. Línea punteada: Limite inferido de las Asperezas.

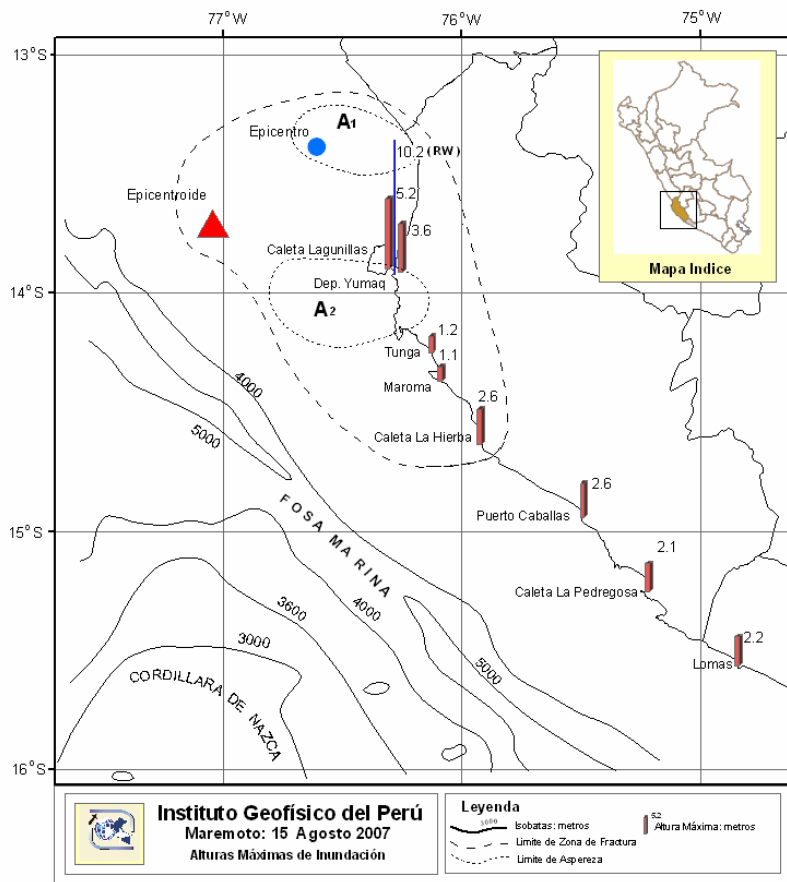


Figura 3.- Sitios inspeccionados: Ríos, depresiones topográficas y playas. Alturas máxima de inundación del maremoto del 15 de agosto 2007. Se incluye la altura extrema determinada por R. Woodman (2007). Observar que esta altura está al borde del área de la Asperiza 2. Línea discontinua: Límite de la zona de ruptura inferida. Línea punteada: Limite inferido de las Asperizas

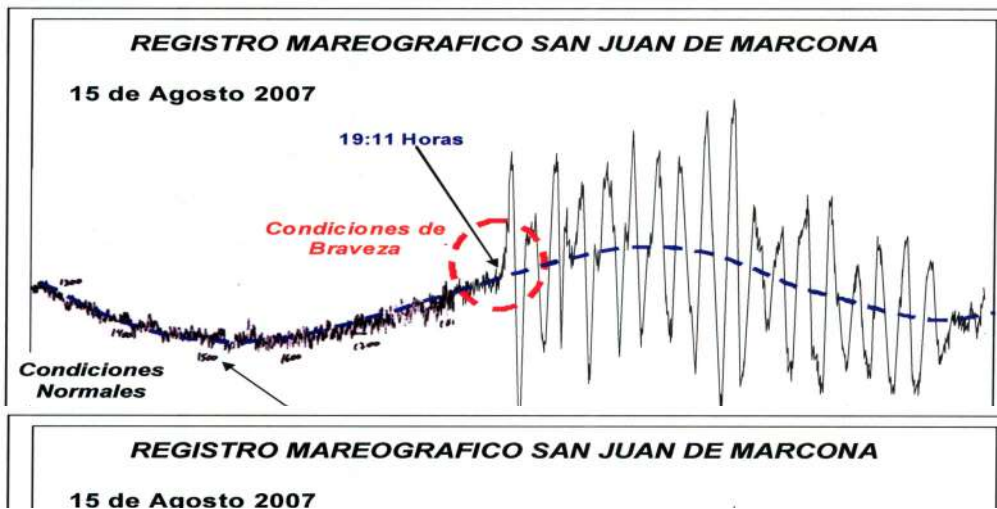


Figura 4.- Mareograma de la Estación de San Juan de Marcona de la DHN, Anexo 4 (DHN,2007)



Foto 1.- Vista panorámica del Puerto Caballas: Puerto enarenado y línea de playa desplazada hacia el mar. El agua del maremoto llegó a la primera grada de la capilla.



Foto 2.- Vista panorámica de la desembocadura del río Ica y playas aledañas. El maremoto inundó toda el área de playa y río arriba.



Foto 3.- Basura colgada en arbusto a 42 cm sobre el nivel del terreno. Los extremos de la basura apuntan río arriba. Evidencia del arrastre de material suelto río arriba por el agua de inundación del maremoto.



Foto 4.- Acantilado en Yumaq, Dr. R. Woodman midiendo la altura extrema de 10.2 m alcanzada por el agua del maremoto en la duna de arena sobre el acantilado rocoso (Woodman, 2007).



Foto 5.- Cauce del Río Pisco: Licuefacción de terreno gravoso: No alterada por inundación por el agua de inundación del maremoto.



Foto 6.- Cauce del Río Pisco: Licuefacción de terreno arenoso: No alterada por inundación por el agua de inundación del maremoto.



Foto 7.- Cauce del Río Pisco: Licuefacción de terreno gravo-arenoso obliterada por la inundación terminal del agua del maremoto.



Foto 8.- Cauce del Río Pisco: Restos marinos (algas), pasto, etc., en la zona terminal de la inundación del maremoto



Foto 9.- Cauce del Río Matagente: Cambio abrupto del curso del agua de la margen izquierda a la margen derecha. Area terminal del maremoto. El señor Mecía aparece en el extremo izquierdo de la foto.



Foto 10.- Cauce del Río Matagente: Licuefacción de arena no alterada por el agua de inundación del maremoto, a 14 metros del curso del agua. La caña de carrizo está plantada en el extremo derecho de la grieta abierta por la licuefacción.

GEODESIA SATELITAL Y TELEDETECCION

GEODESIA SATELITAL Y EL TERREMOTO DE PISCO (15/08/07)

**Edmundo Norabuena¹, John Salazar¹, W.endy Quiroz¹
K. Pencsik², T. Dixon²**

¹*Dirección de Geodesia y Geología, Instituto Geofísico del Perú*

²*Universidad de Miami*

MEMORIA

El 15 de Agosto de 2007 a las 18:40 hrs local, un sismo de magnitud momento (Mw) 8.0 rompió la zona sismogénica frente al puerto de Pisco, departamento de Ica. El epicentro estuvo localizado en 13.67°S y 76.76°O y su profundidad estimada fue de 40 km (Tavera et al., 2007). El sismo alcanzó una intensidad máxima de VII en la escala MM, causando enormes daños materiales en los poblados ubicados dentro de la región epicentral así como ocasionando la pérdida de oficial de 595 vidas humanas.

El Instituto Geofísico del Perú, dentro de su programa de Geodesia Espacial, inmediatamente planificó una campaña de observaciones geodésicas en la zona con la finalidad de medir el desplazamiento cosísmico ocasionado por el terremoto. Asimismo, en cooperación con la Universidad de Miami se instalaron cuatro nuevos monumentos geodésicos para tener una mejor cobertura en las mediciones del patrón de relajamiento post-sísmico que se estará realizando durante los próximos 05 años. Las observaciones GPS sobre la en las estaciones de la Figura 1 se iniciaron ocho días después y cada monumento geodésico fue medido en promedio durante cinco días UTC continuos. El procesamiento inicial dió como resultado que el máximo desplazamiento horizontal de 1.5 m ocurrió en la bahía de Paracas.

La Figura 2 muestra una vista de la estación UMS2 cerca de la ciudad de Ica.

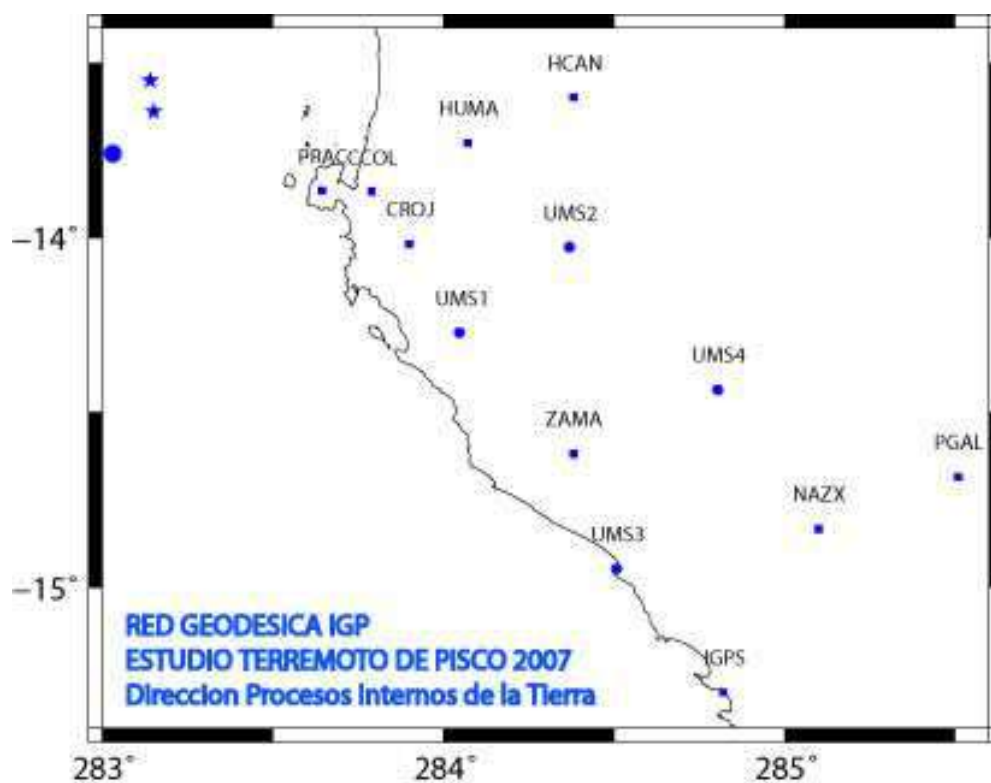


Figura 1.- Puntos geodésicos en el área afectada por el terremoto de Pisco



Figura 2.- Estación geodésica de ZAMA y personal del IGP

CONTRIBUCIÓN DE LA TELEDETECCIÓN Y LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA EVALUACIÓN DE LOS DAÑOS PRODUCIDOS EN LA CIUDAD DE PISCO POR EL TERREMOTO DEL 15 DE AGOSTO DEL 2007.

Zambrano R., Alex; Henríquez C., Gustavo; Gonzales K.
Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial - CONIDA.

INTRODUCCION

Diferentes estudios llevados a cabo en el marco de programas de investigación, han permitido estimar y evidenciar la contribución de los sensores remotos usando la tecnología satelital en la evaluación de peligros naturales: sismos, incendios, deslizamiento, erupciones volcánicas, etc. En este sentido la información espacial (imágenes satelitales), es empleada en diferentes etapas que van desde la identificación del peligro y la evaluación de los efectos producidos por el fenómeno natural, hasta las etapas de atención del desastre y eventualmente la planificación para la recuperación de las zonas afectadas. Evidentemente su aplicación, estará en función de la resolución espacial, temporal y espectral de las imágenes.

La costa del Perú, zona altamente sísmica, esta sujeta a la frecuente ocurrencia de eventos sísmicos de variable magnitud. El sismo ocurrido en la costa central del Perú el 15 de agosto del 2007 a las 18:41 hora local (23:41 GMT) tuvo una magnitud $M_w = 7.9$, cuyo epicentro tuvo lugar a 60 km al NO de la ciudad de Pisco (76.5° O, 13.3° S) y la profundidad del foco sísmico fue de 40 Km^[5]. Este terremoto afectó a las ciudades de Pisco, Ica, Chincha, Cañete y alrededores, siendo la ciudad de Pisco una de las mas afectadas, tanto en términos de vidas humanas, así como en daños a la infraestructura.

El presente trabajo muestra los resultados que se obtuvieron de la evaluación de los daños, producidos por dicho terremoto, en las viviendas de la ciudad de Pisco, mediante el uso de imágenes satelitales de alta resolución.

AREA DE ESTUDIO Y DATOS EMPLEADOS

La ciudad de Pisco es una ciudad relativamente antigua, la mayoría de las construcciones que existían hasta antes del terremoto, fueron hechas principalmente de adobe y quincha, en algunos casos la primera planta de quincha y la segunda de

material noble. Según reportes oficiales de INDECI del 04 de octubre del 2007^[4], el número de damnificados, afectados y heridos fue de 111,194 personas, mientras que el número de fallecidos fue de 338; 11,707 viviendas colapsaron y 9,550 viviendas fueron afectadas.

A través del International Charter on Space and Major Disasters, fueron donadas dos imágenes pancromáticas del sensor Spot 5 sobre la ciudad de Pisco (y otras de mediana resolución), adquiridas los días 06 de Octubre 2006 (con una resolución espacial de 5 m y un ángulo de visión de 10.45°) y 21 Agosto del 2007 (con una resolución espacial de 2.5 m. y un ángulo de visión de 22.70°), imágenes pre y post evento sísmico respectivamente. Además se recibió también una imagen Quickbird tomada el 3 de Junio del 2007 (de resolución espacial de 0.60 m). En la figura 1, se muestra las dos imágenes Spot y en la figura 3 se muestra la imagen Quickbird. Cabe mencionar que la cobertura de nubes en la zona dificultó la toma de escenas Quickbird post-evento, por ello no fue posible que el satélite adquiriera imágenes inmediatamente después del sismo.

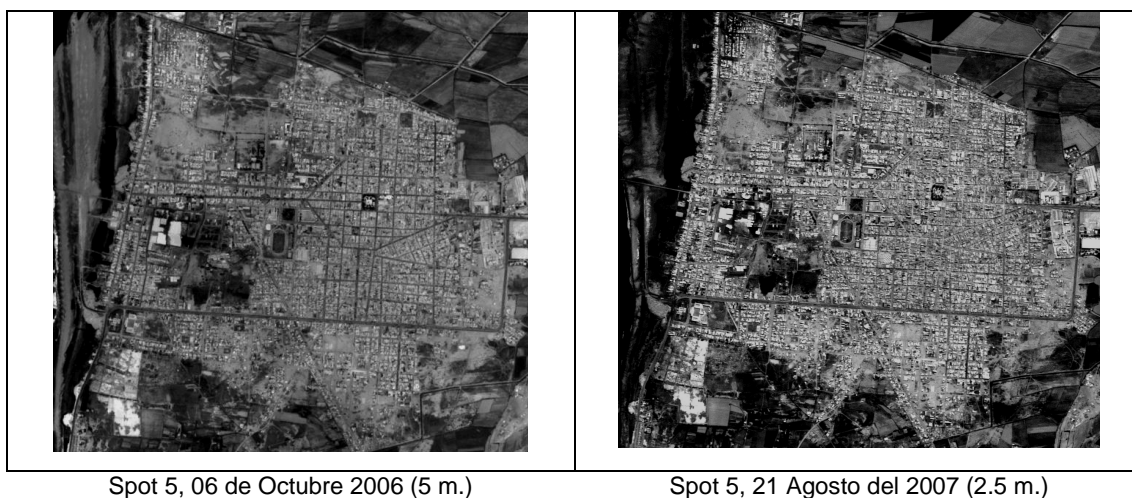


Figura 1.- Imágenes Spot 5 de la ciudad de Pisco

PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE DATOS

Una de las principales dificultades afrontadas para la adquisición de imágenes satelitales luego del terremoto del 15 de agosto en la ciudad de Pisco fueron las condiciones climáticas en la zona, por lo que la imagen fue adquirida con un elevado ángulo de visión (22.70°) y en consecuencia se observaron en la imagen algunas distorsiones geométricas en las construcciones. Considerando la diferencia en

resolución espacial tanto de las imágenes Spot y la Quickbird, se probaron dos técnicas diferentes: la diferencia de imágenes (Quickbird pre-evento y Spot post-evento) y el análisis de textura (Spot: post-evento):

Diferencia de imágenes

Consistió en hacer la diferencia (o “resta”) de las dos imágenes. Para ello fue necesario llevar previamente las dos imágenes a la misma resolución espacial, es decir degradar la imagen Quickbird (pre-evento) a la misma resolución de la imagen Spot 5 (post-evento) y co-registrar ambas imágenes. Posteriormente se estableció un umbral que determine los cambios.

Análisis de textura

Para este tipo de análisis existen diferentes filtros que permiten determinar las variaciones existentes entre los píxel vecinos. Considerando que el terremoto causó severos daños en las viviendas, hasta el punto de haber colapsado, al hacer el análisis digital de la imagen con los filtros de textura, los escombros resultantes de las viviendas colapsadas tendrán una respuesta diferente, que la que tendrían los techos planos (intactos) de las mismas viviendas previamente al terremoto.

Para este procesamiento hemos utilizado únicamente la imagen Spot (post-evento) a la cual hemos aplicado filtros de Co-ocurrencia, y hemos analizado básicamente parámetros como el contraste y la disimilitud. Posteriormente se realizó una clasificación no supervisada, ISODATA.

Para poder estimar el porcentaje de daños por manzana usando este método fue necesario crear una máscara de las zonas que estaban fuera de las manzanas (pistas, veredas, etc.). Se tomo como base la información provista por el INDECI (proyecto Ciudades Sostenibles) para la cobertura de las manzanas. La imagen Quickbird (pre-evento) en este caso fue de gran utilidad porque permitió actualizar esta cobertura.

RESULTADOS Y EVALUACIÓN

Al analizar los resultados de las dos técnicas empleadas, se observó que la segunda mostraba mejores resultados. Por una lado, ya que en la primera técnica hay varios parámetros propios a cada imagen (como el ángulo de incidencia, diferente resolución espacial inicial, condiciones atmosféricas, etc.). Mientras que en el segundo

método, estos factores se reducen ya que se considera una sola imagen (post-evento) para el análisis.

Es así que se ha obtenido una clasificación general de los materiales o coberturas de la ciudad basado en el procesamiento digital de las imágenes. En la figura 2 la clase de color azul agrupa los daños, escombros y alteración que sufrieron las edificaciones dentro de la manzana, la clase de color rojo es la vegetación, la clase de color marrón identifica estructuras en pie de la ciudad, y finalmente la clase color amarillo es el suelo y la tierra.



Figura 2.- Clasificación no supervisada ISODATA de la ciudad de Pisco

Los resultados fueron comparados con aerofotografías del 16 de agosto brindadas por la DIRAF, con los datos obtenidos de trabajo de campo realizado el 15 de septiembre y con los datos de daños (recolectados directamente por cada manzana) del Instituto Nacional de Defensa Civil, ver figura 4. Es necesario considerar que la fecha en que se realizó el trabajo de campo, muchas construcciones que si bien no habían colapsado, habían sido demolidas lo cual dificultó la verificación. Según la clasificación obtenida, se calculó la matriz de confusión en base a los datos obtenidos de campo (parcelas de muestreo o regiones de interés que identificaban cada clase) para determinar la precisión de nuestra clasificación, véase la tabla 1. Finalmente se pudo cuantificar los daños expresados en porcentajes del área de las manzanas con una aceptable probabilidad de acierto, ver figura 3.

Tabla 1.- Matriz de confusión, clasificación ISODATA

Clases	Vegetación	Daños	Tierra	Edifica.	Total
No clasificado	8.3	1.18	0	0	1.1
Clase 1 (Vegetación)	91.7	0.15	0	0	8.84
Clase 3 (Daños)	0	73.34	24.23	0.21	21.4
Clase 4 (Suelo/tierra)	0	25.33	75.77	0.55	14.31
Clase 6 (Edificaciones)	0	0	0	99.24	54.35
Total	100	100	100	100	100

En la matriz se observa una gran confusión entre las clases “daños” y “suelo/tierra”, lo cual es coherente considerando el tipo de material de las construcciones (Quincha y adobe en su mayoría), sumado a las malas prácticas al momento de construir las viviendas. El coeficiente kappa determinado fue de 0.8323 e indica una precisión total de 89.52%, los errores comisión y omisión se muestran en la tabla 2.

