

PROCESOS GEOLÓGICOS E INTENSIDAD MACROSÍSMICA INQUA DEL SISMO DE PISCO DEL 15/08/2007, PERÚ

Bilberto ZAVALA ¹, Reginald HERMANN ², Patricio VALDERRAMA ¹, Carlos COSTA ³ y Malena ROSADO ¹

¹ Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Perú. Email: bzavala @ingemmet.gob.pe

² Norges geologiske undersøkelse (NGU)

³ Universidad Nacional de San Luis, Argentina

RESUMEN

El 15 de agosto de 2007 las ciudades de Pisco, Ica, Chincha y Cañete, ubicadas entre 140 y 300 km al sur de la capital peruana, fueron afectadas por un sismo de magnitud 7,9 (Mw). Los reportes finales del Instituto Nacional de Defensa Civil indicaron la ocurrencia de 519 muertes y entre 655 y 679 viviendas afectadas. Fueron severamente dañadas ciudades como Pisco, San Clemente y Tambo de Mora, áreas agrícolas en los valles de Pisco y Cañete y varios tramos de la carretera panamericana sur. Lugares turísticos en la Reserva Nacional de Paracas fueron destruidos, vías de penetración a la sierra de Ica, Huancavelica y Lima fueron bloqueadas, y poblaciones asentadas sobre depósitos de antiguos deslizamientos sufrieron daños (Laraos, Chocos, Huangascar, Tantarâ). Balnearios, caletas y muelles artesanales en la zona litoral, áreas agrícolas y algunas granjas avícolas sufrieron los efectos de un tsunami.

Procesos geológicos cosísmicos y postsísmicos responsables de los daños, ocurrieron en un radio de 200 km del epicentro. Deformaciones superficiales asociadas a licuación y expansión lateral se presentaron en las planicies y valles aluviales costeros, afectando sedimentitas terciarias y depósitos recientes, con niveles freáticos superficiales. Movimientos en masa (caída de rocas, derrumbes y deslizamientos), ocurrieron entre 32 y 198 km del epicentro, con volúmenes acumulados de 14.750 m³ (costa) y 9.585 m³ (sierra). Olas de tsunami post-sismo, alcanzaron un *run up* de hasta 10 m (playa Yumaque) y hasta 2 km de inundación (playa Lagunillas), en la Reserva Nacional de Paracas. La descripción geológica y geomorfológica de estos procesos, indicaron que el sismo de Pisco alcanzó un grado entre VII y VIII utilizando la escala de intensidad macrosísmica INQUA.

Palabras clave: *Terremotos, Movimientos en masa, Tsunamis, Pisco, Perú.*

ABSTRACT: *Geological process and INQUA macro-seismic intensity scale of Pisco earthquake 15/08/2007, Perú.* In August 15th, 2007 the cities of Pisco, Ica, Chincha and Cañete, located south of the Peruvian capital city, were affected for a mayor earthquake (7.9 Mw). The final report from the National Institute of Civil Defense totaled 519 casualties and 655 to 679 damaged houses. Cities like Pisco, San Clemente and Tambo de Mora were severely affected, as well as agricultural areas in Pisco and Cañete valleys. The Panamericana highway was considerably affected. In the National Reserve Paracas many tourist places were destroyed and many secondary roads that connect the coastal area with the high part of the Andes (Ica, Huancavelica and Lima) were blocked due to rock falls. Small towns in the Andes placed on ancient landslide deposits were damaged (Laraos, Chocos, Huangascar, Tantarâ). Seaside resorts, creeks and small docks in the coastal area and some chicken farms were affected by the tsunami.

Coseismic and postseismic geological processes were responsible for the damage in a 200 km radius from the epicenter. Ground deformation and lateral spreading happened in Tertiary sediments due to a shallow of the ground water table. Mass movements (rock fall, collapsing and landslides) are located between 32 and 198 km from the epicenter, with accumulated volumes of 14,750 m³ (Coastal area) and 9, 585 m³ (Andes area). The tsunami waves got 10 m of run up (Yumaque beach) and up to 2 km of flooding at the beach zone (Lagunillas beach) in the National Reserve of Paracas. The geological and geomorphological descriptions of this process determine that that the Pisco earthquake reached a VII and VIII grade on the INQUA macro-seismic intensity scale.