Tabla 2.- Error porcentual de Comisión y Omisión

Clases	Comisión (%)	Omisión (%)
Clase 1 (Vegetación)	0.43	8.3
Clase 3 (Daños)	11.7	26.66
Clase 4 (Suelo/tierra)	47.75	24.23
Clase 6 (Edificaciones)	0	0.76

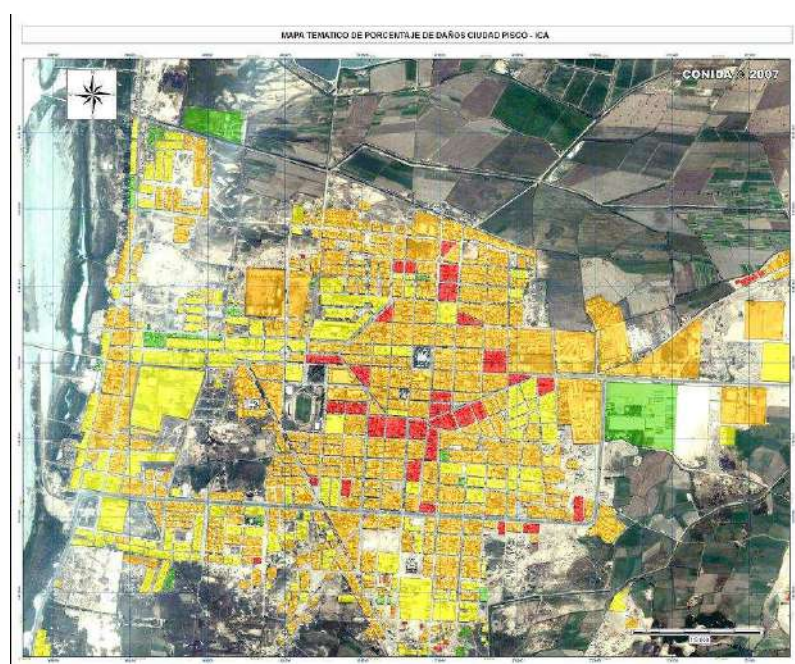
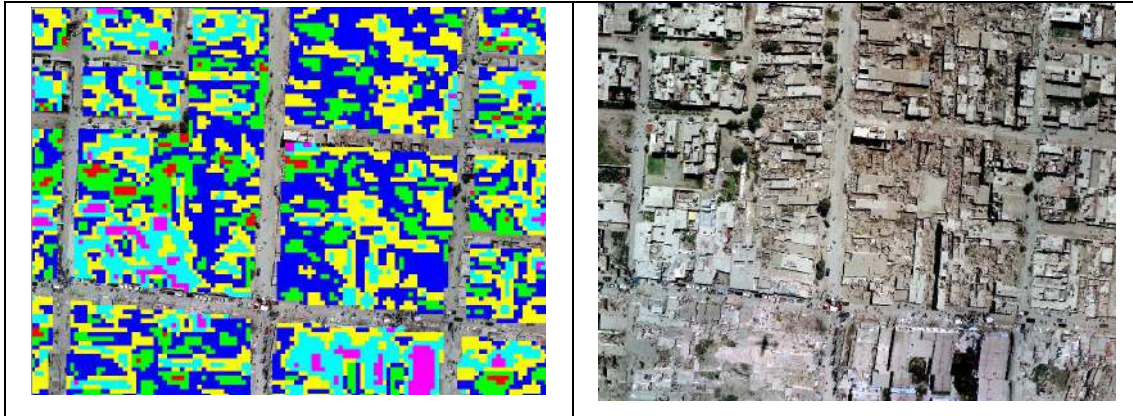


Figura 3.- Presentación producto final.



Clasificación (sobrepuesta a fotografía aérea post evento cortesía DIRAF)

Fotografía aérea post evento (DIRAF)

Figura 4.- Comparación de resultados con aerofotografías

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en la presente publicación, así como el grado de precisión alcanzado a pesar de las limitaciones descritas, refuerzan las posibilidades de aplicación de la tecnología satelital en ámbitos muy variados, siendo uno de ellos el caso de la evaluación preliminar de los efectos producidos por los terremotos.

Las imágenes de satélite de alta resolución han permitido obtener un mapa de daños preliminar, producidos por el terremoto del 15-08-2007 en la ciudad de Pisco, cuya precisión es aceptable considerando el grado de coincidencia con los datos obtenidos directamente en campo por el INDECI (sobre la mayor parte de la ciudad). Dicho mapa preliminar fue proporcionado tanto al INDECI como a las instituciones de investigación para complementar sus estudios y evaluaciones, entre ellas (IGP e INGEMMET).

Es evidente que la precisión de los productos dependerá en gran parte de la resolución espacial del sensor, sin embargo es necesario considerar otras variables externas en la generación de los resultados como son: las condiciones climáticas, la distribución de la ciudad, resolución temporal, el periodo de revisita del satélite, etc.

La información catastral (especialmente la información geográfica de las manzanas) en este tipo de evaluaciones puede mejorar de manera significativa los resultados, y esto ha quedado demostrado en nuestra evaluación, por ello es prioridad que todas las áreas sísmicas urbanas cuenten con esta información.

BIBLIOGRAFIA

Narader V. & Singh Narpal. (2001) Application of remote sensing and GIS for the study of subsurfacial changes in Bhuj and Kathiawar due to Bhuj Earthquake 2001. Gis development.

Beverley J. et al. (2003). Application of High-resolution Optical Satellite Imagery for Post-Earthquake Damage Assessment: The 2003 Boumerdes (Algeria) and Bam (Iran) Earthquake. MCEER – Buffalo University.

Matsuoka, M. and Yamazaki, E. (1998) Identification of damaged areas due to the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake using satellite optical images, proceeding of the 1998 Asian Conference on Remote Sensing. Gis Development.

Sistema Nacional e Información para la Prevención y Atención de Desastres – SINPAD
<http://sinadeci.indeci.gob.pe/PortalSINPAD/>

Instituto Geofísico del Perú
http://khatati.igp.gob.pe/Webs/cns06/pisco2007/terremoto_pisco_2007.htm

GEOLOGIA Y GEODINAMICA

EVALUACIÓN GEOLÓGICA DEL AREA DE LA HACIENDA TUPAC AMARU: EFECTOS GEOLÓGICOS DEL SISMO DEL 15.08-2007

¹Juan Carlos Gómez Avalos

²Ricardo Zamudio

¹Instituto Geofísico del Perú

²SEDAPAL

INTRODUCCIÓN

El 15 de Agosto de 2007 ocurrió un sismo severo que afectó la Región Ica y alrededores, con magnitud 7.0 ML (escala de Richter), cuyo epicentro se ubicó a 60 km al oeste de la ciudad de Pisco (Tavera, et al 2007). Este sismo alcanzó intensidad VII escala MM en el área de Pisco donde hubo mucha destrucción en viviendas y líneas vitales.

El objetivo de este trabajo fue verificar los efectos geológicos asociados al sismo en mención que afectaron la red troncal del servicio de agua potable de Pisco, en coordinación con personal técnico de SEDAPAL. Esta inspección permitió identificar la ocurrencia de fenómenos de licuación de suelos a 7 km al este del borde costero que afectaron severamente la red troncal de agua potable.

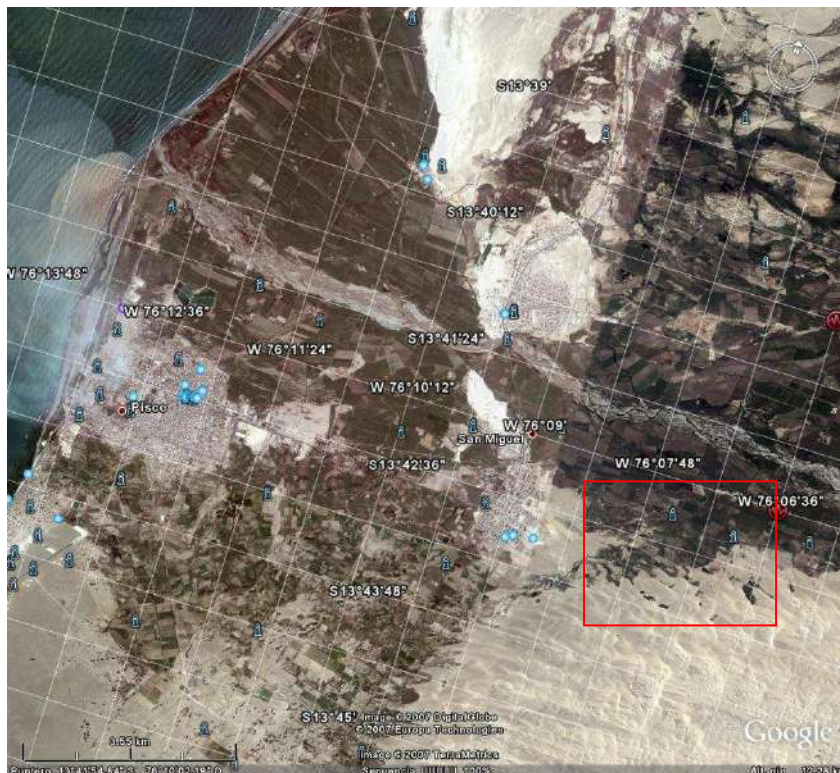


Figura 1.- El área de inspección se enmarca en el rectángulo de color rojo.

El día 22 de Octubre de 2007 se realizó la inspección geológica del área de la Hacienda Túpac Amaru, en el distrito de San Clemente – Pisco, con el objetivo de verificar el origen de los agrietamientos ocurridos en la zona de terrenos agrícolas que afectaron la tubería matriz que conduce el agua potable a la localidad de Pisco, Figura 1.

INSPECCION DE CAMPO

La inspección de campo se inició en el denominado Fundo Arteaga, que pertenece a la Hacienda o Poblado Menor de Tupac Amaru, en la zona de terrenos de cultivo al lado de un canal de regadío, que presenta daños estructurales por los agrietamientos del subsuelo (coordenadas GPS: S 13°42'29.9", O 76°07'42.0"), Figura 2.

En esta misma zona, los agrietamientos en el subsuelo han sido cubiertos por material removido, en las tareas de recuperación de los campos de cultivo.



Figura 2.- Agrietamientos y colapso parcial del muro del canal de regadío en el Fundo Arteaga-Pisco.

La inspección se continuo en los terrenos ubicados más hacia el Este, donde si se encontraron los agrietamientos en el suelo (Coordenadas GPS S 13°42'27.7", O 76°07'14.6"), en el sector denominado Fundo Caribus , Figura 3.

En esta zona se presentan dos sistemas de agrietamientos en el suelo, el primero con una dirección o rumbo: S20 – 25°W con longitudes promedio de 40 m, ancho de 30 cm y profundidad de 1.5 m y el otro sistema con rumbo S20°E, longitud 60 m en promedio, ancho de 40 cm y profundidad de hasta 1.5 m.

Cabe señalar que, en la zona los suelos son predominantemente arenosos, con una delgada cobertura de terreno de cultivo en la superficie de naturaleza arcillo-limosa con espesor de ésta última que no supera los 30 cm.



Figura 3.- Agrietamientos en los terrenos de cultivo del Fundo Caribus.

En esta zona del Fundo Caribus, dentro de la zona de agrietamientos se pudieron observar los típicos volcanes de arena, producto de la licuación de suelos arenosos, Figuras 4.a y 4b.

En esta misma zona, también se observó procesos de lateral spread a lo largo de la zona de agrietamientos, confirmando los procesos de licuación de arenas, Figura 4c.

Este tipo de efectos geológicos también fueron observados muy notoriamente en Tambo de Mora, Chincha y Pisco (Rodríguez y otros , 2007).

Posteriormente se hizo un recorrido hacia el oeste para delimitar el área afectada por estos procesos y se llegó a la zona denominada Caballería, donde a pesar de los trabajos de sembrado, aún se pueden observar evidencias del proceso de licuación de arenas (Coordenadas GPS: S 13°42'32.8" , O 76°07'51.2"), Figura 5.

Aledaña, a esta última zona, se observó la tubería de agua al descubierto, donde se verifica que ha sido reparada, pero que aún presenta algunos problemas de filtraciones. Esta tubería atraviesa la zona de los agrietamientos por procesos de licuación de arena, Figura 6.



Figura 4.a.- Volcán de arena en zona de agrietamientos, producto de la licuación de suelos



Figura 4b.- Volcanes de arena originados a lo largo de los agrietamientos



Figura 4c.- Fenómenos de lateral spread que evidencian el proceso de licuación de arenas en el fundo Caribus



Figura 5.- Zona de Caballería – Fundo Arteaga. Agrietamientos del suelo por procesos de licuación de suelos.



Figura 6.- La flecha azul señala la zona donde se observa la tubería de agua y la flecha roja muestra la zona de los agrietamientos que afecta el trazo de la tubería.

A la salida de la Hacienda Tupac Amaru, se encontró que parte de los terrenos corresponden a humedales, por donde atraviesa una línea de alta tensión. Algunos postes, fallaron y han sido ya reemplazados, esto por el proceso de licuación de arenas, (Coordenadas GPS S 13°42'32.7" y O 76°08'04 .9"), Foto 7.

Se hizo un recorrido por la parte baja del distrito de San Clemente, donde se encuentra ubicada la laguna de oxidación, allí se presentaron fallos en los terraplenes, producto de la licuación de suelos arenosos (Coordenadas GPS: S 13°40'27", O 76° 09'52.6"), Figura 8.

Finalmente se hizo un recorrido aguas arriba del Puente Huamaní, siguiendo el cauce del río Pisco, pero no se encontraron evidencias del proceso de licuación de suelos en este sector. También se recorrió las inmediaciones de la colina anexa a Tupac Amaru, donde se asientan las antenas para la comunicación celular, y no se observó indicios de fracturamiento o agrietamientos en las laderas y afloramientos de roca.



Figura 7.- Torre de alta tensión que colapso por falla del suelo: procesos de licuación de arenas – Hda. Tupac Amaru, Pisco.



Figura 8.- Zona de las Lagunas de Oxidación, parte baja de San Clemente. Falla del terraplén por procesos de licuación de arenas.

CONCLUSIONES

- Los agrietamientos que afectaron los terrenos de cultivo en la Hacienda Túpac Amaru (Pisco), se debieron a procesos de licuación de las arenas y no a un reactivamiento de alguna falla geológica, en el sector que cubrió la inspección.
- Las evidencias de licuación en el sector de Túpac Amaru, a 7 km al este del borde costero, son las manifestaciones más orientales encontradas en el área afectada por el sismo con este tipo de efecto geológico.

BIBLIOGRAFIA

Rodríguez, L., Domínguez, J., López, R. y Rendón H. (2007) Informe preliminar evidencias post-sísmicas de inestabilidad geológica. FUNVISIS-CERESIS.

Tavera, J., Bernal, I. y Salas H. (2007) Informe Preliminar sismo de Pisco del 15.08.2007 (/9 Mw) Departamento de Ica. Lima. Informe Técnico, Dirección de Sismología, IGP.

MORFOLOGIA, TSUNAMIS Y LICUEFACCION DURANTE EL SISMO DEL 15 DE AGOSTO DE 2007

Laurence Audin y Daniel Farber
IRD, USC

RESUMEN

El día 15 de agosto de 2007, anoche 18:40 local, un fuerte sismo sacudió la ciudad de Pisco y el Sur del Perú, el epicentro tuvo lugar al noroeste de la Península de Paracas (ML 7.0). La población de la región costera alrededor de Pisco fue la que sufrió más y donde los daños fueron considerables (más de 500 muertos). Ese terremoto de subducción originó daños en todo tipo de infraestructuras y alarma en la población de toda la región de Pisco, observándose eyecciones de arena y agua, que en algunos casos afectó viviendas como en Tambo de Mora (fenómeno de licuación de suelos). En casos de tal sismo, la estimación de los daños, el mapeo fino y la definición del tipo de evidencias que son efectos del terremoto permiten de afinar los modelos de fuente sísmica o de entender en detalle los procesos locales que traducen la liberación de esfuerzos durante el episodio co-sísmico de la ruptura (licuación de suelo, tsunamis, levantamiento o hundimiento costero, etc). Inmediatamente después de la ocurrencia del terremoto, un equipo del IRD y de la USC Santa Cruz realizó un trabajo de campo de 15 días en la región. En esta comunicación se presentan las observaciones y algunas interpretaciones preliminares de ese esfuerzo.

INTRODUCCION

Se describen las consecuencias o los efectos asociados a la ocurrencia de un terremoto de subducción en la zona costera de la región central de Perú. Las observaciones corresponden a la zona de Pisco (Figura 1). Una zona ancha, costera fue reconocida a lo largo de una distancia de ~200km en donde se observaron efectos del terremoto. La zona de reserva de la Península de Paracas, también fue explorada junto con los pequeños pueblos de pescadores como Laguna Grande. Pocas réplicas fuertes ($M_w < 6.5$) fueron registradas durante la crisis sísmica y las evidencias que se describen están asociadas al terremoto principal y al tsunami. El epicentro del terremoto fue localizado a menos de 100km de distancia de la ciudad de Pisco en el mar, con foco ubicado a una profundidad de 25 km; es decir, relativamente superficial.

La licuefacción (licuación) que consiste en la pérdida temporal de cohesión del suelo debido a que están saturados de agua, ha sido producida por este terremoto. Cuando esto ocurre los edificios se asientan, se ladean o se desvían. Se encontraron volcanes de barro y arena debido a la expulsión violenta del agua atrapada en el subsuelo, la presencia de agrietamientos en el terreno, a veces alineados entre ellos; además de asentamientos diferenciales (Figura 2). Escarpes de fallas que consisten en rupturas en la superficie debido a la ocurrencia del terremoto y al ser la falla activa, la ruptura se observa en superficie. Esto implica la reactivación de fallas superficiales por la gran magnitud del sismo principal. En el caso de Pisco, es probablemente difícil

de observar aunque en superficie algunos indicadores podrían sugerir que las fallas fueron reactivadas o simplemente son zonas en donde se ha producido escape de fluidos. Los objetivos de las observaciones de campo en la zona afectada por el terremoto de Pisco son:

- Encuesta a testimonios sobre las características del tsunami
- Mapeo de la deformación regional y de posibles indicadores de reactivación de fallas
- Presencia de fenómenos de licuefacción
- Mapeo de zonas inundadas post-tsunamis
- Estimación del run-up a lo largo de la zona de ruptura
- Monitoreo de los movimientos post-sísmicos con la instalación de GPS permanentes.

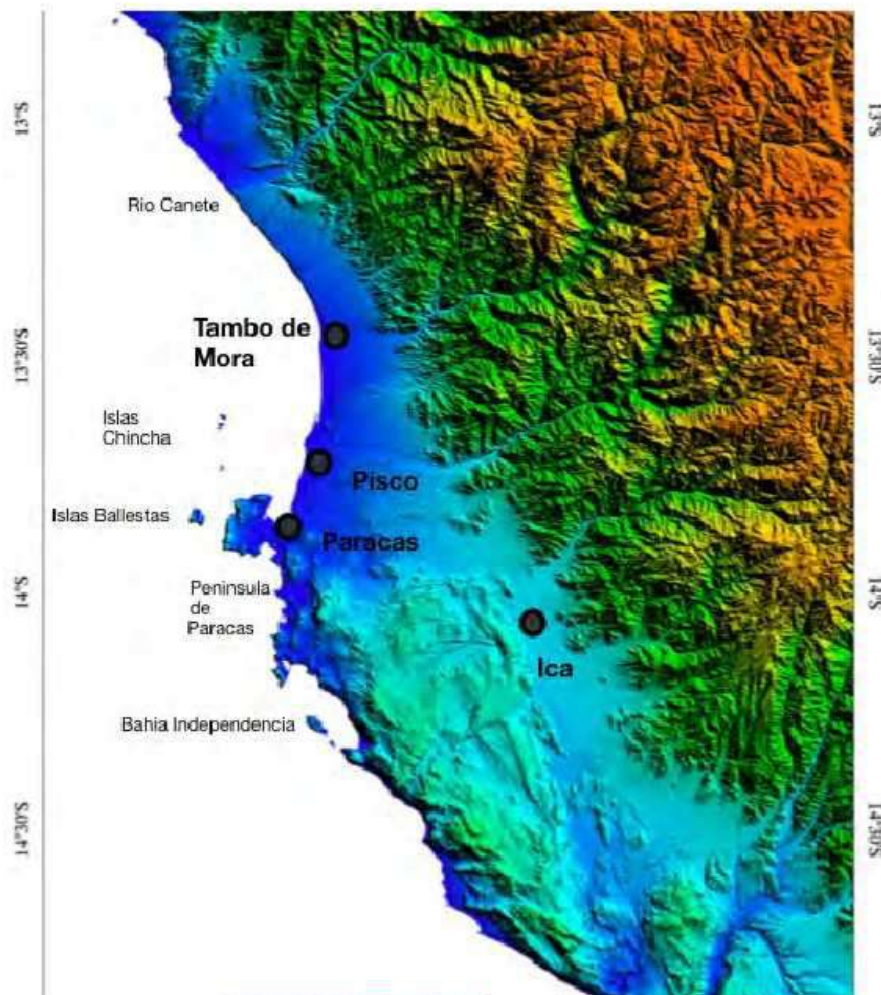


Figura 1.- MNT STRM, Topografía de la zona de estudio

Daños a Infraestructuras

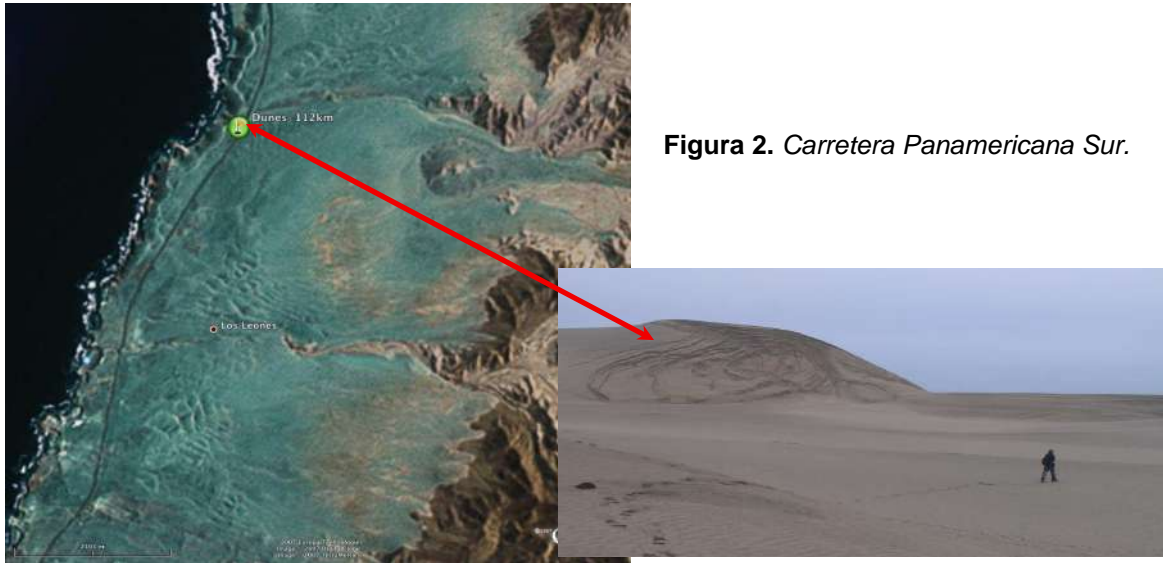


Figura 2. Carretera Panamericana Sur.

La carretera Panamericana Sur fue cortada en varios sitios. De Norte a Sur, los tramos afectados presentan evidencias de deslizamientos, licuefacción, y fenómenos de inestabilidad, siguiendo una dirección NS ($S12^{\circ}51.666'/76^{\circ}30.679'$ Imagen Google Earth). Son dunas se encuentran colgadas al tope de una formación de conglomerados aluviales Cuaternarios.

Fenómenos de asentamiento en las dunas provocadas por aceleraciones verticales ocurridas durante la fase co-sísmica, ha provocado fenómenos de gravedad sin una dirección preferencial. En la foto de la Figura 2 se muestra un ejemplo tomado en el km 112 de la Panamericana Sur (extremo oeste), cerca del acantilado a más de 100 m de altura s.n.m.m. Estas dunas son antiguas y se encuentran preservadas al tope de la topografía.



Figura 3.-

Se nota los postes eléctricos caídos al lado de la pista.

Pisco Playa



Figura 4.- *Diversos tipos de viviendas dañadas en Pisco Playa*

Casi todas las casas antiguas de tipo colonial fueron destruidas. Pero las paredes de gran espesor han sido dañadas solo parcialmente. Este tipo de edificios se encuentran en casi toda la zona la más afectada de Pisco Playa en donde se observó también fenómenos de licuefacción a lo largo de la playa.

En general, cada persona cuenta que percibió dos llegadas de ondas sísmicas, la primera menos fuerte que la segunda con un cierto tiempo de separación entre las dos (sensibles de 30 s a 1min).

Muchos edificios fueron dañados por fallas en su construcción o por fenómenos de licuefacción.



Figura 5.- En Cañete, Tambo de Mora, Pisco e Ica, muchas de las casas de adobe colapsaron.



Tambo de Mora



Figura 6.- La iglesia de madera y adobe fue destruida en un 70%.

En las cercanías del mar y en zonas pantanosas constituidas de arcillas y formaciones aluviales recientes se presentaron numerosos fenómenos de licuefacción.



Figura 7.- Imágenes de la plaza central y alrededores.

En el área de la Plaza de Armas (localizada a 500 m de distancia al mar), se observa zonas cubiertas de arena que han emergido de las fisuras presentes en superficie. Por ejemplo en la plaza central, donde existe una columna sobre suelo de mármol, se produjo desplazamientos por licuación.

Fotos Aéreas



Figura 8.- San Pedro Catedral de Pisco

Para el mismo sitio, los diferentes tipos de destrucciones se explican en termino de efectos de sitios, suelos pocos consolidados, malas construcciones.



Figura 9.- En la carretera Panamericana Sur, se observo fenómenos de asentamientos de tierra, deslizamientos y procesos de licuefacción (Servicio Aéreoográfico Nacional).

Tsunamis y Run-ups: Evidencias



Figura 10.- Diversas evidencias del tsunami generado por el sismo de Pisco.

Lobos marinos muertos transportados lejos del mar. Botes lejos del mar, dentro de las casas y de las bahías por encima del nivel medio del mar. Erosión de la pintura en las casas, vidrios rotos a la misma altura. Trazas de inundaciones con cangrejos y peces muertos.

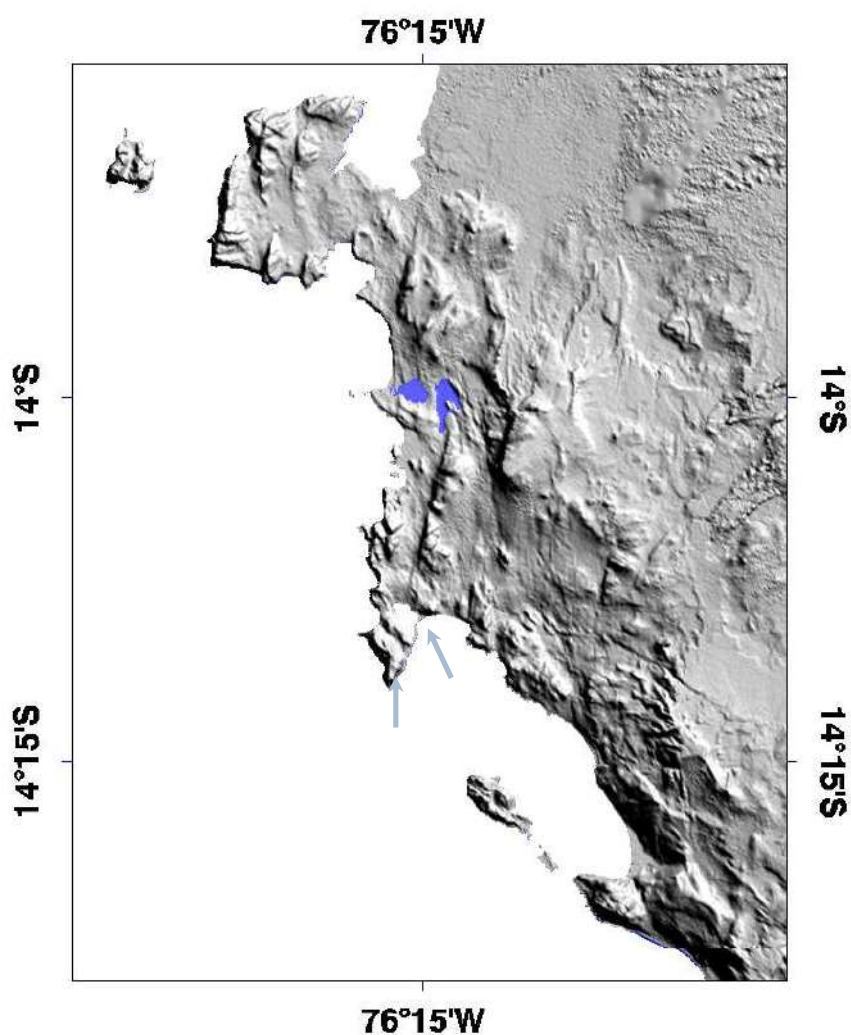


Figura 11.- Ubicación del área afectada por el tsunami de Pisco

Norte de Paracas (2 olas de +/- 1 metros, máximo 3 metros). Altura del run-up menos importante que al sur de la península (máximo 4 metros en Pisco). Existen testimonios de dos tsunamis con una separación de 6 horas.

Sur de Paracas (3 olas +/- 1 metro, máximo 4 metros). Altura del run-up al sur de la península (máximo 10 metros en Lagunillas).

Los resultados de las observaciones geológicas confirman todo lo recopilado en las encuestas.

- En los cerros de Lagunillas existen 3 capas de depósitos nuevos que evidencian llegadas múltiples de olas de tsunami.
- En los cerros, se observa erosiones en el ultimo nivel de las terrazas marinas, principalmente en la bahía de Lagunillas.
- En todos los sitios visitados se ha encontrado material fuera de su lugar original, material extraído del mar o de la costa (cangrejos, lobos de mar, algas, basura, botes, refrigeradoras, etc.)
- Estadística de 3 personas muertas.
- No existen evidencias de subsidencias co-sismicas en la zona costera.



Figura 12.- Localidad de lagunillas con 3 personas muertas, todas las casas destruidas por el tsunami, no por el sismo.



Lobos de mar muertos lejos de la playa. Presentaban huecos en el pecho.

Playa Lagunillas



Las casas fueron destruidas por el tsunami, no por el sismo. En la imagen se muestra una casa de ladrillo y concreto

Sitio 1, Foto 2.



Run-up a la entrada de la bahía (aprox. 6 m). Posibles efectos de amplificación por la geometría de la costa.

Sitio 2, Foto 2.



Zona normalmente seca, ahora húmeda con aportes de material (max. 15 cm). Podrían haber llegado 3 olas o posiblemente una ola que retorna y otra con ingreso posterior.

Figura 13.- Evidencias de la ocurrencia de tsunamis

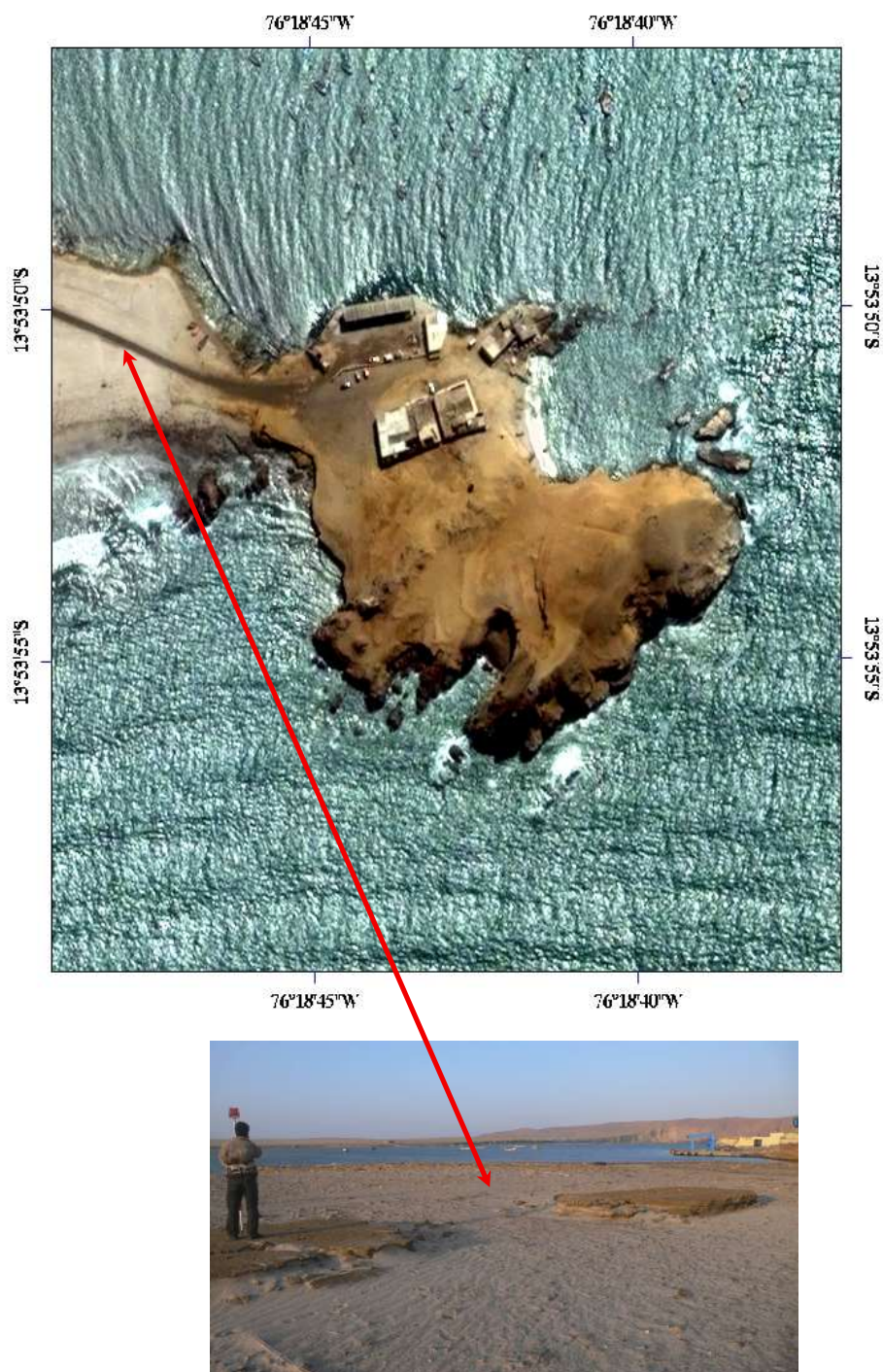


Figura 14.- Restaurantes en la playa Lagunillas (península de Paracas) antes del sismo y tsunami. La erosión en la terraza marina es la más reciente.



Figura 15.- Algas colgadas en las ventanas de las viviendas



Figura 16.- Reactivación de la falla normal que borde el graben al Este de la Playa Lagunillas



Figura 17.- Foto superior, El Playon caracterizado por ser desértico e inhabitado. Aquí se produjo una fuerte inundación, siendo la altura del run-up de aproximadamente 3 metros siguiendo la curva del nivel topográfico. Según la cartografía hecha con un batolito, la inundación llena la playa en una zona normalmente seca. Aportes de material tipo algas, cangrejos, etc.. No se observa levantamientos o subsidencia de la línea de costa. Foto inferior, la zona inundada que normalmente esta seca.



Figura 18.- Tipos de detritos transportados y dejados después del tsunami. Post-crisis arriba y pre-crisis abajo. Se nota la zona seca que ahora esta inundada.

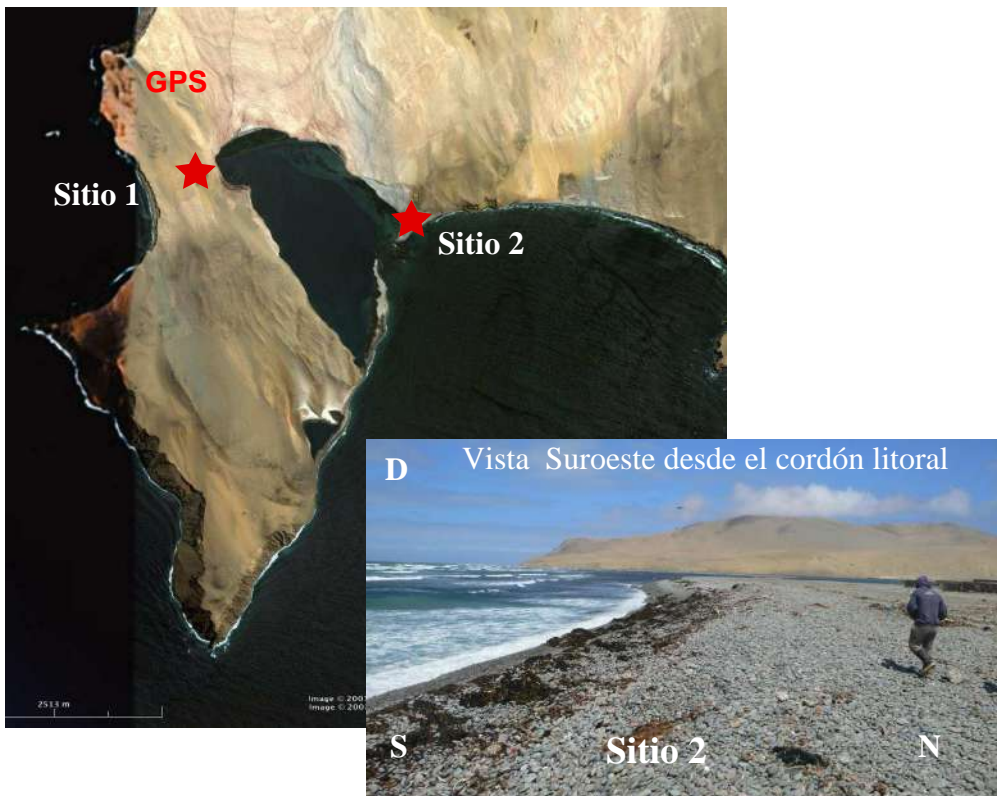


Figura 19.- Ubicación de la Playa Laguna Grande

Laguna Grande: Playa parcialmente cerrada por un cordón litoral, pero se comunica directamente con el mar. El terremoto fue sentido por pescadores hasta en sus botes que estaban en la bahía. Las olas del tsunami llegan al tope del cordón y no rebotan. Tampoco alcanzan el fondo de la bahía ni al pueblo. Pocos detríticos son depositados en la bahía, la mayoría (lobos de mar) se quedan en el cordón litoral.



Figura 20.- Vista al NO desde el pueblo del sitio 2, lobos de mar muertos pero ningún bote dañado.

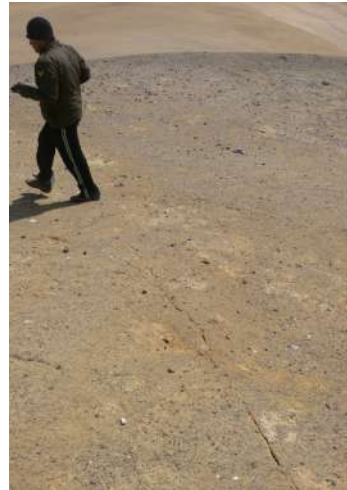


Figura 21.- Foto superior: Sitio 1, puerto de pescadores y pueblo principal. Presencia de asentamientos o deslizamientos de tierra. No se ha encontrado evidencias de la llegada del tsunami.

Fotos inferiores: Estación GPS en Laguna Grande. Formación Chilcatay y sedimentos marinos. Fisuras re-abiertas en el terreno después del terremoto sin dirección preferencial. Se observa algunos centímetros de apertura con evidencias de movimientos horizontales, pero no verticales.