Keywords: *Earthquake, Mass movement, Tsunami, Pisco, Perú.*

INTRODUCCIÓN

Por sus características geológicas y sísmicas, Perú, históricamente ha sido afectado por sismos de magnitud importante en los últimos 500 años. La región Ica en particular, ubicada al sur de la capital, Lima, ha sufrido

do daños por sismos en varias ocasiones. El 12 de mayo de 1664, las ciudades de Ica y Pisco quedaron parcialmente destruidas (Silgado 1978). El mismo autor refiere en uno de los relatos de Cristóbal Rodríguez, cura de Ica, la muerte de más de 300 personas y viviendas completamente destrui-

das, así como otro sismo ocurrido el 29 de septiembre de 1946 en Pisco, donde el 70% de las construcciones de adobe y quincha sufrieron rajaduras y el 20% presentaron daños considerables. Sesenta años después, el 15 de agosto del 2007, en las ciudades de Pisco, Ica, Chincha

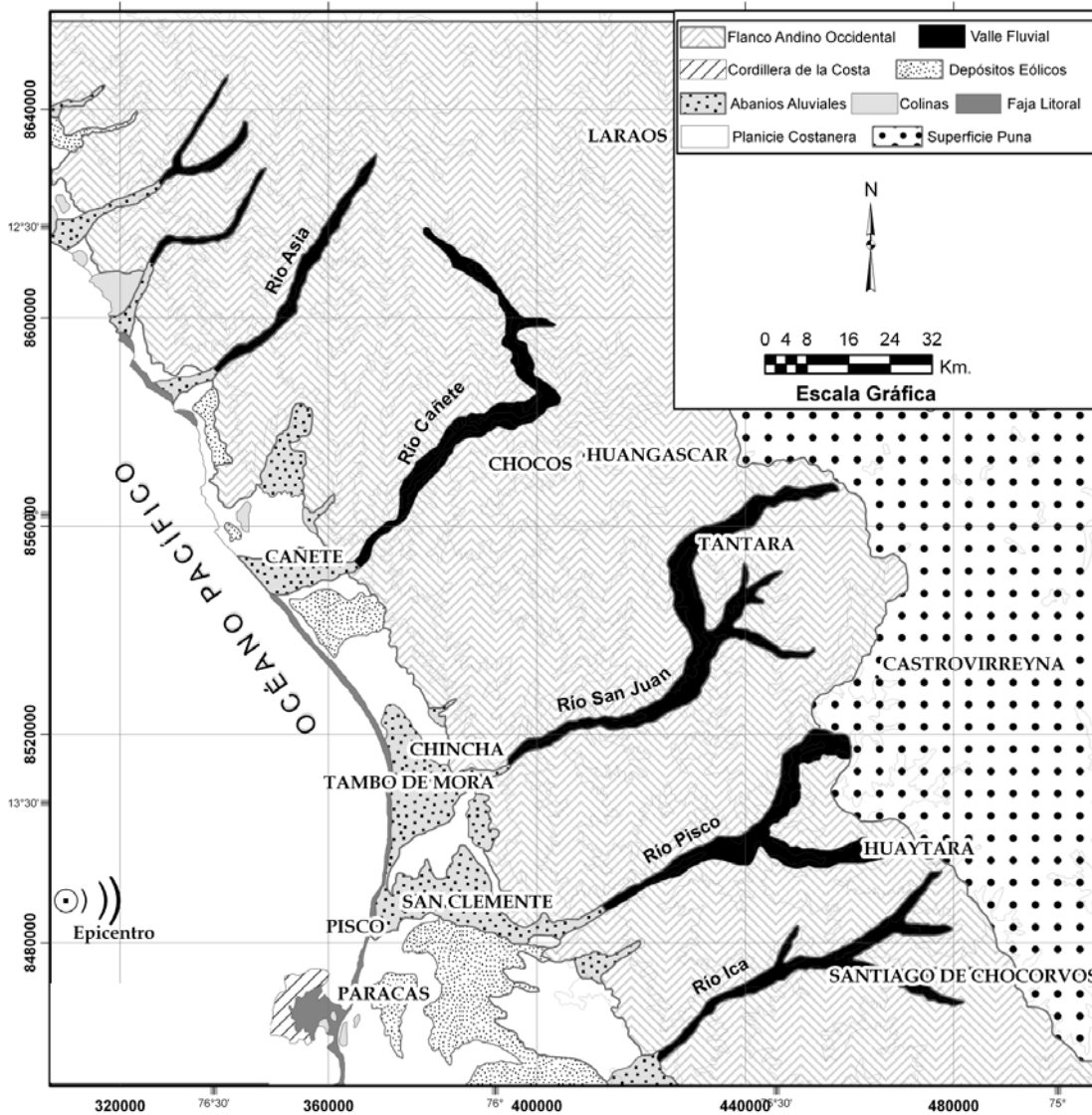


Figura 1: Mapa geomorfológico.

y Cañete ocurrió un gran sismo con intensidades de VII y VI en la escala Mercalli Modificada, y magnitud de momento (M_w) de 7,9 (IGP, 2007). Por su tamaño, se constituye como uno de los sismos que han generado cuantiosas pérdidas humanas y materiales en un radio de 250 km alrededor del epicentro. La influencia del tipo de suelo susceptible a licuación, sobre el cual se han construido las viviendas, el tipo de material precario utilizado en las edificaciones, la falta de un mapa geológico-geotécnico adecuado de uso de suelo, la antigüedad de las viviendas y la falta de educación de la población ante la ocurrencia de sismos, influenciaron para que el desastre fuese mayor. El Servicio Geológico Peruano (INGEM-

MET), a través de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, efectuó trabajos en las áreas afectadas por el sismo, analizando los procesos geológicos, diferenciándose y detallándose las deformaciones superficiales, movimientos en masa y tsunamis generados, con el fin de evaluar los daños ocasionados por el sismo. Las tareas de campo realizadas permitieron determinar la escala de intensidad macrosísmica INQUA (IES 2007) y compararla con las otras escalas existentes.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para la realización del presente trabajo

se contó con planos topográficos y geológicos a escala 1:50.000 de la zona (Fernandez 1993, Salazar y Landa 1993), plano de distribución de movimientos en masa pre-sismo, en base a la información de riesgos geológicos de Perú (INGEMMET 2003). Se consideraron los reportes de inspecciones preliminares efectuados por INGEMMET (Zavala *et al.* 2007a), e información sismotectónica (IGP 2007).