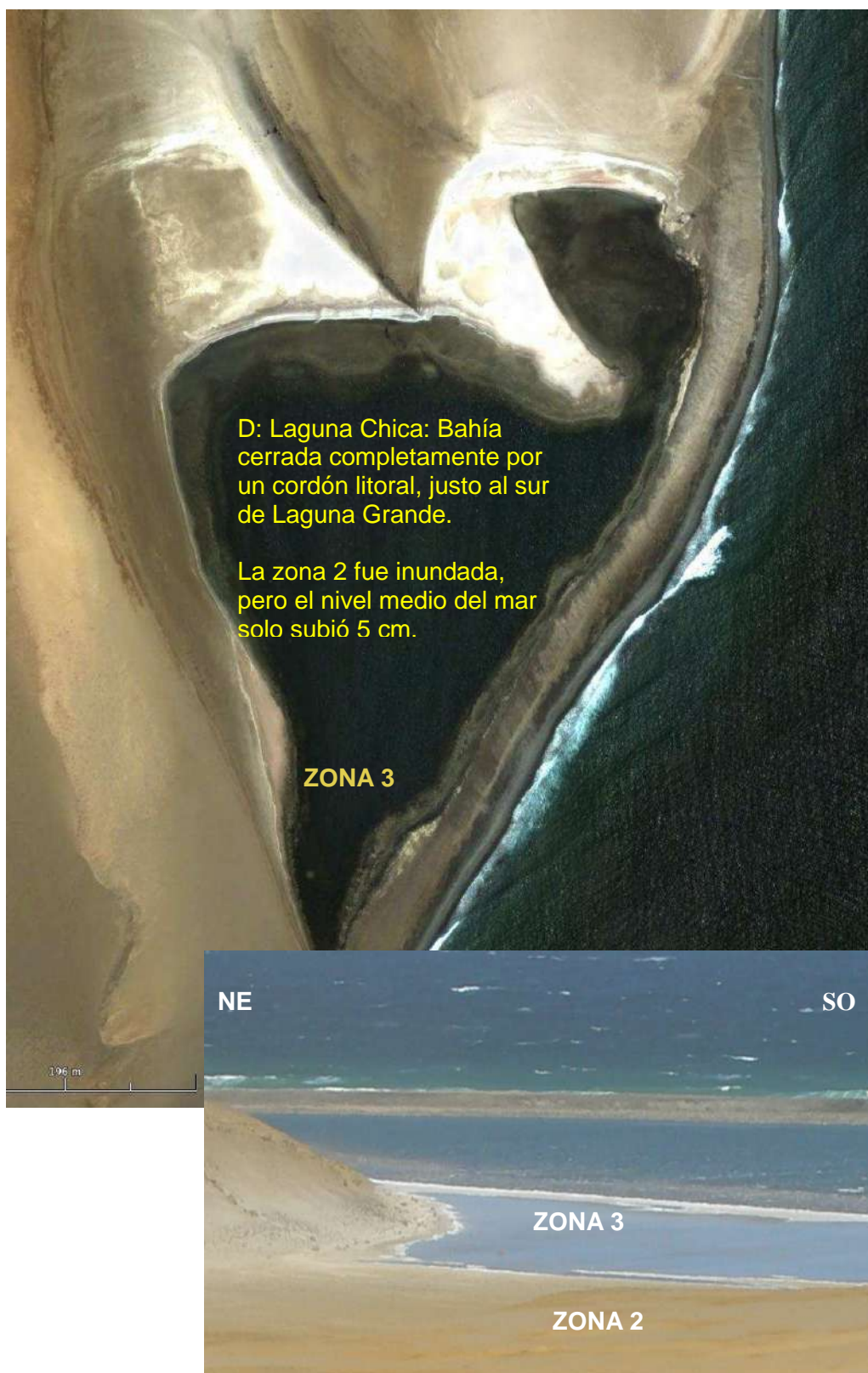
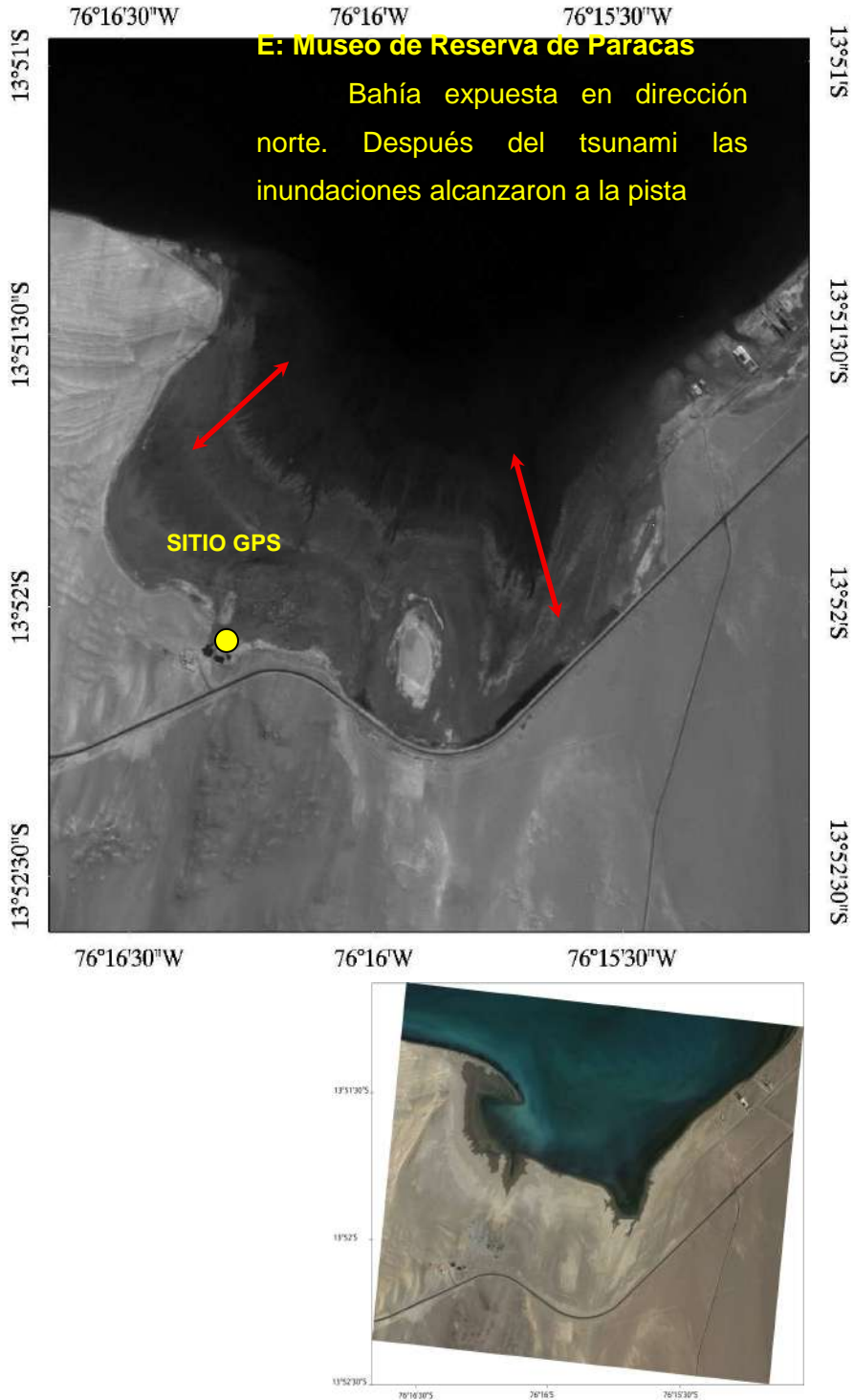


Figura 22.- Vista satelital de Laguna Chica



Figura 23.- Laguna Chica: Normalmente la zona 2 esta seca y ahora se encuentra inundada (ver foto). Las huellas de vehículos indican que antes era posible circular. Las personas dan idea de la escala y el tamaño de la piedra en la foto inferior, muestra el nivel débil de inundación. No se encuentra evidencias de subsidencia.



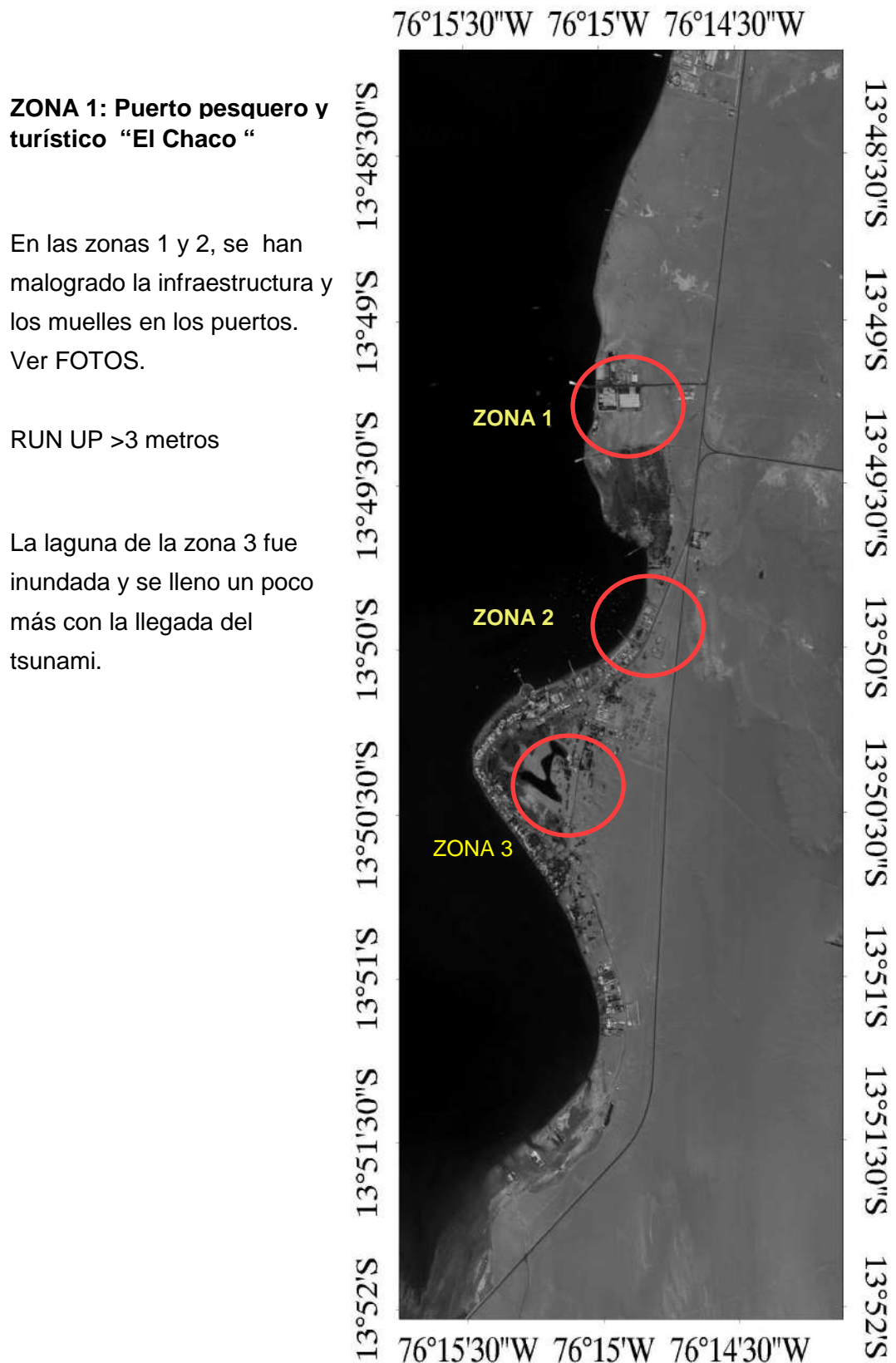


Figura 25.- Puerto pesquero y turístico "El Chaco"

ZONA 1

Alcance de la ola del tsunami aproximadamente 2.5 metros.



Figura 26.- Imágenes que muestran testigos del avance del tsunami de Pisco

ZONA 2



Sitio 1 “El Chaco”, vista al Oeste



Figura 27.- El mar se retira y después de 15 a 20 minutos de ocurrido el sismo, llega un fuerte oleaje (testimonio de pescadores).



Figura 28.- Foto superior: Vista de una palmera en la playa El Chaco (sitio 2) abierta en dirección Norte. La altura del oleaje/tsunami fue pequeña con respecto a lo que se observó más al norte o al sur de la península (más o menos 2 metros de run-up).

Foto inferior: Sitio 2 con vista al NE. El desplazamiento del muelle fue producido por el tsunami, no por el sismo. El oleaje pasa por debajo del muelle y lo levanta.



Figura 29.- En Pisco se ha evaluado más o menos 2 metros de run-up, cerca del mar.

Figura 30.- Pisco: El tsunami se guía por el río y por las calles dentro de la ciudad pero se atenúa rápido.



Figura 31.- Vista al norte desde el mismo sitio de la foto previa.



Figura 32.- Nótese las ventanas rotas a la misma altura con algas colgadas en las rejas. Esto se observa a lo largo de toda la zona de Pisco Playa.



Figura 33.- Ciudad Militar cerca de la FAP. El run-up fue de 2 metros según indica las huellas en las paredes. Vigilante indica ver que el mar se retiró antes del tsunami.





Figura 34.- Imagen superior, zona de costa antes de ocurrido el tsunami y en la imagen inferior, después de haberse producido el tsunami. Obsérvese sobre el cauce del río el alcance de las inundaciones.



Figura 35.- Villa 24 de Julio: Cerca de la orilla del mar se observa un pantano formado por el tsunami que llego a la zona 30 minutos después de ocurrido el sismo. El tsunami tuvo poca fuerza porque no arrastro los fardos de pajas. Las fisuras presentaban orientación en dirección NS. En la figura de la derecha, se observa un pozo natural en el cual el nivel de agua no ha variado. No se observa subsidencia o levantamientos del terreno.



Figura 36.- Pampa Jahuay (Norte de Chincha): Las olas sobrepasan el cordón litoral artificial edificado por las empresas para proteger su negocio de crianza de pollos. El agua ahoga a los pollos más pequeños (13.335°S/76.235°W).



Figura 37.- Imagen superior izquierda: Volcanes de barro formados por licuefacción de suelos con orientación NS. Otros: Ejemplos de desplazamientos verticales alineados en dirección NS; es decir, coherente con la flexura de Huamani (San Clemente).



Figura 38.- Laguna Chica: normalmente la zona 2 esta seca y luego quedo inundada. Se ven las huellas de vehículos que antes podían circular por la zona.

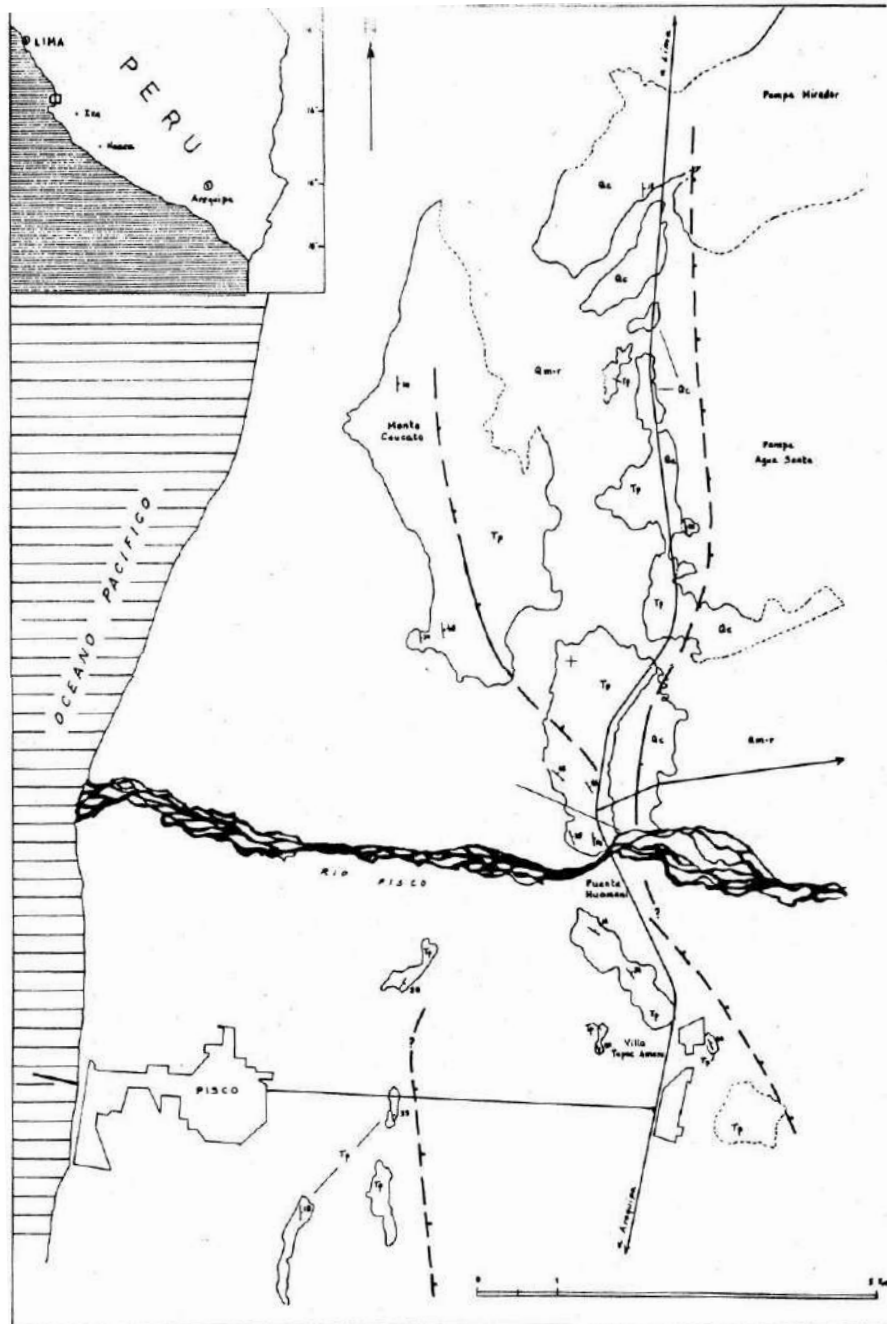


Figura 39. - La flexura Huamani afecta a varios conglomerados Cuaternarios (Fm Cañete) y es usualmente considerada como activa. Pero si fue reactivación por el terremoto es tema de estudio ya que las evidencias superficiales como licuación o asentamientos no permiten concluir si hubo reactivación.

**LEVANTAMIENTO COSTERO O SUBSIDENCIA...?
COSISMICO O POST-SISMICO...?**



Figura 40.- Testigos de posibles levantamientos o subsidencia en línea de costa.

**Figura 41.- ISLAS
CHINCHA NORTE**

*De las tres islas de
Chincha, en una existe
un vigilante que
permanece siempre en
la isla.*

*Indica haber sentido en
terremoto en dos fases,
la segunda la mas
fuerte, pero no reporto
tsunami.*



Figura 42.- No hay daños en las construcciones de madera con 100 años de antigüedad. Esto cerca del epicentro.



No se observo daños o inundación en este edificio ubicado cerca del mar.



A penas se notan fisuras en este relleno de ventanas que fue añadido posterior a la construcción del edificio.



Sitios Turísticos: Reserva de Paracas



Figura 43.- Los acantilados costeros, prefigurados, se erosionan por el efecto de la gravedad y de la aceleración vertical. No se observa desplazamiento y puede ser relacionado con un origen tectónico.

Las mismas observaciones han sido realizadas en las islas Ballestas o Chincha Sur y Centro. Una salida de campo realizada un año antes del terremoto (sismo del 2006 en la misma zona) nos permitió disponer de evidencias para comparar la morfología de la costa antes y después del terremoto y no se noto nada que sugiera procesos de subsidencias o levantamientos.

INSTALACION DE LAS 6 ESTACIONES PERMANENTES

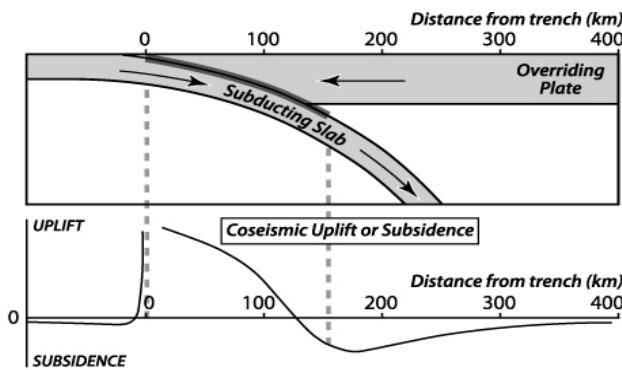


Figura 45.- Mapa de ubicación de las estaciones GPS en el área de estudio.

El monitoreo post sísmico nos debe permitir confirmar la hipótesis de línea de costa = pivot line (ver Figura siguiente de Meltzner et al., 2006 para Sumatra).

CONCLUSIONES

.- Durante la crisis sísmica se ha producido un evento con dos sub eventos , el segundo mas fuerte, con un cierto tiempo de separación entre ellos (~1 minuto) según testimonios.

.- Ocurrencia de dos tipos de tsunamis, el del norte menos fuerte (seguido por otro después de 6 horas) y el del Sur de la Península de Paracas, mas fuerte que produjo la muerte a tres personas.

.- Potencial reactivación de fallas inversas paralelas a la costa (90% de las estructuras fueron identificadas). El sismo de 6.5Mw de Octubre de 2006, habría reactivado algunas fallas normales que funcionan en conjunto.

.- No se ah producido levantamientos al nivel de la línea de costa (observaciones indican variación menores a 40 cm en la marea). No se observo subsidencia en toda la zona recorrida.

.- Muchos de los daños pueden ser relacionados al tipo de suelo (zonas pantanosas), procesos de licuefacción o de mal construcción. Pocas evidencias de tectónica reactivada en la zona.

BIBLIOGRAFIA

Langer C. and W. Spence (1995). *The 1974 Peru earthquake series Bulletin of the Seismological Society of America*; June 1995; v. 85; no. 3; p. 665-687

Hampel, A., *The migration history of the Nazca Ridge along the Peruvian active margin: a re-evaluation, Earth and Planetary Science Letters* , 203, 2, 665-679, 2002.

Swenson, J. L.; Beck, S. L (1999). *Source Characteristics of the 12 November 1996 Mw 7.7 Peru Subduction Zone Earthquake Pure and Applied Geophysics, Volume 154, Issue 3-4, pp. 731-751.*

Informe de la DHN

http://www.dhn.mil.pe/docs/tsunami/Informe_Post_Tsunami_Pisco%202007.pdf

Meltzner, A. J., Sieh, K., Abrams, M., Agnew, D. C., Hudnut, K. W., Avouac, J.-P., and Natawidjaja, D. H., 2006, *Uplift and subsidence associated with the great Aceh-Andaman earthquake of 2004: J. Geophys. Res.*, v. 111, p. doi:10.1029/2005JB003891.

ANEXOS

PREGUNTAS Y RESPUESTAS

Hernando Tavera
Dirección de Sismología

1.- Cual es el origen del terremoto de Pisco..?

Como todos los terremotos con epicentros en el mar, el de Pisco tuvo su origen en el proceso conocido como “subducción”, el mismo que permite que la placa de Nazca se introduzca por debajo de la Sudamericana a una velocidad media de 8-10 cm/año. Sobre la superficie de fricción de ambas placas tienen su origen estos sismos.

2.- Cual fue la magnitud del terremoto y que implicancias tiene la información dada por instituciones internacionales.

Para empezar, debemos saber que existen varias escalas para expresar la magnitud del terremoto. La primera y más conocida internacionalmente es la llamada escala de Richter, aplicable a sismos que ocurren a distancias menores a 1000 km. Para sismos que ocurren a mayor distancia se utiliza las escalas de ondas de volumen (mb), ondas superficiales (Ms) y otra llamada magnitud momento (Mw). En la escala de Richter, el terremoto tuvo una magnitud de 7.0ML (escala local). A distancias telesísmicas, el sismo presentó una magnitud momento de 7.9Mw. Sismos tan grandes como el de Pisco, suelen ser mejor cuantificados utilizando esta última escala. Como es obvio, el NEIC no dispone de datos locales; por lo tanto, al utilizar datos telesísmicos, la magnitud por ellos reportada es la Mw (magnitud momento).

3.- Por que duro tanto el terremoto..?

En cuanto al tiempo de percepción por la población y de su proceso de ruptura, el terremoto de Pisco es el primero del periodo instrumental que ha tenido gran duración. Durante la colisión de placas, el proceso de fricción de las mismas puede realizarse de manera violenta o lenta, lo cual acondiciona la duración del sismo. El terremoto de Pisco presentó un proceso lento de ruptura sobre una área de 170x120 km, con eje mayor paralelo a la línea de costa. Durante este proceso se habrían presentado dos frentes de ruptura que contribuyeron a la gran duración del terremoto.

4.- A que se refieren cuando hablan de directividad en el proceso de ruptura del terremoto..?

El avance logrado por la sismología se debe al mejoramiento en la instrumentación sísmica, y hoy en día se dispone de información sísmica de buena calidad. Del mismo modo, nuevos métodos de estudio han permitido realizar una mejor evaluación de las características del comportamiento del suelo antes, durante y después de ocurrido los terremotos. Esta información ha permitido observar que todos los terremotos con origen en el proceso de fricción de placas, presentan un comportamiento peculiar durante todo el proceso de liberación de su energía. Teóricamente cuando ocurre un terremoto se espera que la energía se irradie de manera radial, pero en la realidad ello depende de las condiciones físicas de las rocas que pueden facilitar los desplazamientos en una dirección con mayor facilidad que en otras. En el caso del terremoto de Pisco, el proceso de ruptura y liberación de la energía sísmica se realizó en dirección SE.

5.- Porque algunos medios de comunicación informaron que el IGP ha minimizado el tamaño del terremoto..?

Sobre este tema ya se explico, el IGP reporta la magnitud del sismo en la escala local ML o Richter (datos de la Red Sísmica Nacional); mientras que, las agencias internacionales al disponer de diferente información sísmica (datos de la red sísmica mundial) reportan la magnitud de ondas de volumen, ondas superficiales o magnitud momento. Todas estas escalas proporcionan valores de magnitud mayores a ML y de ahí viene la confusión. Si el sismo hubiera ocurrido en EEUU, ellos solo podrían reportar la magnitud ML y en este caso, el IGP reportaría la magnitud momento.

6.- Que hay de cierto cuando se dice que se advirtió de la ocurrencia de este terremoto..?

Los investigadores que se dedican al campo de la sismología y al seguimiento de los grandes terremotos ocurridos en el Perú, identificaron en el borde occidental de Perú la presencia de un área de aproximadamente 150 km de largo que no había experimentado ruptura desde hace 290 años. Esta área se encontraba frente a la ciudad de Pisco y se estaba bordeada por los terremotos de 1974 (Lima) por el norte y de 1996 (Nazca) por el sur. En estas condiciones, solo era cuestión de tiempo para que dicha área genere un gran terremoto.

7.- Cuales serían las diferencias y similitudes entre los terremotos de Arequipa y Pisco..?

Ambos terremotos presentaron la misma magnitud, pero el proceso de ruptura del terremoto de Arequipa tuvo una duración de 90 segundos y el de Pisco del orden de 110 segundos. El primero presentó tres frentes de liberación de energía a lo largo de 370 km y el segundo, únicamente dos sobre una superficie de 170 km de longitud. Ambos terremotos evidenciaron la propagación de su energía en dirección SE, teniendo el epicentro del sismo principal en el extremo nor-oeste. La geometría de las áreas de ruptura son diferentes y ello se debe a condiciones geodinámicas netamente locales. En el caso del terremoto de Arequipa, las máximas intensidades se dieron en dirección SE; y para el terremoto de Pisco en dirección NO, quedando aun en investigación el poder explicar esta diferencia.

8.- Cuantas replicas se han producido después del terremoto de Pisco y que información proporcionan para el conocimiento del mismo..?

Se puede decir que todo el proceso de ruptura del terremoto de Pisco, incluyendo replicas, tuvo una duración de 20 días llegándose a registrar aproximadamente 5000 replicas con magnitudes que no sobrepasaron el grado 6.2ML. En general, la distribución espacial de las replicas permitió definir el área total de ruptura, así como identificar aquellas zonas donde se ha producido la mayor liberación de energía.

9.- Porque el movimiento fue percibido en Lima como si fueran dos sismos, el primero menor que el segundo..?

Esto también ya lo hemos comentado. La energía liberada por el terremoto de Pisco fue debida a la presencia de dos frentes de ruptura, ambos separados por 60 segundos. Asumiendo una velocidad de propagación para la ruptura de 2.5 km/seg, el segundo frente se encontraría a una distancia de 150 km del primero. De estas fuentes, la segunda libero mayor cantidad de energía que la primera, de ahí que la población tuvo la sensación que se estaban produciendo dos sismos, cuando en realidad solo era uno que liberaba su energía de manera compleja sobre una superficie muy heterogénea.

10.- Cual fue la intensidad del terremoto de Pisco..?

Se debe tener en cuenta que la intensidad estima el grado de daño producido por el terremoto alrededor de su epicentro y como la energía del mismo disminuye en

función de la distancia. La intensidad máxima del sismo fue evaluada en VII-VIII en la escala de Mercalli Modificada en las ciudades de Pisco y Chincha en donde los daños incluyeron el colapso de viviendas y fenómenos de licuefacción. En Lima ciudad, la intensidad fue del orden de V y en ciudades extremas con Piura y Arequipa, la en la ciudad de Lima y de III en Arequipa.

11.- Este terremoto generó tsunami y de que grado..?

Por su gran magnitud y ubicación epicentral, era de esperarse que el terremoto de Pisco produjera un tsunami que como ya es costumbre, llegaría a la línea de costa frente al epicentro del terremoto en un tiempo de 15 a 20 minutos. Es probable que esta situación se presentase, pero al estar en su mayor parte la costa de Ica casi desierta y sin comunicación, no se informó que dentro del margen de tiempo conocido se había producido un tsunami. El tsunami ocurrió y solo en algunos poblados como Lagunillas produjo daños y muerte de 3 personas, en otros solo daños como es el caso de Tambo de Mora. La máxima altura de la ola evaluada por el Dr. Ronald Woodman fue de 10 metros en la localidad de Lagunillas.

12.- Las luces observadas durante la ocurrencia del terremoto de Pisco tienen alguna explicación científica..?

La gran cantidad de información recopilada de observadores directos o filmaciones en tiempo real, muestra con pruebas que dichas luces estuvieron presentes durante la ocurrencia del sismo de Pisco, pero obviamente, en el caso de terremotos en Perú no se había observado el mismo fenómeno, quizás porque el terremoto de Pisco es el primero, de la sismología instrumental, que ocurre en el preámbulo de la noche. Aun no existe una explicación científica para el origen de dichas luces, pero si muchas hipótesis que tienden a explicar este fenómeno desde el punto de vista geológico, físico y tectónico. Estamos seguros que en próximos meses, algunos investigadores empezaran a escribir sobre este fenómeno y se tendrá mayor explicación de lo que realmente aconteció.

13.- Desde el punto de vista de víctimas y daños, este terremoto es el mas catastrófico ocurrido en el Perú..?

En realidad nadie olvida el terremoto de Mayo de 1970 que produjo, como efecto secundario, un alud que sepulto completamente a la ciudad de Yungay (departamento de Ancachs) produciendo la muerte de mas de 200 mil personas y/o desaparecidas; además de altos niveles de destrucción en poblados distribuidos a lo

largo del valle del Santa. Para del terremoto de Pisco, el número de muertos es menor (500 personas); sin embargo, los daños materiales fueron mayores. En todo caso, el terremoto de Pisco se constituye como el más grande ocurrido en Perú durante la última centuria.

14.- Que actividades ha realizado el IGP para estudiar el terremoto de Pisco..?

En este caso, el IGP disponía de una red sísmica local alrededor del epicentro del sismo, por lo que no fue necesario realizar campañas de intervención sísmica. Sin embargo, a un día de ocurrido el sismo, personal profesional se desplazó a las ciudades afectadas a fin de realizar evaluaciones en situ para conocer el grado de intensidad del terremoto. Grupos aparte trabajaron a lo largo de la línea de costa, desde San Juan de Marcota hasta Lima, para conocer las características del tsunami. La gran cantidad de información disponible ha venido siendo utilizada para el estudio del sismo, llegándose a publicar informes técnicos, boletines y artículos de difusión científica en revistas especializadas. Pronto se estará editando un volumen especial sobre este terremoto que esperamos sirva para comprender mas al peligro al cual estamos sometidos y buscar ser menos vulnerables a estos.

15.- Podría existir una migración de los terremotos. En el 2001 ocurrió el terremoto de Arequipa, luego en el 2007 el terremoto de Pisco, y ahora le tocaría a Lima..?

En realidad grandes sismos como los de Arequipa y Pisco ocurren con periodos de recurrencia mayores a los 100 años, lo cual permitiría asegurar que en estas mismas zonas no ocurrirían por el momento mas sismos, pero si en sus alrededores. La pregunta sería, hace cuanto tiempo que no ocurren grandes sismos frente a Lima..?, y la respuesta lleva a pensar en 33 años (ultimo terremoto en 1974), entonces cuanto mas nos alejamos del ultimo gran sismo, mas cerca estamos del siguiente y cuanto mas tiempo transcurre, se produce mayor acumulación de energía y por ende, el sismo por ocurrir sería de mayor magnitud.

16.- Que se entiende por Lagunas Sísmicas y en que zonas se ubican estas..?

En realidad el concepto de las “Lagunas Sísmicas” es sencillo, permite identificar a las áreas que durante muchos años no han producido grandes sismos, y los que ocurrieron involucraron áreas ubicadas en sus alrededores. De este modo, la energía se habría acumulado en las áreas libres de sismos que al incrementarse,

simplemente produciría uno con las mismas características del último que afectó a dicha área en el pasado. En la actualidad, en el borde occidental del Perú se ha identificado la presencia de áreas de lagunas sísmicas al sur de la Península de Ilo (Moquegua) y llegaría hasta la ciudad de Antofagasta en Chile, abarcando una longitud del orden de 600 km. Del mismo modo, en la región norte de Perú, desde Trujillo (La Libertad) hasta Tumbes, no ocurren terremotos grandes desde el año 1619; por lo tanto, la probabilidad podría ser mayor para esta región. Frente la localidad de Chala (Departamento de Arequipa) existe otra área pequeña (100 km de longitud) que después de los sismos de 1996 (Nazca) y 2001 (Arequipa) no experimentó ruptura. Para la región central del Perú (Lima), la ocurrencia temporal de los terremotos es muy heterogénea, lo cual dificulta el poder identificar posibles periodos de retorno; sin embargo, la presencia de áreas pequeñas de lagunas sísmicas podría ser importantes y generar terremotos de magnitud elevada.

17.- Ocurrirá un nuevo gran sismo en la costa de Ica..?

Por el momento no ocurrirá otro sismo. Debe entenderse que los sismos de magnitud elevada requieren de grandes periodos de acumulación de energía. Según la historia sísmica de esta zona, es posible que en el año de 1716 se haya producido un sismo de las mismas características que el ocurrido en el año 2007, lo cual ayudaría a pensar que se requiere de más o menos 290 años para acumular energía y experimentar otro sismo similar. Pero obviamente, con la naturaleza no se puede esperar que se cumplan las estadísticas o patrones de recurrencia.

18.- Cuales son los factores que nos hacen mas vulnerables ante estos peligros..?

Sobre este tema se ha escrito y discutido mucho, pudiéndose encontrar con facilidad infinidad de estudios y trabajos técnicos; sin embargo, de todos ellos se puede concretizar puntos claves. Por ejemplo, es importante desarrollar y aplicar la "Educación" a todos los niveles para aprender a convivir con este tipo de peligros, mejorar la manera de cómo y donde construir. Realizar estudios sobre la calidad de los suelos antes de autorizar la expansión urbana o en todo caso, para reforzar o mejorar las viviendas ya construidas. Dictar normas que eviten el surgimiento de poblaciones cerca de los ríos, laderas de cerros, suelos inestables y sobre todo la tugurización en áreas pequeñas en condiciones infrahumanas.

19.- De ocurrir un terremoto en Lima ¿Cuál sería la situación del desastre..?

Esta pregunta es difícil de contestar, pero creo toda la población de Lima ha podido conocer por medio de los periodos, emisoras radiales y canales de TV todo lo experimentado por la población de las ciudades de Nazca durante el terremoto de 1996, de Arequipa, Moquegua y Tacna durante el terremoto del 2001 y recientemente, Chincha, Ica y Pisco con el terremoto de 2007. Ahora la pregunta es, cuantas de estas ciudades se parecen a Lima en sus construcciones, en sus tipos de suelo, en sus viviendas tugurizadas o mal construidas, ya sea por el tipo de material utilizado o por su diseño. Si respondemos a estas preguntas, entonces sabremos que va a pasar en Lima si ocurriese un terremoto similar al de Pisco.

20.- Cual ha sido el rol de los medios de comunicación

En realidad es bastante complicado poder calificar y cuantificar la participación de los diversos medios de comunicación durante y después del terremoto de Pisco. Podríamos decir que existió variedad de información, aunque la motivación común fue sobreestimar el tamaño del terremoto y difundir la tragedia de las poblaciones afectadas con imágenes realmente crudas que probablemente estaban orientadas a vender mayor tiraje de periódicos o lograr mayor nivel de sintonía si hablamos de la radio o televisión. Creo que se debe comunicar educando e informando y no generando pánico o zozobra en la población, tarea difícil si los objetivos son meramente comerciales. Considero que no existe conciencia comunicativa, ni respeto por las personas afectadas. Se debería realizar la difusión de información calificada y certera proveniente de fuentes realmente confiables, así no se generaría especulaciones de ningún tipo. Es importante que las universidades puedan brindar a los periodistas estudios de postgrado que les lleve a especializarse en el manejo de este tipo de información, tal como ocurre en Antofagasta (Chile) cuya universidad brinda el grado en la especialidad de "Desastres Naturales" y solo ellos son los autorizados a cubrir la información.

Lima, 15 de Setiembre de 2007

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ÁREAS DE RUPTURA Y LAGUNAS SÍSMICAS EN EL BORDE OESTE DEL PERÚ

HERNANDO TAVERA & ISABEL BERNAL

*Centro Nacional de Datos Geofísicos –Sismología. Instituto Geofísico del Perú
Calatrava 216, La Molina, Lima 12 - E-mail: jtavera@geo.igp.gob.pe*

RESUMEN

La información contenida en el Catálogo Sísmico de Perú ha sido utilizada para analizar y evaluar la distribución espacial de las áreas de ruptura producidas por sismos de gran magnitud ocurridos en el borde Oeste de Perú. La distribución temporal de las áreas de ruptura han permitido visualizar, desde al año 1500, la presencia de diversas lagunas sísmicas de diferentes dimensiones que han dado origen a sismos de gran magnitud en el pasado. Las características espacio-tiempo de las áreas de ruptura y lagunas sísmicas proporcionan herramientas importantes para identificar posibles áreas propensas a ser afectadas por un sismo. En la actualidad, en el borde oeste de Perú se ha identificado la presencia de hasta 3 lagunas sísmicas que en el futuro darían origen a igual número de sismos. Estas lagunas se ubican entre las áreas de ruptura de los sismos de 1974 y 1942/1996 (150 km de longitud); 2001 y 1996 (90 km de longitud); y al Sur del área de ruptura del sismo de 2001 (150 km de longitud). Esta última puede involucrar a la gran laguna sísmica presente en la región Norte de Chile (500 km de longitud).

ABSTRACT

The information contained in Seismic Catalogue of Peru has been utilized to analyze and evaluate the spatial distribution of associated areas of rupture to great earthquakes occurred in the Western border of Peru. The temporary distribution of the rupture areas have permitted to visualize, the presence of diverse seismic gaps of different dimensions which have caused earthquakes of great magnitude in the past from 1500. The space-time characteristic of rupture areas and seismic gaps provide important tools to identify possible areas which be affected by an earthquake. Currently, in the western border of Peru has themselves identifying the presence of 3 seismic gaps which would cause equal number of earthquakes in the future. These gaps are located among the areas of rupture of 1974 and 1942/1996 earthquakes (150 km of length), 2001 and 1996 (90 km of length), and in South direction from the area of rupture of earthquake occurred in 2001 (150 km of length). The last one could be involve a great gap seismic present in the North region of Chile (500 km of length).