Se considera la información de campo sobre: deformaciones superficiales en las planicies costeras, movimientos en masa originados en los acantilados rocosos (derrumbes, caída de rocas y deslizamientos), agrie-

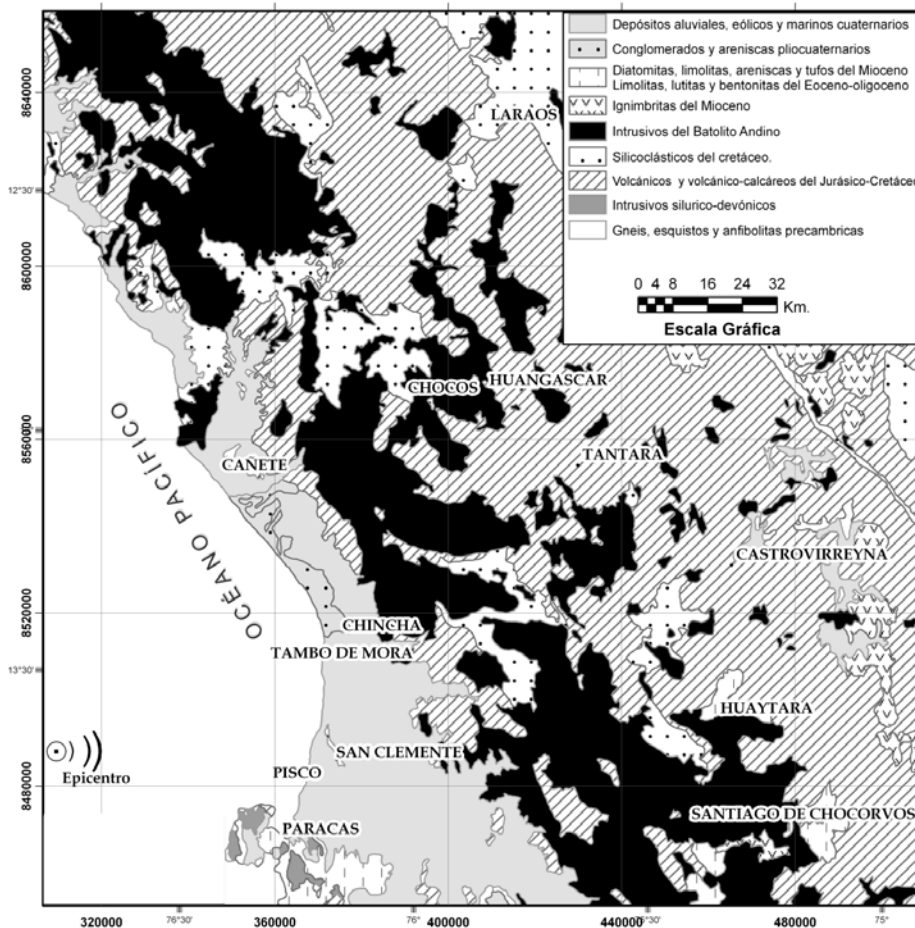


Figura 2: Mapa geológico.

tamientos y asentamientos en el terreno, así como en los taludes de corte de las carreteras hacia la sierra, tanto rutas nacionales como vecinales de la región, afectadas por el sismo.

Las interpretaciones geológicas están basadas en trabajos de campo y gabinete. Se realizaron observaciones *in situ*, donde se utilizaron fichas o formatos de descripción INQUA sobre efectos ambientales por sismos y encuestas a los pobladores, con detalles sobre procesos ocurridos. Se recopiló información sobre: tipo de movimiento en masa, volúmenes de material deslizado, orientación de estructuras geológicas principales (fracturas) y actividad del movimiento. Toda esta información se volcó a una base de datos para el análisis estadístico, facilitando la generación de gráficos de doble entrada.

CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y ESTRUCTURALES DEL ÁREA

El área epicentral morfológicamente está compuesta por una franja litoral al oeste, con predominio de playas angostas y acantilados, amplia planicie costanera disectada por valles fluviales y quebradas, abanicos aluviales, colinas bajas, lomadas y localmente bofedales con nivel freático superficial. En el lado sur sobresale un remanente de la Cordillera de la Costa en el sector de Paracas, así como campos de dunas en el desierto de Ica. Estribaciones montañosas del flanco occidental andino se levantan hacia el este; colinas, pampas, lomadas y altiplanicies sobre altitudes mayores a 3.800 m s.n.m. cubren la superficie de puna (Fig. 1). Afloran en el área gneises, esquistos y anfi-

bolitas precámbricas (Complejo Basal de la Costa), areniscas carboníferas (Grupo Ambo), rocas volcánicas andesíticas con niveles sedimentarios jurásicos (Formación Chocolate), secuencias calcáreas, volcánicas y silicoclasticas cretácicas, en el sector norte y noreste del área, (Formaciones Chilca, Imperial y Grupo Quilmaná) e ignimbritas en la zona altiplánica. Cuerpos intrusivos siluro-devónicos, en el sector de Paracas y, stocks del batolito andino en la región oriental, complementan el macizo rocoso pre-cenozoico (Fernandez 1993). Las zonas con mayores disturbaciones y procesos geológicos están compuestas de limolitas, lutitas fisibles, areniscas y niveles bentoníticos de edad eocena-oligocena (Formación Paracas), diatomitas, limolitas con niveles tufáceos y areniscas del Mio-Plioceno (Formación Pisco), areniscas con niveles tobáceos (Formación Pocoto), conglomerados y areniscas plio-cuaternarias (Formaciones Cañete y Topara). Depósitos aluviales, acumulaciones eólicas y sedimentos marinos recientes, cubren las planicies y abanicos aluviales, playas o terrazas marinas. Las áreas urbanas principales en la zona epicentral (zona costera), se asientan sobre depósitos aluviales antiguos (Chincha, Cañete), depósitos marinos poco cohesivos (Paracas, Tambo de Mora), algunas sobre la Formaciones Topara y Cañete (Sunampe), sedimentos semi-consolidados de las Formaciones Pisco y Paracas (Pisco y San Clemente), con una delgada cobertura aluvial o eólica (Fig. 2).

Estructuralmente la región se caracteriza por presentar una zona de fallamientos en bloques que domina el sector de la bahía de Paracas y el oeste de la región Ica; en este sector las fallas controlan la orientación de la línea de costa. Existe además un leve plegamiento andino como muestra el homoclinal de Pisco, con dirección preponderante norte-sur, el cual se asociaría a un control estructural por falla, la cual se considera neotectónica, relacionándose con la flexura de Huamaní, la cual se aprecia en el sector de puente Huamaní (Macharé *et al.* 1991). Más hacia el norte de Pisco entre Chincha y Cañete la línea de costa presenta un alineamiento de di-

rección andina (NO-SE), donde aproximadamente 53 km de costa muestran secuencias sedimentarias basculadas por procesos de movimientos en masa antiguos. Hacia el sector este de la zona epicentral un sistema de fallas longitudinales paralelas a la costa y fallas transversales, interrumpen las secuencias estratigráficas volcánico-sedimentarias y desplazan cuerpos del batolito andino (Salazar 1993).

CARACTERÍSTICAS DEL SISMO DE PISCO DEL 15/08/2007

El 15 de Agosto de 2007, 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 localidades aledañas en un radio de aproximadamente 200 km, incluyendo poblaciones de la sierra de los departamentos de Lima, Ica y Huancavelica (IGP 2007). El sismo tuvo su origen en la zona de convergencia y subducción entre las placa de Nazca y Sudamericana con un epicentro localizado a 74 km al oeste de la ciudad de Pisco y a 40 km de profundidad. Este terremoto se constituye como uno de los más grandes ocurridos en esta región en los últimos 100 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 (Tavera *et al.* 2007).

PROCESOS GEOLÓGICOS ASOCIADOS AL SISMO DE PISCO

Como resultado del sismo se generaron diferentes procesos geológicos cosísmicos, dentro de los cuales destacan deformaciones superficiales en el terreno, principalmente en las zonas costeras (planicies), incentivación de movimientos en masa en los taludes de corte de carretera y reacomodo en algunos depósitos antiguos de deslizamientos (laderas). Posterior al even-