INTRODUCCIÓN

Dentro de la Tectónica de Placas, el borde Oeste de Sudamérica se constituye como una de las más importantes fuentes sismogénicas en el mundo debido a la alta velocidad con la cual convergen las placas de Nazca (oceánica) y Sudamérica (continental). Esta velocidad es del orden de 8 cm/año (DeMets et al, 1990; Norabuena et al, 1999). La continua fricción entre dichas placas da origen con mayor frecuencia a los más violentos sismos conocidos en la historia sísmica de Perú y Sudamérica. Por ejemplo, el sismo ocurrido en Mayo de 1960 frente a la ciudad de Concepción, en la región Sur de Chile, con una magnitud de 9.5Mw y que afectó

una longitud máxima de 1000 km. Una consecuencia de este sismo es que dio origen a uno de los tsunamis transoceánicos más dañinos conocidos por la humanidad; además, permitió, por primera vez, que muchos investigadores observaran las oscilaciones propias de la Tierra, sin considerar que su eje de rotación varió ligeramente. En el Perú, es importante el sismo ocurrido en la región Sur en Agosto de 1868 con una magnitud de 9.0Mw y que produjo daños considerables a lo largo de 500 km aproximadamente. Este sismo, también generó un tsunami con olas de orden de 16 metros. Para ambos sismos se estima un periodo de retorno del orden de 100 años.

La ocurrencia de sismos en los bordes de las placas es debido a que el proceso de fricción entre ambas es continuo en el tiempo geológico. Cuando

las fuerzas que movilizan a las placas es mayor al total de las fuerzas que se oponen, entonces el deslizamiento de una de las placas se realizará de manera violenta produciendo un sismo y cuyo tamaño dependerá de la longitud de dicho deslizamiento y de las dimensiones del área afectada. El proceso de fricción entre las placas de Nazca y Sudamericana se realiza a lo largo de toda su superficie de contacto; es decir, sobre una longitud de 5,000 km aproximadamente, pero los deslizamientos que dan origen a los sismos solamente involucran segmentos de longitud menor permitiendo considerar áreas pequeñas de ruptura. En el caso de estas zonas de convergencia, conocidas como «zonas de subducción», las superficies de fricción no son visibles debido a que se encuentran por debajo del nivel medio del mar; sin embargo, sus dimensiones pueden ser estimadas a partir de la distribución de sus réplicas y en caso de sismos históricos, a partir de las áreas de intensidad máxima.

Debe entenderse que debido a la heterogeneidad de la superficie de ambas placas (Nazca y Sudamericana), la distribución espacial de las áreas involucradas en la ruptura no es aleatoria como para producir el avance lineal de las dos placas. Por el contrario, los sismos ocurren de manera indistinta sobre la superficie de fricción, de ahí su peligrosidad al no saber en que parte de toda la superficie se producirá el siguiente sismo. Sin embargo, la distribución espacial de los grandes sismos o de sus áreas de ruptura permite prevenir la presencia de otras áreas con diferentes geometrías que podrían estar comprometidas en producir, en el futuro, un sismo de gran magnitud. Esta particularidad, ha llevado a investigadores como Kelleher (1972), Kelleher et al (1973), Kelleher y McCann (1976), McCann et al (1979), Nishenko (1985), Nishenko, (1991) a proponer y sustentar una teoría observacional a largo plazo para la predicción de sismos, la misma que se basa en evaluar la presencia temporal de las llamadas «lagunas sísmicas». Una laguna sísmica puede ser definida como aquella área en la cual no se ha producido, durante un período determinado de tiempo, un sismo de magnitud elevada y que en la actualidad se encuentra rodeada por otras áreas que sí produjeron sismos. Las dimensiones de las lagunas sísmicas permiten aproximar el tamaño del sismo que se produciría en el futuro, así como las dimensiones del área a ser afectada. La hipótesis de las lagunas sísmicas en su definición moderna fue introducido por Fedotov (1965) y aplicado en la región conocida como Cinturón de Fuego del Pacífico por Sykes (1971), Kelleher et al., (1973), McCann et al., (1979), y Nishenko y Sykes (1993). En general, la hipótesis de la laguna sísmica implica que el peligro de ocurrir un sismo, inmediatamente después de haberse producido otro grande, es mínimo y aumenta con el

pasar del tiempo pudiendo producirse en un nuevo segmento de la falla o límite de placas (WGCEP, 1988).

La hipótesis de las lagunas sísmicas ha tomado mayor relevancia y nuevos grupos de investigación vienen evaluando los trabajos realizados por Nishenko (1989a, 1989b, 1991) utilizando diversos catálogos como base de datos (Catálogo Preliminar de Epicentros del USGS, PDE y el CMT de la Universidad de Harvard) y diferentes escalas de magnitud, además de pruebas estadísticas que consideran el número total de zonas afectadas por un sismo característico y la probabilidad de que alguna de las zonas que podría ser afectada por un sismo, coincida con la probabilidad especificada Nishenko (1989a, 1989b, 1991). En conjunto, las nuevas bases de datos y las pruebas estadísticas realizadas, sustentan una nueva hipótesis definida por Kagan y Jackson (1991, 1994, 1995) como «New Seismic Gap Hipótesis» y que permite re-evaluar la existencia de lagunas sísmicas en todo el Cinturón de Fuego del Pacífico.

En este estudio, se realiza un análisis detallado de la distribución espacial de las áreas de ruptura y lagunas sísmicas presentes en el borde Oeste de Perú a fin de identificar otras con mayor probabilidad de dar origen a un nuevo sismo en el futuro. Para tal fin, se estudia y discute las características de las áreas de ruptura de los sismos ocurridos en el borde Oeste de Perú desde el año 1500 a la fecha y cuya información se encuentra en los catálogos sísmicos del Instituto Geofísico del Perú (Tavera y Agüero, 2001; Agüero y Tavera, 2004).

PRINCIPALES ELEMENTOS TECTÓNICOS

El proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana se realiza acompañada de algunos elementos tectónicos que a su vez han dado origen a la formación de otros que hoy en día, controlan toda la geodinámica del borde Oeste de Sudamérica. Estos elementos son la Dorsal de Nazca, la Fractura de Mendaña, la Fosa Peruano-Chilena, la Cordillera Andina, la Cadena Volcánica y los diferentes Sistemas de Fallas distribuidas en el interior del continente, tal como se muestra en la Figura 1.

La Dorsal de Nazca, es reconocida como una cordillera oceánica de forma asimétrica que se localiza en el extremo NO de la región Sur de Perú con una orientación NE-SO (entre 15° y 24° Sur). El extremo NE de la Dorsal se ubica frente al departamento de Ica a una distancia del orden de 50 km de la línea de fosa, teniendo aquí y sobre la cota de 2000 metros, un ancho de 220 km aproximadamente. El ancho y la altitud de esta cordillera disminuye considerablemente en dirección SO y se considera

que cotas menores ya subducieron bajo la placa continental (Sebrier et al., 1985). Estudios sobre anomalías magnéticas, permiten considerar la hipótesis de que la Dorsal de Nazca debe su origen a una antigua zona de creación de corteza que cesó su actividad hace 5 a 10 millones de años aproximadamente (Marocco, 1980; Sebrier et al, 1985).

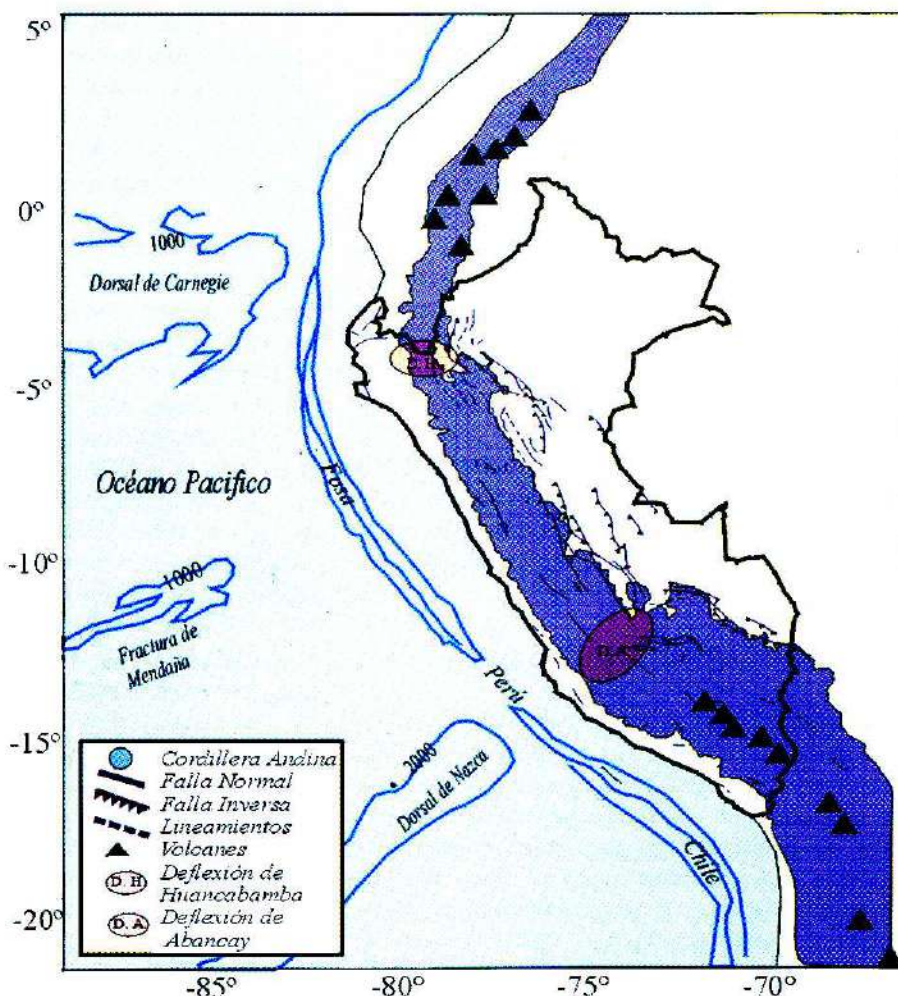
La *Fractura de Mendaña* corresponde a una posible discontinuidad de la corteza oceánica que se localiza en el extremo NO de la región Central de Perú, frente al departamento de Ancash (10° - 12° de latitud Sur). En la actualidad, esta fractura tiene una orientación NE-SO y un ancho de 80 km aproximadamente sobre la cota de 1000 metros y según la Figura 1, la estructura se localizaría a una distancia de 180 km de la línea de fosa. No existe mayor información sobre el origen y otras características de esta estructura.

La *Fosa Perú-Chile* delimita el inicio de la interacción entre la placa de Nazca y la Sudamericana, y esta formada por sedimentos de diferente potencia depositados sobre rocas pre-existentes. Frente al borde Oeste de Perú, la fosa

presenta profundidades máximas de hasta 6000 metros en la región Norte y Sur; mientras que, en la región Centro es del orden de 5000 metros. La orientación de la fosa es en dirección NNO-SSE en la región Norte y Centro, y NO-SE en la región Sur de Perú. El cambio en la orientación de la fosa se produce frente a la Dorsal de Nazca.

La *Cordillera Andina* se distribuye sobre el borde Oeste de la placa sudamericana y tiene una extensión de 7000 km aproximadamente con alturas máximas del orden de 6000 msnm. En Perú, de Norte a Sur, la Cordillera de los Andes esta bien definida y muestra además, la presencia de dos deflexiones importantes: la primera a la altura de 5° Sur llamada deflexión de Huancabamba y la segunda en 14° Sur, conocida como deflexión de Abancay (Figura 1). Estas deflexiones cambian la orientación de la cordillera en dirección NE-SO y Este-Oeste respectivamente. Transversalmente, la Cordillera Andina presenta diversas unidades morfoestructurales (Costa, Cordillera Occidental, Altiplano, Cordillera Oriental y zona Subandina) y anchos que oscilan entre 250 km en la región Norte y Centro de Perú hasta 500 km en región Sur y en los límites entre Perú, Chile y Bolivia (Marocco, 1980; Tavera y Buforn, 1998).

Fig. 1: Principales elementos tectónicos superficiales presentes en continente y en el borde Oeste de Perú. Los triángulos indican la localización de los volcanes y las líneas de color azul, los principales sistemas de fallas según Sebrier et al, (1985)



La *Cadena Volcánica* se ubica en la región Sur de Perú por debajo de la deflexión de Abancay hasta los 25°S en Chile. Esta cadena se distribuye sobre la Cordillera Occidental siguiendo un aparente alineamiento con orientación NO-SE en Perú y N-S en el extremo Norte de Chile. Las características geométricas de cada uno de los volcanes que integran esta cadena, muestran que la actividad tectónica es contemporánea a la orogenia extensional que experimenta la Cordillera Andina cerca del Cuaternario Medio y Reciente (Sebrier et al, 1985). En las regiones Norte y Centro de Perú, la actividad volcánica desapareció hace 8 millones de años aproximadamente (Marocco, 1980).

Los *Sistemas de Fallas* presentes en el Perú, son el resultado del continuo proceso de deformación de la corteza continental, estando presentes en mayor número sobre la zona Subandina de la región Norte y Centro, todas de tipo inverso que evidencian el acortamiento de la corteza. En la Alta Cordillera y sobre la Cordillera Occidental, el número de fallas es menor en número y tamaño, siendo en general de tipo normal y estarían asociados al levantamiento de la corteza.

Dentro de la geodinámica del borde Oeste de Perú, los elementos tectónicos descritos anteriormente parecen controlar las características físicas de los procesos de acumulación de energía y posterior deformación. Por ejemplo, se ha observado que al Norte de la Fractura de Mendaña, la ausencia de sismos de magnitud elevada podría sugerir que el proceso de fricción de placas se realiza de manera asísmica, de ahí que la placa sea más continua por debajo del continente y alcance distancias del orden de 700 km desde la fosa (Tavera y Buforn, 2001). Entre la Fractura de Mendaña y la Dorsal de Nazca, la ocurrencia continua de sismos indicaría mayor fricción y por ende mayor deformación de la placa subducente. Asimismo, la presencia de la Dorsal de Nazca parece controlar la presencia de la deflexión de Abancay y el cambio en el modo de la subducción de la placa. Además, se ha observado que los procesos de ruptura de los sismos que ocurren en la región Sur de Perú tienden a propagarse en dirección Sur-Este. Estas apreciaciones son explicadas a continuación.

CARACTERÍSTICAS DE LA SISMICIDAD

Para analizar las características de la distribución espacial de la sismicidad que se produce en el Perú, es importante considerar a los grandes sismos que se han producido en el pasado, ya que solo de esa manera es posible intentar realizar estudios estadísticos que permitan tener un idea sobre la recurrencia de los sismos de gran magnitud. Según la recopilación hecha por Silgado (1978) y Dorbath et

al (1990), la mayoría de los sismos históricos para los cuales existe información se han producido frente al borde Oeste de Perú, esto debido a que en la costa se encontraban ubicadas las ciudades más importantes desde el punto de vista político. Así, el sismo más antiguo para el cual se dispone de información confiable data del año 1513, con epicentro probable frente a la línea de costa del departamento de Arequipa. Entre los sismos más importantes se puede mencionar los ocurridos en 1619 y 1953 que afectaron a los departamentos de La Libertad, Lambayeque y Piura con intensidades del orden de VIII (MM). En la región Central sobresalen los sismos ocurridos en 1586 (IX MM), 1687 (VIII MM) y 1746 (X MM) que destruyeron casi completamente a la ciudad de Lima. Este último produjo un tsunami con olas de 15-20 metros de altura que inundó totalmente al puerto del Callao. En la región Sur, ocurrieron terremotos importantes en 1604 (IX MM), 1784 (X MM) y 1868 (X MM) que produjeron daños considerables principalmente a las ciudades de Arequipa, Moquegua, Tacna, Puno y Norte de Chile. El sismo de 1868 habría producido una longitud de ruptura del orden de 500 km y un tsunami con olas del orden de 16 metros de altura. Para la mayoría de estos sismos, algunos autores como Silgado (1978), Comte y Pardo (1991) y Dorbath et al, (1990) les atribuyen periodos medios de retorno del orden de 100-130 años.

La sismicidad instrumental data de 1960 aproximadamente y sus características han permitido realizar los primeros análisis y evaluaciones de la sismicidad que ocurre en Perú y así, identificar la presencia de fuentes sismogénicas, tanto en superficie como en profundidad (Barazangi y Isacks, 1979; Hasegawa y Sacks, 1981; Grange, 1984; Schneider y Sacks, 1987; Rodríguez y Tavera, 1991; Cahill y Isacks, 1992; Tavera y Buforn, 1998; Bernal, 2002). Estudios recientes realizados por Cahill y Isacks (1992), Tavera y Buforn (2001), Bernal et al (2001) y Bernal (2002), han permitido concluir que la distribución espacial de los sismos en el Perú es por demás compleja; sin embargo, es posible identificar la presencia de diferentes fuentes sismogénicas. En la Figura 2 se presenta la sismicidad ocurrida en Perú entre los años 1960 y 2002 con sismos cuyas magnitudes son mayores a 4.5mb, y en ella se observa que los sismos con foco superficial ($h > 60$ km) se distribuyen principalmente frente a la línea de costa, siendo en número, tamaño y frecuencia mucho mayor que los sismos que se producen a los mismos niveles de profundidad en el interior del continente (Figura 2a). Esta sismicidad esta asociada al proceso de fricción de placas y se constituye como la principal fuente sísmica presente en el Perú ya que dio origen a los más grandes sismos para los cuales se cuenta con información histórica y actual. En la Figura 2b, se muestra la distribución de los sismos con foco intermedio ($60 > h \leq 300$ km), los mismos que se pueden

agrupar en tres fuentes, una paralela a la línea de costa por debajo de los 9° Sur, otra en la zona Subandina de la región Norte y Centro, y la tercera sobre toda la región Sur, siendo esta última la que considera a un mayor número de sismos. Los sismos con foco profundo ($h > 300$ km) son parte de dos fuentes, la primera se encuentra en el límite de Perú con Brasil y la segunda entre Perú y Bolivia (Figura 2b).

La distribución en profundidad de los sismos con foco superficial ubicados entre la fosa y la línea de costa, más los de foco intermedio permiten configurar la superficie de fricción entre las placas de Nazca y Sudamericana, así como la geometría de la primera por debajo del continente (Grange et al, 1984; Schneider y Sacks, 1987; Rodríguez y Tavera, 1991; Cahill y Isacks, 1992). Estudios realizados por Tavera y Buforn (2001), y Bernal et al (2002) han permitido tener una idea general de la forma de la placa de Nazca dentro del proceso de subducción, tal como se muestra en la Figura 3. En dicha figura se observa que la placa subduce, de norte a sur, con un ángulo medio de 30° hasta una profundidad del orden de 100-120 km a partir de la cual, en la región Norte y Centro continúa de manera casi horizontal hasta distancias de 700 km desde la línea de fosa. Contrariamente, en la región Sur el ángulo de inclinación de la placa es continuo hasta una profundidad de 300 km. Obsérvese que a la altura de la latitud de 15°

aproximadamente, se estaría produciendo la contorsión de la placa para pasar de un proceso de subducción casi horizontal a otro continuo denominado comúnmente como «normal». Estos dos modos de subducción de la placa, junto a la presencia de la Dorsal de Nazca y de la Fractura de Mendaña parecen ser importantes al momento de producirse un sismo ya que controlan las características físicas de los diferentes procesos de ruptura. Por ejemplo, en la región central de Perú y entre la Dorsal de Nazca y la Fractura de Mendaña, en los últimos 100 años se ha producido hasta 7 sismos con magnitudes M_w mayores a 7.0 (1940, 1942, 1966, 1970, 1974, Febrero y Noviembre de 1996); mientras que, en la región Sur después de 133 años solamente se ha producido el sismo del año 2001 (8.2 M_w). Para la región Norte únicamente se podría considerar el sismo ocurrido frente al departamento de Tumbes en el año 1970 (7.2 M_w). En estas condiciones, se considera que en la región Central el acoplamiento de las placas es máximo, en la región Sur se produciría un acoplamiento medio y en la región Norte, sería casi nulo. Otra característica importante, es que en la región Sur los procesos de ruptura de los grandes sismos tienden a propagarse en dirección SE involucrando superficies más lineales sobre las cuales los daños y efectos son mayores. En la región Central, las áreas de ruptura y de daños en superficie son menores en tamaño.

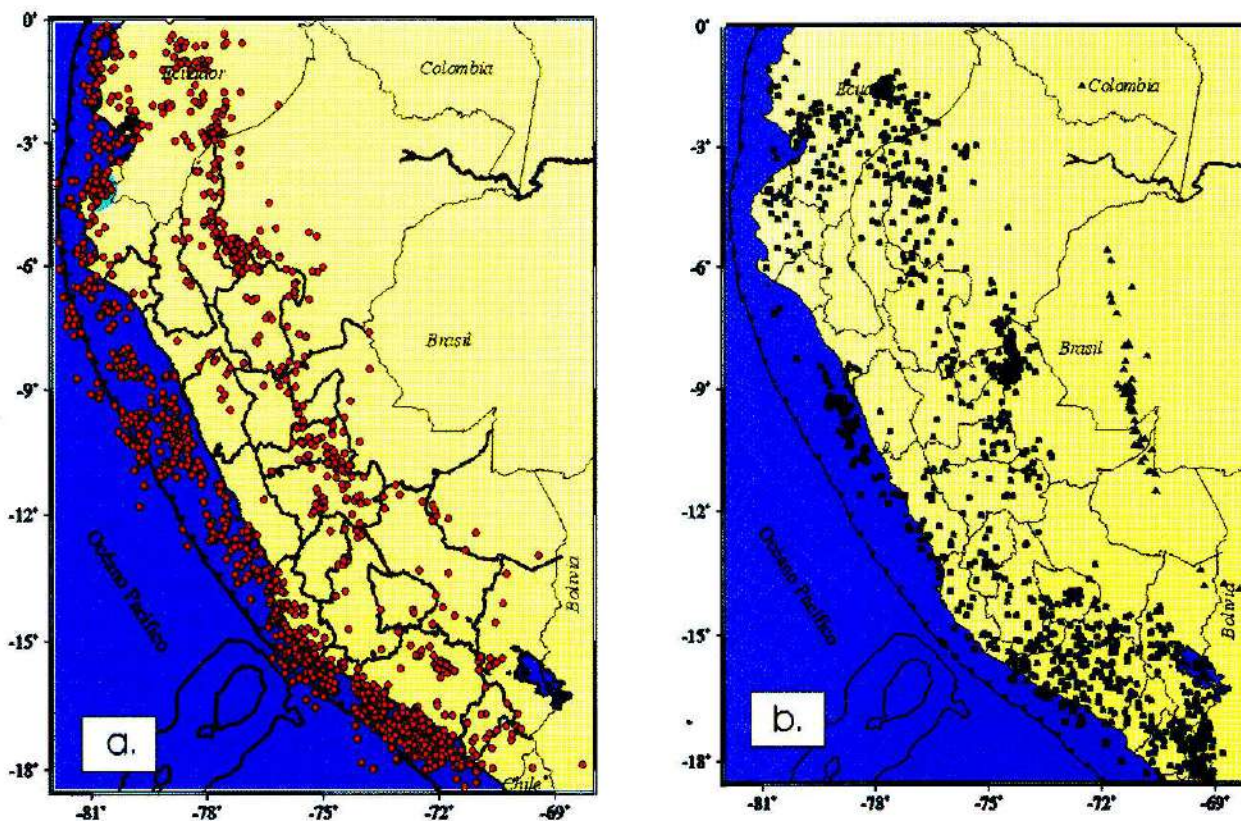


Fig. 2: Distribución espacial de los sismos con foco superficial (círculos rojos), intermedio (cuadrados verdes) y profundos (triángulos azules) ocurridos en Perú entre 1960 y 2002 ($m_b > 4.5$) según los catálogos de Engdahl et al, (1997) y IGP (2002)

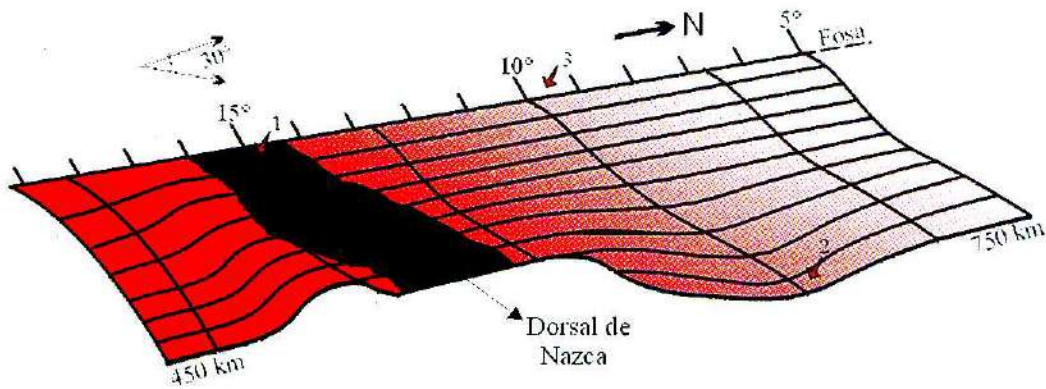


Fig. 3: Esquema 3D para la geometría de la placa de Nazca bajo la Sudamericana frente al borde oeste de Perú. Los números del 1 al 3 indican las áreas de mayor deformación debido a la mayor ocurrencia de sismos, ver Figura 2

DISTRIBUCIÓN DE LAS ÁREAS DE RUPTURA Y LAGUNA SÍSMICAS

La ocurrencia continua de sismos de gran magnitud frente al borde Oeste de Perú, ha permitido a través de la historia evaluar el real potencial de esta principal fuente sismogénica. Lamentablemente, en los diferentes catálogos sísmicos del Perú solo se encuentra información a partir del año 1500, no siendo la base de datos suficiente como para intentar realizar estudios estadísticos que permitan obtener resultados con un alto grado de confiabilidad. Sin embargo, desde el punto de vista observacional es posible identificar diversas áreas en las cuales existiría la probabilidad de que ocurra un sismo en el futuro, siendo las áreas conocidas como «lagunas sísmicas». Estas áreas están rodeadas de otras en las cuales ya ocurrieron sismos importantes, lo cual permite afirmar que la energía liberada por estos sismos se habría acumulado en dichas áreas. En estas condiciones, resultaría fácil en cierto modo, identificar en el tiempo la presencia de lagunas sísmicas en función de la distribución de las áreas de ruptura asociados a sismos de gran magnitud.

En la Tabla 1 se presenta los parámetros hipocentrales y valores de magnitud e intensidad de los sismos más importantes ocurridos en el borde Oeste de Perú desde el año 1500. Según la fecha de ocurrencia de estos sismos, podría aceptarse periodos de recurrencia que oscilan entre 50 y 150 años. En la Figura 4 se presenta 6 periodos de tiempo en los cuales se han producido sismos importantes con intensidades mayores a VIII en la escala de Mercalli Modificada. La primera figura corresponde al periodo 1500 y 1650, tiempo durante el cual se produjeron hasta 3 sismos y entre cada área de ruptura, se observa la presencia de lagunas sísmicas

con diferentes tamaños y ubicadas frente a los departamentos de Ancash, Ica y extremo Norte y Sur de Arequipa. Las longitudes mayores de estas áreas de ruptura oscilan entre 100 y 450 km. Seguidamente, durante el periodo comprendido entre los años 1651 y 1700, se produce un sismo frente al departamento de Ancash, otro frente a Ica y uno pequeño pero importante, frente a Tacna. Obsérvese que estos sismos ocurrieron en las áreas reconocidas en el periodo anterior como lagunas sísmicas. Del mismo modo, durante el periodo 1701 y 1800, se producen 2 de los más grandes sismos conocidos en el Perú, ambos produjeron tsunamis con olas que alcanzaron alturas del orden de 17 metros. En el caso de la región Central, el sismo de 1746 involucra una superficie cuya longitud máxima es de 350 km y abarca la pequeña laguna sísmica identificada en el periodo anterior frente al departamento de Lima. Para la región Sur, el sismo de 1784 prácticamente cubre toda el área de la laguna sísmica. Durante el periodo 1801 y 1850, solo se produce un sismo en la región Sur, estando el resto del borde Oeste de Perú en situación de acumulación de energía. En el periodo 1851 y 1900, en la misma región sur y después de 84 años se produce nuevamente un gran sismo, el más grande para el cual se cuenta con información detallada (longitud de ruptura del orden de 500 km). Este sismo produjo tsunamis con olas del orden de hasta 16 metros de altura en Tacna y Arica en Chile. El sismo de 1833 puede ser considerado como un precursor de este último. Es necesario mencionar que durante 194 años, en la región Central no ocurrió ningún sismo importante, al igual que en la región Norte en la que no ocurre un sismo desde 1619. Durante el siglo XIX, prácticamente todos los sismos se producen en la región Central (7 sismos) y solamente uno en el extremo norte de la región Sur (1913), pudiendo ser

toda la región Norte y Sur reconocida como lagunas sísmicas.

Este simple análisis espacial de las áreas de ruptura ha permitido observar que los grandes sismos son repetitivos en el tiempo, ya que las áreas que en algún momento liberaron energía, vuelven a pasar por un periodo de acumulación de la misma para dar origen a otro sismo en el futuro. Es obvio suponer que el tamaño de estos sismos dependerá del periodo de acumulación de dicha energía y de las dimensiones del área involucrada en la ruptura o de la laguna sísmica. A priori, este tipo de análisis permite reafirmar que las regiones Centro y Sur de Perú, son las de mayor potencial sísmico en razón de que en ambas los sismos parecen repetirse con periodos de tiempo comprendidos entre 50 y 150 años. Contrariamente, es posible que en la región Norte sea necesario periodos de acumulación de energía mayores a 500 años para que se produzca un gran sismo.

Similar análisis puede hacerse con ayuda de la Figura 5. Aquí, los sismos han sido representados en función de su longitud de ruptura y por su ubicación en latitud vs periodo de ocurrencia. En dicha figura puede observarse claramente el diferente potencial sísmico de cada región. Por ejemplo, durante todo el periodo de estudio, en la región Norte solamente se tiene información sobre la ocurrencia del sismo de 1619, para luego mantenerse toda la región en

silencio sísmico hasta el presente. En la región Central, se observa la ocurrencia continua de hasta 3 sismos entre 1678 y 1746, para luego aparecer un periodo de silencio sísmico del orden de 194 años que se rompe con la ocurrencia de 7 sismos hasta el año 1996, a partir del cual volvería a iniciarse el periodo de acumulación de energía o de silencio sísmico. Contrariamente, en la región Sur, pareciera que los grandes sismos estuvieran precedidos por otros de menor tamaño. Así, antes del sismo de 1604 (450 km de longitud de ruptura) ocurre otro menor en 1582; antes del sismo de 1868 (500 km de longitud de ruptura) se produce otro en 1784 también de menor tamaño y finalmente, en el año 2001 se produce otro sismo pequeño que puede ser el precursor de uno mucho mayor. Obviamente, es difícil el poder precisar el periodo más probable o la fecha de ocurrencia del próximo sismo. En esta figura, también puede observarse que existen periodos en los cuales se producen sismos en la región Sur y otros en los cuales la ocurrencia es nula, siendo esta distribución contraria a la que se observa en la región Central.

Si se considera el análisis de la ocurrencia de sismos en el borde Oeste de Perú y Chile para los siglos XIX, XX y XXI (Figura 6), puede observarse que en el siglo XIX los más grandes sismos ocurrieron en la región Sur de Perú (1868) y Norte de Chile (1877), ambos con magnitudes M_w de 9.0. Hacia el norte y sur de ambas áreas de ruptura es notoria la ausencia

TABLA 1

Parámetros hipocentrales de los grandes sismos ocurridos en el borde Oeste de Perú desde al año 1500, según Silgado (1978) y Dorbath et al (1990)

Fecha dd:mm:aa	Latitud (S°)	Longitud (W°)	Prof. (km)	Magnitud M_w	Lr (km)
22:01:1582	16.6	71.6		7.5	80
10:07:1586	12.1	72.0		8.1	175
24:11:1604	17.0	70.9		8.4-8.7	450
14:02:1619	7.9	79.0		7.8-8.0	100-150
12:05:1664	14.1	75.8		7.5	75
16:06:1678	12.3	77.8		8.0	100-150
20:10:1687	13.2	76.5		8.2-8.4	300
21:10:1687	16.4	71.6		8.0	150
23:08:1715	17.3	70.8		7.5	75
07:01:1725	9.2	79.3		7.5	75
29:10:1746	11.9	77.1		8.5-8.6	350
13:05:1784	16.5	72.0		8.0	300
18:09:1833	18.2	71.0		7.7	50-100
13:08:1868	18.2	70.5	25	9.0	500
24:05:1940	11.2	77.7	50	8.1-8.2	180
24:08:1942	15.5	74.7	33	8.2	200
17:10:1966	10.3	78.6	37	7.7-8.1	100
31:05:1970	9.2	78.8	42	7.9	130
03:10:1974	12.2	77.5	21	7.9-8.1	140
12:11:1996	15.3	76.4	18	7.7	150
23:06:2001	16.2	73.7	29	8.2	350

Lr = Longitud de ruptura M_w = Magnitud momento

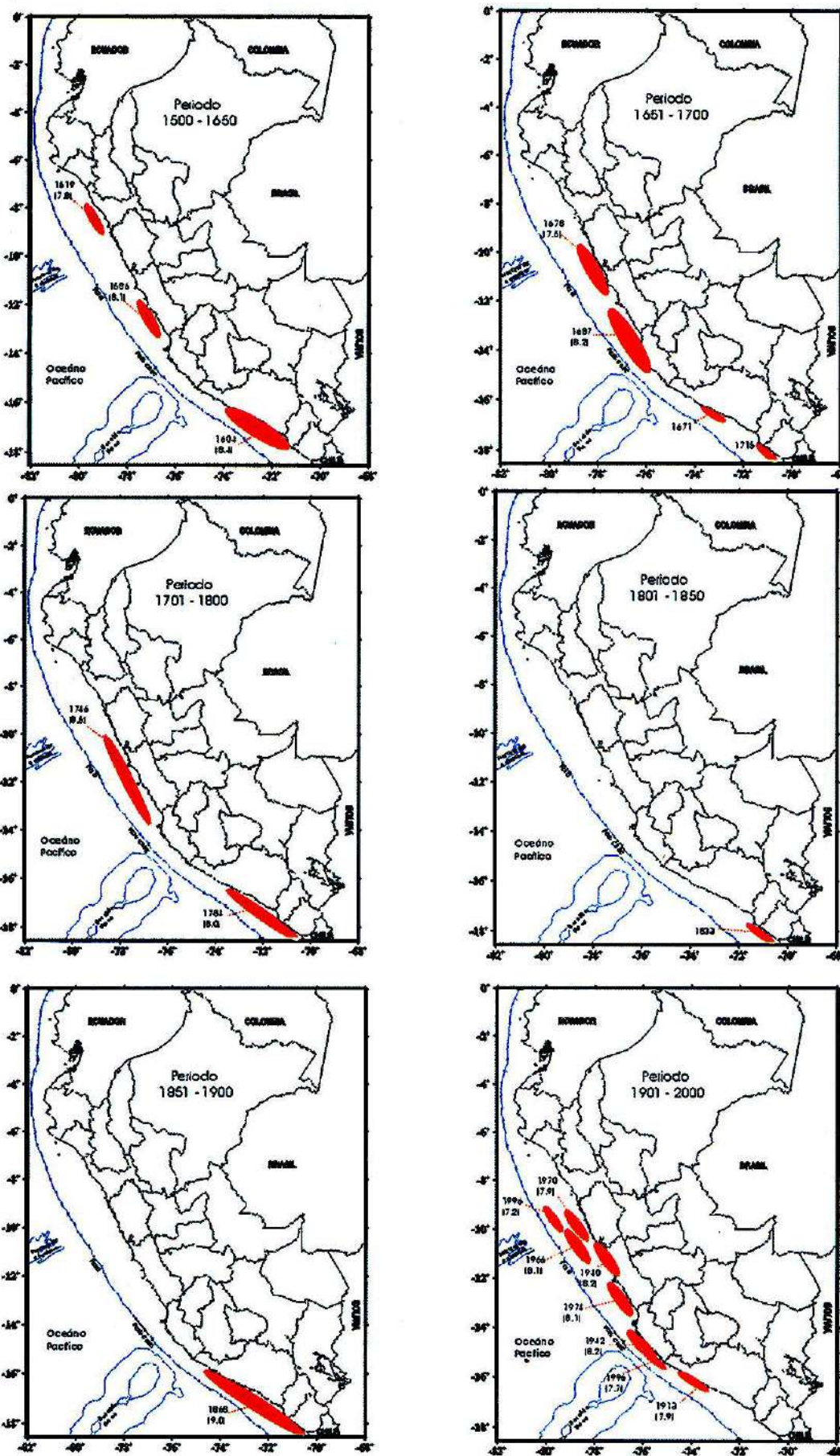


Fig. 4: Distribución espacial de las áreas de ruptura asociados a los sismos de mayor magnitud e intensidad ocurridos en el borde Oeste de Perú a partir del año 1500

total de sismos. Durante el siglo XX, todos los sismos ocurrieron al norte y sur de las áreas involucradas con los sismos de 1868 y 1877, sobresaliendo el gran sismo de Chile de 1960, quizás el más grande para el cual se tiene información sísmica instrumental (magnitud M_w de 9.5). También, es notoria la presencia de una importante laguna sísmica en la región Norte de Perú; mientras que, en el presente siglo solamente se ha producido un sismo en el año 2001 y por sus características y longitud de ruptura (Tavera et al, 2002; Giovanni et al, 2002), se espera que ocurra un sismo de mayor tamaño en esta región o en todo caso, en la región Norte de Chile a fin de cubrir en su totalidad el área de ruptura de las renombradas lagunas sísmicas correspondientes a los sismos de 1868 y 1877.

Para la región Sur de Perú, Giovanni et al (2001), realiza un análisis subjetivo basado únicamente en las áreas de intensidad máxima producidos por los sismos de 1604, 1784, 1868 y 2001. En la Figura 7 se observa que la intensidad máxima estimada para el sismo de 1604 es de IX-X (MM) y considera un área que abarca parte de los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna. Posteriormente y luego de 180 años, esta misma área es afectada con intensidades de VIII producidas por el sismo de 1784. Del mismo modo y después de 84 años, el área es afectada nuevamente con intensidades de IX-X (MM) y en este caso son producidas por el gran sismo de 1868. Transcurridos

133 años, la misma área es otra vez afectada con intensidades de VIII debido a la ocurrencia de un sismo en el año 2001. Según esta simple representación, dicha área debería ser nuevamente afectada por un sismo capaz de producir intensidades de IX-X (MM), similar a los anteriores grandes sismos ocurridos en esta misma región.