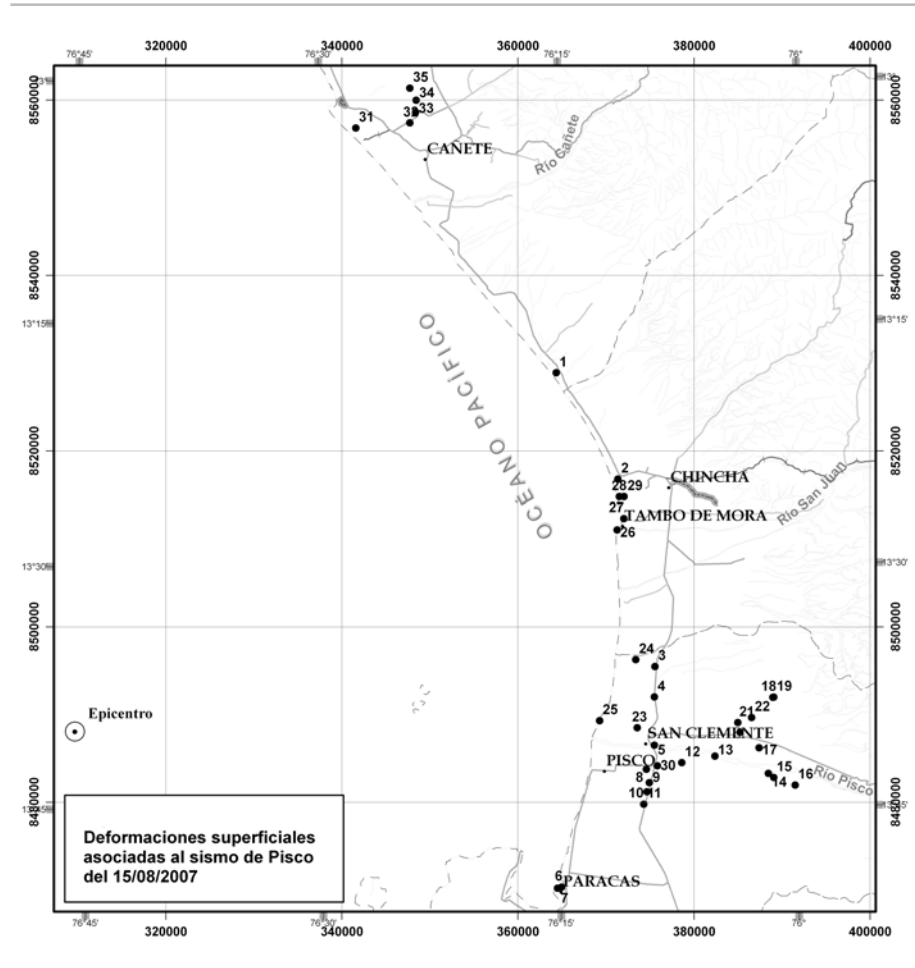


Figura 3: Deformaciones superficiales asociadas al sismo de Perú.



Figura 4: Perfil esquemático interpretativo del sector Tambo de Mora - Sunampe.

to sísmico principal se produjeron tsunamis a lo largo de la costa. Las réplicas del sismo a su vez generaron mayores eventos de movimientos en masa, agrietamientos en el terreno, asentamientos y deformaciones en superficie.

Deformaciones superficiales

Las deformaciones superficiales originadas por los sismos del 15 de agosto de 2007 (Costa y Valderrama 2007), se distribuyeron principalmente en las zonas: litoral, planicie costanera, valles inferiores y terrazas

CUADRO 1: Deformaciones superficiales asociadas al sismo de Pisco del 15/08/2007

	Paraje	Morfología	Características	Daños	Dist. al epicentro (Km)	Intens. Inqua
1	Entre Cerro Colorado y Jahuay	Ladera con depósitos eólicos y residuales.	Agrietamientos y hundimientos de terreno	Asentamientos en talud inferior de carretera.	68,16	VI
2	Jahuay	Acantilado y playa	Licuación; agrietamientos que muestran evidencias de afloramiento de agua.	Hundimiento de carretera.	68,00	VII
3	Pampa Camacho	Planicie costanera y zona de bofedal	Licuación; grietas de 0,50 m de ancho y 0,60 m de profundidad	Caída de poste de luz; agrietamientos en la carretera	66,39	VI-VII
4	(Km 218 al 222)	Planicie costera bofedal	Licuación	Agrietamientos en la carretera.	65,98	VI-VII
5	Entre puente Huamani y Casaya	Valle de Pisco y terrazas aluviales.	Licuación; depósitos aluviales y secuencias de la Formación Pisco.	Agrietamientos en el puente.	66,11	VI-VII
6	Km 229	Planicie costanera.	Licuación; Agrietamientos con azimut 10°.	Agrietamientos y asentamientos en la carretera.	58,05	VI-VII
7	Playa Chaco, Paracas	Litoral y playa.	Licuación; agrietamientos de terreno; depósitos marinos y napa freática superficial.	Viviendas agrietadas, hundimientos en las veredas, colapso de muros.	57,66	VI-VII
8	Pisco Playa	Costa y playa	Licuación; volcanes de lodo	Agrietamientos de paredes de viviendas.	65,11	VI-VII
9	Entre Pisco y Panamericana Sur	Planicie costanera	Licuación	Agrietamientos en viviendas y carretera. Rotura detuberías de agua potable.	65,55	VI-VII
10	Km 232	Planicie costanera y zona de bofedal	Licuación	Agrietamientos y asentamientos	65,67	VI-VII
11	Km 235 + 300	Planicie costanera y zona de bofedal	Licuación	en la carretera.	65,39	VI-VII
12	Entre Villa Túpac Amaru y Chongos	Planicie aluvial	Licuación; fracturas en el terreno y expansión lateral. Azimut 90°	Terrenos de cultivo.	69,09	VI-VII
13	Monte Fuerte (Chongos)	Valle del río Pisco.	Volcanes de arena; agrietamientos con azimut 95°.	Agrietamientos en la carretera.	72,78	VI-VII
14	Cuchilla Vieja	Terraza aluvial	Agrietamientos con azimut 75°, desplazamiento 0,50 m.	Asentamiento de viviendas	78,93	VI-VII
15	Frente a Huarangal	Terraza aluvial	Licuación	Agrietamientos en la carretera.	79,67	VI-VII
16	Caserío de Paracas	Terraza aluvial	Licuación	Agrietamientos en la carretera.	82,15	VI-VII
17	San Juan de Córdor	Terraza aluvial y bofedal	Expansión lateral. Fracturas con azimut 120° y desplazamientos de 1 m.	Terrenos de cultivo y canal.	77,69	VII
18	Cabeza de Toro	Planicie aluvial y bofedales.	Licuación; volcanes de lodo; grietas con azimut 160°.	Terrenos de cultivo y acequias.	79,45	VII-VIII
19	Cabeza de Toro	Planicie aluvial y bofedales.	Licuación; agrietamientos en el terreno con aberturas de 0,05 a 0,10 m y 0,40 m de profundidad.	Terrenos de cultivo .	79,46	VII-VIII
20	José Olaya	Lomadas y piedemontes Bofedales	Licuación; expansión lateral Fracturas con azimut 15° y desplazamientos de 0,50 m.	Terreno eriazo, salitral.	75,67	VII-VIII
21	Toscanía	Planicie aluvial	Licuación; agrietamientos, asentamientos en varios sectores; fracturas en echelón.	Terrenos de cultivos, caminos o trochas carrozables y linderos de parcelas. Obstrucción de acequias.	75,33	VII-VIII
22	Manrique hacia Montalbán y Benavides	Planicie aluvial y zona de bofedales	Licuación; agrietamientos, asentamientos; volcanes de lodo alineados en grietas principales.		76,90	VII-VIII
23	Sector Salinas (La Hoyada)	Planicie aluvial	Licuación; agrietamientos, y asentamientos.		64,06	VI-VII
24	Camacho / San Martín	Planicie aluvial	Licuación; agrietamientos con azimut 90° y asentamientos de terreno.	Agrietamientos de terrenos de cultivo y en los límites de parcelas.	64,23	VI-VII
25	Polvareda, Mariátegui y Santa Cruz	Planicie aluvial			59,79	VI-VII
26	Callejón (Camacho)	Planicie aluvial	Licuación; volcanes de arena.	Agrietamientos de terrenos de cultivo.	65,85	VI-VII
27	Tambo de Mora (Calle Nueva)	Zona litoral	Licuación; agrietamientos, hundimientos y expulsión de agua. Volcanes de lodo.	Colapso de viviendas	67,07	VII-VIII

Continúa Cuadro 1

	Paraje	Morfología	Características	Daños	Dist. al epicentro (Km)	Intens. Inqua
28	Penal de Tambo de Mora.	Planicie aluvial y zona cercana al litoral.	Licuación; expansión lateral, agrietamientos y volcanes de lodo.	Colapso de muros y estructuras.	67,52	VII-VIII
29	Entre Penal Tambo de Mora y Sunampe	Acantilado y planicie aluvial	Licuación; expansión lateral del terreno, agrietamientos y asentamientos.	Hundimiento de terrenos.	67,93	VII-VIII
30	Casaya hasta cerca de carretera	Planicie aluvial	Licuación; relleno antrópico y zona de bofedal. Agrietamientos de terreno	Daños en estructuras de viviendas, grietas en la carretera.	66,42	VI-VII
31	Fundo Don Oscar	Planicie aluvial	Licuación; agrietamientos.	Agrietamiento de terraplenes de carretera.	76,16	VI
32	Puente La Quebrada y canal San Miguel	Planicie aluvial	Licuación	Agrietamientos y asentamientos en la carretera que accede a La Quebrada.	78,99	VI-VII
33	La Quebrada	Planicie aluvial	Licuación		80,46	VI-VII
34	Compradores y sector de La Huaca	Planicie aluvial y lomadas con nivel freático superficial	Licuación; Surgimientos de arena, lodo y agua en gran cantidad, alineados a lo largo de las fracturas.	Viviendas colapsadas; terrenos de cultivo agrietados.	82,07	VII-VIII
35	Canta Gallo	Planicie aluvial	Licuación	Chacras agrietadas y colapso de acequias.	82,70	VII-VIII

Fuente: Elaboración propia con datos de campo (Zavala, B., Valderrama, P., Hermanns, R. y Costa, C.).

aluviales del río Pisco principalmente, sector de Chíncha Baja (Tambo de Mora), y en el valle de Cañete - Quilmaná (San Luis). Sus características principales, daños ocasionados, distancia al epicentro e intensidad INQUA estimada se describen en el cuadro 1 y su distribución se muestra en la figura 3.