Un análisis más detallado para ambas regiones puede hacerse utilizando la Figura 8. Esta figura considera las áreas de ruptura de los sismos ocurridos en Perú en 1942, 1974, 1996 y 2001, y el ocurrido en Chile en 1995. Por todo lo discutido anteriormente, es necesario aceptar que las regiones Sur de Perú y Norte de Chile han sido reconocidas como eminentes lagunas sísmicas que deben dar origen a sismos con características y tamaños similares a los ocurridos en 1868 y 1877. El interés fue mayor cuando en los años 1995 y 1996, se produjeron 2 sismos con epicentros ubicados en ambos extremos de las áreas de ruptura de los sismos de 1868 y 1877. También fue notorio el incremento de sismos con foco intermedio ($61 < h \leq 300$ km) al frente de las áreas de ruptura de estos sismos. Se debe considerar que la deformación de la placa de Nazca, por debajo de la superficie de fricción, es causada por la fuerza de la gravedad que tira de la placa hacia el interior del manto tratando de vencer la resistencia que ofrecen las placas al desplazamiento sobre su superficie de fricción, la misma que al ser superada produciría un sismo a niveles superficiales. En tales condiciones,

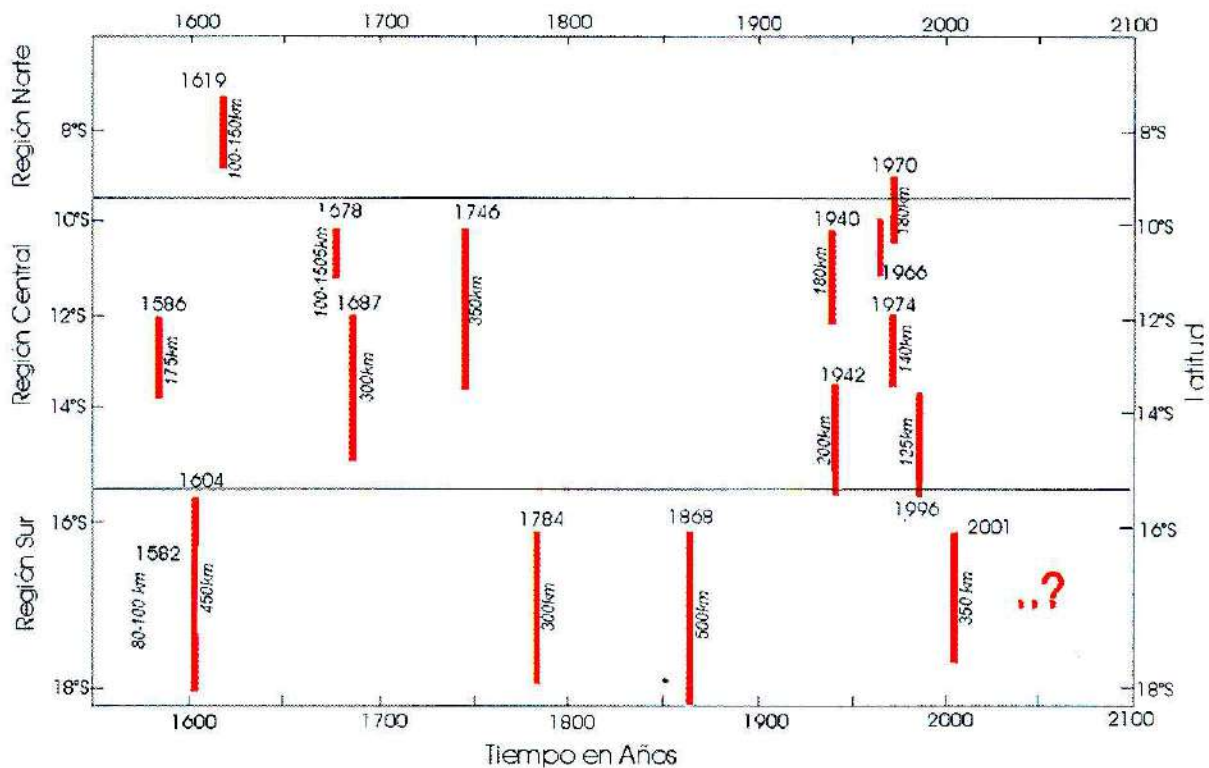


Fig. 5: Grandes sismos ocurridos en el borde Oeste de Perú en función de su ubicación en latitud, fecha de ocurrencia y longitud de ruptura (modificado de Dorbath et al, 1990)

todo hacia suponer que pronto debería producirse un gran sismo en cualquiera de estas regiones. El 23 de Junio de 2001, la región Sur de Perú fue afectada por un sismo de gran magnitud que causo importantes daños materiales y/o personales, siendo inicialmente catalogado como el sismo repetitivo del ocurrido en 1868. Estudios posteriores, dieron como resultado que la magnitud de este sismo (8.2Mw) fue mucho menor que el de 1868 (9.0Mw). Se debe considerar que los daños observados en la ciudad de Arequipa y departamentos de Moquegua y Tacna no sobrepasaron el grado VIII en la escala MM, en comparación con el grado IX-X evaluado para el sismo de 1868. Tal como se observa en la Figura 8, la longitud de ruptura producida por el sismo de 2001 fue estimado en 350 km; es decir, 150 km menos que la producida por el sismo de 1868. De acuerdo a la propagación unilateral de la ruptura del sismo de 2001 (en dirección SE), toda la energía liberada por el sismo se habría acumulado al sur de la localidad de Ilo (Moquegua) marcando así el inicio de la nueva laguna sísmica.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis y la evaluación de las áreas de ruptura de los grandes sismos ocurridos en el borde Oeste de Perú, ha permitido aceptar que dicho borde

de convergencia de placas, es uno de los mayores en cuanto a su potencial sísmico se refiere. Sin embargo, a la pregunta *¿...dónde y cuándo se producirá el próximo sismo...?* aún no es posible dar respuesta debido a que los métodos hasta hoy desarrollados para la predicción de sismos requieren conocer en detalle todo el proceso que antecede a la ocurrencia de los mismos, conocimiento que aún se sigue buscando. En la actualidad, se continua en la investigación, desarrollo y aplicación de diversos métodos geofísicos a fin de poder contar con la mayor cantidad de información sobre las propiedades físicas, geológicas y tectónicas de las regiones propensas a ser afectadas por un sismo. No se debe olvidar que el intentar predecir la ocurrencia de un sismo implica conocer los siguientes parámetros: *Predicción = Lugar + Tamaño + Fecha*. Con todo lo expuesto en este estudio, se puede llegar a la conclusión de que se conoce las ubicación de las áreas potencialmente sísmicas; además, su historia sísmica permite estimar el tamaño de los futuros sismos que en ella pudiera ocurrir; sin embargo, solo la fecha en que se produciría el sismo no puede ser determinada con exactitud. En general, los grandes sismos pueden tener periodos de recurrencia de muchos años y su tamaño suele ser proporcional al periodo de acumulación de energía y a las dimensiones del área comprometida en la futura ruptura.

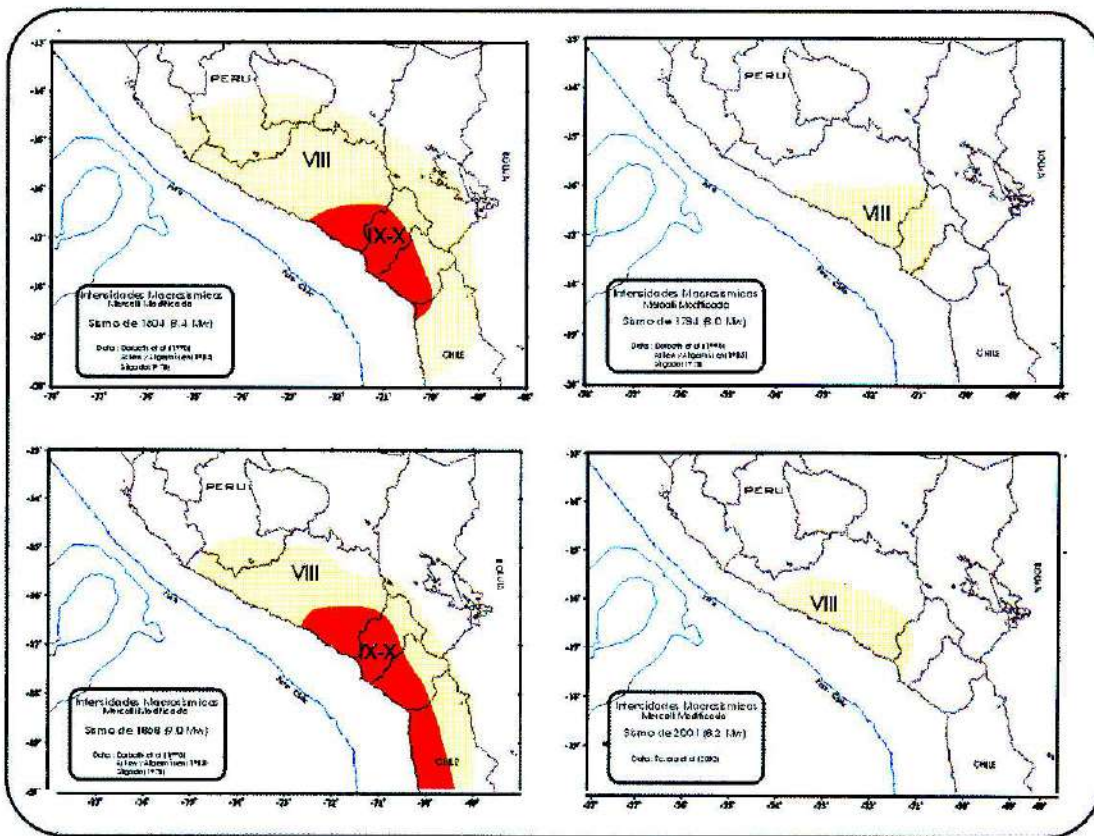


Fig. 7: Áreas de intensidad máxima en la escala Mercalli Modificada para los sismos ocurridos en 1604, 1784, 1868 y 2001 (Giovanni et al, 2001)

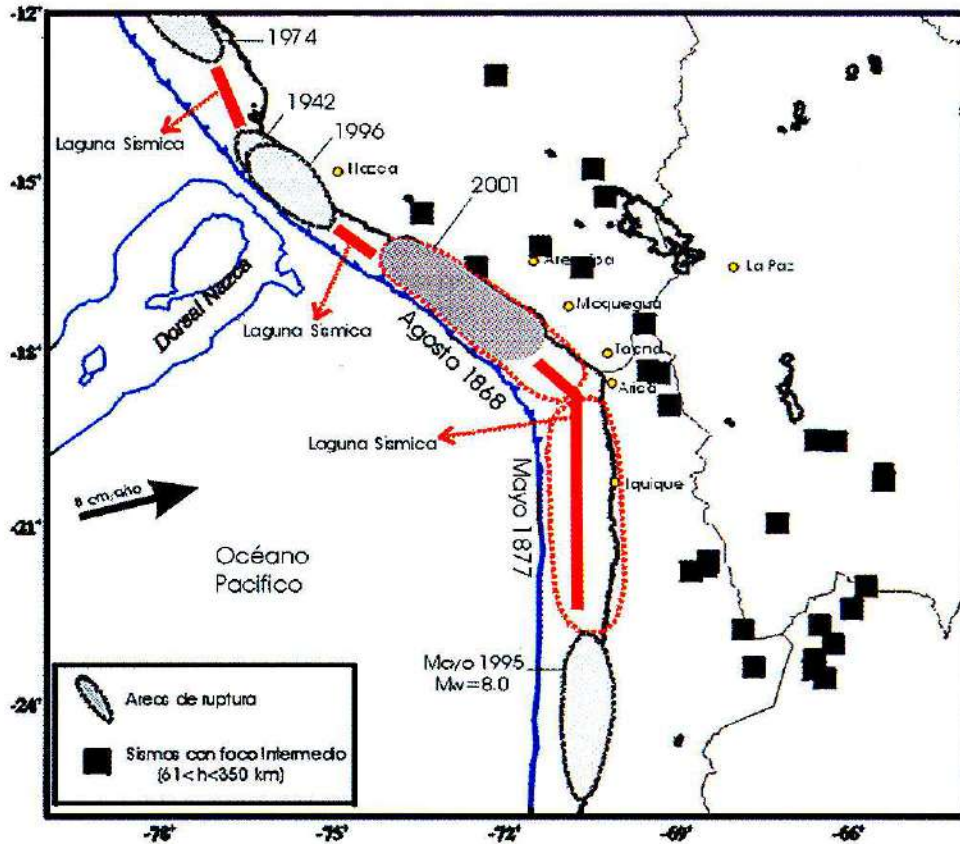


Fig. 8: Distribución de las áreas de ruptura de grandes sismos asociados al proceso de subducción y ocurridos en la región Sur de Perú y Norte de Chile durante los siglos XIX, XX y XXI. Las superficies sombreadas corresponden a las áreas de ruptura y las barras en rojo, a las lagunas sísmicas. Las áreas encerradas con interlineado corresponden a los sismos de 1868 y 1877.

La base de datos del Catálogo Sísmico ha permitido evaluar la presencia aleatoria, en el borde Oeste de Perú, de diversas áreas de ruptura y otras de lagunas sísmicas desde el año 1500 a la fecha. En la actualidad, las áreas más relevantes o comprometidas con la posible ocurrencia de un sismo en el futuro son (Figura 8): área de 150 km de longitud ubicada al sur del departamento de Lima y norte de Ica, y entre las áreas de ruptura de los sismos de 1974 y 1942/1996; área de 90 km de longitud ubicada al sur del departamento de Ica y entre las áreas de ruptura de los sismos de 1942/1996 y 2001; área de 150 km de longitud ubicada frente a los departamentos de Moquegua y Tacna, y entre las áreas de ruptura de los sismos de 2001 y 1877 (Chile). Para la región Norte de Chile, el área con mayor probabilidad para dar origen a un gran sismo esta ubicada entre las ciudades de Arica y Antofagasta con una longitud de 500 km.

Ahora, la pregunta final que resta por hacer es ¿...y ahora que sabemos donde ocurrirá un gran sismo en el futuro, qué hacemos...?. La respuesta es educación y preparación en todos los niveles a fin de no ser afectados o no sufrir daños de consideración. Ambas tareas pueden ser resumidas en una sola palabra, *Prevención*.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ing. José Arce Helberg por su cordial invitación para desarrollar el presente estudio, así como permitirnos ser partícipes del Volumen Especial editado por la Sociedad Geológica del Perú en Homenaje al Ing. Alberto Giesecke Matto. Asimismo, nuestro agradecimiento al Dr. Edgar Kausel por su revisión y comentarios al presente trabajo. Contribución N°020-CNDG-IGP/2004.

BIBLIOGRAFÍA

AGÜERO C. & H. TAVERA (2004).- Catálogo de Mapas de Isosistas de Sismos ocurridos en Perú desde el año 1500. *CNDG-Sismología, Instituto Geofísico del Perú*, en preparación.

ASKEW B. & T. ALGERMISSEN (1985).- Catalog of earthquakes for South America: Hypocenter and Intensity data. Vol 4,6,7(a,b,c). *Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS)*, Lima-Perú.

BARAZANGI M. & B. ISACKS (1979).- Subduction of the Nazca plate beneath Peru: evidence from spatial

distribution of earthquakes. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 57, 537-555.

BERNAL I. (2002).- Aproximación a un modelo detallado de la sismicidad en el Perú: Características y evaluación de la energía sísmica liberada. *Tesis de Ingeniería UNSA*, 170 pag.

BERNAL I., H. TAVERA & Y. ANTAYHUA (2001).- Evaluación de la sismicidad y distribución de la energía sísmica en el Perú. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 92, 67-78.

CAHILL T. & B. ISACKS (1992).- Seismicity and shape of the subducted Nazca plate. *J. Geophys. Res.*, 97, 17503-17529.

COMTE D. & M. PARDO (1991).- Reappraisal of great historical earthquakes in the northern Chile and southern Peru seismic gaps. *Natural Hazards*, 4, 23-44.

DEMETS C., R. GORDON, A. AARGUS & S. STEIN (1990).- Current plate motions. *Geophys. J. Int.*, 101, 425-478.

DORBATH L., A. CISTERNAS & C. DORBATH (1990).- Assessment of the size of large and great historical earthquake in Peru. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80, 551-576.

ENGDAHL R., E. VANDERHILST & R. BULLAND (1997).- Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 88, 722-743.

FETODOV S. (1965).- Regularities of the distribution of strong earthquakes in Kamchatka, the Kurile Islands and north-eastern Japan. *Tr. Inst. Fis. Zemli. Akad. Nauk SSSR*, 36, 66-93.

GIOVANNI M., S. BECK & L. WAGNER (2002).- The June 23, 2001 Peru earthquake and southern Peru subduction zone. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 14:1-14:4.

GRANGE F., D. HATZFELD, D. CUNNINGHAM, P. ROECKER & G. SUAREZ (1984).- Tectonics implications of the microearthquake seismicity and fault plane solutions in southern Peru. *J. Geophys. Res.*, 89, 6139-6152.

HASEGAWA A. & S. SACKS (1981).- Subduction of the Nazca beneath Peru as determined from seismic observation. *J. Geophys. Res.*, 86, 4971-1980.

IGP (2002).- Catálogo Sísmico Preliminar para el periodo 1985-2002. *CNDG-Sismología, Instituto Geofísico del Perú*.

KAGAN Y. & D. JACKSON (1991).- Seismic gap hypothesis: Ten years after. *J. Geophys. Res.*, 96, 21419-21431.

KAGAN Y. & D. JACKSON (1994).- Long-term probabilistic forecasting of earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 99, 13685-13700.

KAGAN Y. & D. JACKSON (1995).- New seismic gap hypothesis: Five years after. *J. Geophys. Res.*, 100, 3943-3959.

KELLEHER J. (1972).- Rupture zones of large South American earthquakes and some predictions. *J. Geophys. Res.*, 77, 2087-2103.

KELLEHER J., L. SYKES & J. OLIVER (1973).- Possible criteria for predicting earthquake locations and their applications to major plate boundaries of the Pacific and Caribbean. *J. Geophys. Res.*, 78, 2547-2585.

KELLEHER J. & W. MCCANN (1976).- Buoyant zones, great earthquakes and unstable boundaries of subduction. *J. Geophys. Res.* 81, 4885-4908.

MAROCCO R. (1980).- Geologie des Andes peruvienne: un segment E-W de la chaîne des Andes peruvienne, la deflexión d'Abancay. Etude géologique de la Cordillere Orientale et des Hauts Plateaux entre Cuzco et San Miguel. Sud d'Peru. Doc. *ORSTOM*, 94 pag.

MCCANN W., S. NISHENKO, L. SYKES & J. KRAUSE (1979).- Seismic gaps and plate tectonics: seismic potential for major boundaries. *Pageoph*, 117, 1082-1147.

NISHENKO S. (1985).- Seismic potential for large and great interplate earthquakes along the Chilean and Southern Peruvian margin of South America: a quantitative reappraisal. *J. Geophys. Res.*, 90, 3589-3615.

NISHENKO S. (1989a).- Circum-Pacific seismic potential 1989-1999. *U.S. Geol. Surv. Open File Rep.* 89-85, 118 pp.

NISHENKO S. (1989b).- Circum-Pacific seismic potential 1989-1999. *U.S. Geol. Surv. Open File Rep.* 89-86, 120 pp.

NISHENKO S. (1999).- Circum-Pacific seismic potential 1989-1999. *Pure Appl. Geophys.*, 135, 169-259.

NISHENKO S. (1991).- Aspects of Pacific seismicity. *Pageoph*, 135, 169-179.

- NISHENKO S. & L. SYKES** (1993).- Comment on «Seismic gap hypothesis: Ten years after» by Y. Kagan y D. Jackson. *J. Geophys. Res.*, 98, 9909-9916.
- NORABUENA E., DIXON T., STEIN S. & HARRISON C.** (1999).- Deceleration Nazca-South America and Nazca-Pacific Plate Motions., *Geophys. Res. Lett.*, 26, 3405-3408.
- RODRÍGUEZ L. & H. TAVERA** (1991).- Determinación con alta resolución de la Geometría de la zona Wadati-Benioff en el Perú Central. *Revista Brasileira de Geofísica*, 9, 141-159.
- SCHNEIDER J. & S. SACKS** (1987).- Stress in the contorted Nazca plate beneath southern Peru from local earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 92, 13887-13902.
- SEBRIER M., J. MERCIER, F. MEGARD & G. LABAUCHER** (1985).- Quaternary fault and reverse faulting and the state of stress in the central Andes of Peru. *Tectonics*, 4, 739-780.
- SILGADO E.** (1978).- Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú entre 1513 y 1974. *Instituto Geológico Minero del Perú*, Lima-Perú, 328pp.
- SYKES L.** (1971).- Aftershock zones of great earthquakes, seismicity gaps, and earthquakes prediction for Alaska and the Aleutians. *J. Geophys. Res.*, 76, 8021-8041.
- TAVERA H. & E. BUFORN** (1998).- Sismicidad y sismotectónica de Perú. En: A. Udias y E. Buforn (eds). Sismicidad y sismotectónica de Centro y Sudamérica. *Física de la Tierra UCM*, N°10, 187-219.
- TAVERA H. & C. AGÜERO** (2001).- Catálogo Sísmico del Perú, 1500-1982: Versión revisada y actualizada. *CNDG-Sismología, Instituto Geofísico del Perú*, 300pp.
- TAVERA H. & E. BUFORN** (2001).- Source mechanism of earthquakes in Peru. *Journal of Seismology*, 5, 519-539.
- TAVERA H., E. BUFORN, I. BERNAL, Y. ANTAYHUA & L. VILCAPOMA** (2002).- The Arequipa (Peru) earthquake of June 23, 2001. *Journal of Seismology*, 6, 279-283.
- WGCEP** (1988).- Working Group on California Earthquake Probabilities: Probabilities of large earthquakes occurring in California on the San Andreas fault. *U.S. Geol. Surv. Open File Rep.*, 88-398, 62 pp.



".....Nuestros hermanos de Pisco, Chincha e Ica
Han sabido de la furia de la naturaleza
Experimentado la pérdida de sus seres queridos
Ver que todo lo construido en segundos desaparece
Aun así, se han levantado y hoy sonríen
En sus calles adoloridas, nuevamente expresan su música
Y llevan consigo su pisco, sus cajones, sus bailes
Y sobre todo, las lecciones aprendidas
Del gran TERREMOTO ocurrido el 15 de Agosto, 2007..."

(H.T.)



Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajos 169 - Urb. Mayorazgo IV Etapa
Ate - Lima - Perú
www.igp.gob.pe