A modo de ejemplo se describen algunas de las principales zonas afectadas por procesos de licuación, expansión lateral, agrietamientos y basculamientos en el terreno. *Entre Penal Tambo de Mora, la carretera Panamericana Sur y Sunampe (Chíncha):* Se determinaron fenómenos de expansión lateral (*lateral spreading*), con efectos de borde libre debido a una escarpa topográfica principal o acantilado de 30 m de desnivel promedio, desarrollada sobre areniscas, pelitas y diatomeas (Formación Topara), y conglomerados hacia el tope (Formación Cañete), del Pleistoceno. La geometría más representativa de estas dislocaciones se indica en el perfil interpretativo de la figura 4. Considerando el basculamiento en las escarpas asociadas a geometrías tipo *roll-over* y la apertura de las grietas, la extensión asociada con estos hundimientos es muy significativa e implicaría una falla normal de ángulo muy bajo y/o superficie de despeque muy somera. La profundidad de la napa en Tambo de Mora es inferior a 1 m y hacia la zona de

acantilado está a 4,00-4,50 metros. Las deformaciones se catalogan como hundimientos paralelos a la escarpa topográfica, rupturas que en cuanto a densidad, apertura de grietas y resalto, disminuyen al alejarse del acantilado. Al pie de la escarpa predominan fracturas con orientación paralela (345°), pero también patrones geométricos con familias de 290°-300° y 10°-20°, originando diseños romboidales en planta que reflejan la geometría del fracturamiento de las litologías consolidadas presentes a escasa profundidad. Estas perturbaciones se extendieron por el norte hasta las cercanías de la carretera Panamericana Sur que conduce a Chíncha Alta, a manera de grietas extensionales paralelas con orientación 300° y geometría tipo graben (Fig. 5). Su efecto sobre la carretera principal originó su hundimiento en un tramo de 300 metros.

Entre Pisco y el cruce con la carretera Panamericana Sur: Se reconoció un tren de escarpas secundarias y grietas con resaltos centimétricos y orientación general 330°. La apertura de dos trincheras para reparación de tuberías de agua afectadas, permitió observar grietas con inyecciones clásticas y rellenos de material suprayacente, además de típicas texturas de licuación. En un sector adyacente, un tren de lóbulos o crestas de presión con orientación submeridiana, se presentó a lo lar-

go de 34 m, donde los linderos con muros de adobe colapsaron en ambos lados con sentido centrípeto hacia éstas. Las variadas morfologías en detalle implican un acortamiento y compresión localizada del terreno asociada a un eje de acortamiento perpendicular a la elongación de las rupturas. El desnivel de escalonamientos asociados a desgarré, respecto a la superficie original del terreno generalmente no supera los 20 cm. Estas compresiones aisladas y concentradas a lo largo de un eje principal, se consideran una respuesta localizada a sacudimientos del terreno (*ground-shaking*), y por tanto deformaciones secundarias (Figs. 6 y 7). En general las deformaciones se asocian a suelos susceptibles de licuación, cuya expresión se dio en hundimientos o abombamientos, en varios tramos de la carretera Panamericana Sur entre Puente Huamaní, la ruta hacia Ica y acceso a Pisco, así como perturbaciones y colapsos en las paredes y muros del sector de Túpac Amaru.

Entre Casalla y Chongos: En la margen izquierda del río Pisco, sobre cultivos de algodón, suelos compuestos de arenas finas, limos y arcillas, presentaron dos tipos diferentes de dislocaciones. En un sector localizado se dieron grietas extensionales de orientación promedio NE y E-O y geometría en Y. A 65 m del mismo, un tren principal de lóbulos y crestas de presión

compuesto por diferentes segmentos de orientación variable (NO y NE), pero con alineación general submeridiana. Ambos sectores de hundimiento mostraron numerosas grietas de extensión paralelas o subparalelas, cada una de las cuales generó un basculamiento notable al terreno, el cual comúnmente alcanza los 40° hacia el sureste. La segunda estructura referida puede caracterizarse como una cresta de presión, donde se reconocieron abombamientos y rupturas acompañantes típicas de acortamientos concentrados. El desnivel promedio respecto a la altura del terreno no afectado es de 50 cm (Fig. 8), y máximos desniveles de hasta 1,05 metros. La asociación de ambas sugiere un proceso de expansión lateral con hundimiento asociado (Fig. 9). No se observaron expresiones superficiales de licuación, pero no se descartó su ocurrencia. La magnitud de este proceso se refleja por la notoria extensión de grietas muy abiertas y el importante basculamiento del terreno involucrado. Ejemplos de los procesos presentados en otras áreas no descritas, tanto de licuación, presencia de volcanes de arena y daños en las estructuras e infraestructura se muestran en las figuras 10, 11 y 12.

Movimientos en masa detonados por el sismo

Los movimientos en masa son los procesos geológicos más comunes detonados por un sismo (Keefer 1984). La remoción de masas rocosas, cobertura superficial, o ambas, está condicionada por: el fracturamiento y meteorización en las rocas, naturaleza y grado de cohesión en los depósitos superficiales, humedad del terreno, existencia de movimientos en masa antiguos o inestabilidad de laderas y/o taludes artificiales, pendiente de laderas y altura relativa de estas (colinas, montañas) y distancia al epicentro. Una condición adicional es la orientación del talud, ladera o cara libre, en relación a la propagación del movimiento u ondas sísmicas. El mapa de distribución de movimientos en masa detonados por el sismo (Fig. 12), muestra el inventario realizado en los ta-

CUADRO 2: Movimientos en masa detonados por el sismo de Pisco del 15/08/2007

Paraje	Tipo de MM	Vol. Intens.	Dist. al
		(m ³) INQUA	epicentro(Km)
Reserva Nacional de Paracas			
1 Playa Talpo	Derrumbe	30 VII	48,77
2 Lechuza Baja (Playa Los Choros)	Derrumbe	70 VII	50,52
3 Punta Arquillo: Mirador de Lobos N° 3	Derrumbe y deslizamiento	15 VII	52,31
4 Punta Arquillo: Mirador de Lobos N° 2)	Caída de rocas y derrumbe	15 VII	52,32
5 Punta Arquillo: Mirador de Lobos N° 1	Caída de rocas	15 VII	52,22
6 Playa Arquillo	Caída de rocas y derrumbe	250 VII	52,57
7 Punta Prieto	Caída de rocas y derrumbe	150 VII	53,72
8 Playa La Mina	Caída de rocas	10 VII	55,08
9 Entre Frontón y La Mina	Deslizamiento	12000 VII	32,04
10 Playa Roja	Caída de rocas y derrumbe	120 VII	55,22
11 Cerca de Punta Santa María	Caída de rocas	30 VII	55,94
12 Playa Yumaque	Caída de rocas y derrumbe	80 VII	58,56
13 Punta del Cielo	Derrumbe, deslizamiento y caída de rocas	200 VIII	57,84
14 Punta del Cielo	Derrumbe, deslizamiento y caída de rocas	250 VIII	58,27
15 Punta del Cielo	Derrumbe, deslizamiento y caída de rocas	350 VIII	58,46
16 La Catedral y La Bóveda	Derrumbe, deslizamiento y caída de rocas	750 VIII	57,49
17 Playa Salinas y Frayles	Derrumbe, deslizamiento y caída de rocas	600 VII	62,31
18 Sector Puente	Caída de rocas	600 VII	63,78
Acantillados costeros entre Canete y Chincha			
19 Entre Cerro Colorado y Jahuay	Caída de rocas y de detritos	5250 VI	53,73
20 Jahuay (Chincha)	Caída de rocas y de detritos	125 VII	52,25
Iramo de carretera: San Clemente-Humay-Huancano-Pampano-Huaytará-Puente Rumichaca			
21 Quebrada Cocanansaño. (Km. 59+800)	Derrumbe	45 VII	117,59
22 Pasando Patipampa. (Km. 83+250)	Caída de rocas	35 VII	132,29
23 Cerro Jajahuacce. (Km. 83+360)	Derrumbe	24 V	134,96
24 Pasando quebrada Uchupata (Km. 84+900)	Derrumbe	15 V	135,39
25 Quebrada Cacahuacce. Km. 85+700	Caída de rocas	15 IV	136,09
26 Frente a la mina Santa Elena (Km. 90+250)	Derrumbe	139,49	67,5 V
27 Tullpa (Km. 93+500)	Derrumbe	15 V	142,54
28 Capana (Km. 95+200)	Derrumbe y deslizamiento	8750 VIII	145,29
29 Jerque	Caída de rocas	23 V	152,29
30 Km. 118 -123	Caída de rocas	100 V	
31 Quebrada Sayauma	Deslizamiento	10 V	159,96
32 Km. 130 + 100	Caída de rocas	10 V	160,39
33 Km. 182	Derrumbe	15 V	197,38
34 Km. 185 +900 - 186 +000	Deslizamiento	70 V	197,77
35 Km 188+450-188+250	Caída de rocas	60 V	198,24
Iramo de Carretera: Puente Racra- Ticrapo-Puente Infiernillo-Castrovirreyna			
36 Cerro Racra	Caída de rocas	450 V	133,83
37 Cerro Mataballo	Caída de rocas	150 V	134,71
38 Pampa Blanca	Caída de rocas	45 IV	140,53
39 Quebrada Venturosa	Caída de rocas	90 IV	141,38
40 Km. 105 +800	Derrumbe	10 V	146,25
41 Cabracancha	Caída de rocas y deslizamiento	60 V	146,47
42 Buenavista / Ticrapo	Agrietamiento y asentamiento	IV	146,36
43 Cabracancha	Deslizamiento	20 V	147,4
44 Km. 112 + 500	Agrietamiento y asentamiento	V	147,63
45 Km. 113 + 000 - 113 + 100	Deslizamiento	20 V	146,78
46 Pata Pata	Derrumbe	180 V	157,75
47 Chuncacc	Derrumbe	10 V	157,71
48 Km. 140 +150 (Entre Sinto y Pucaya)	Caída de rocas	8 V	160,69
Iramo de carretera: Canete-Lunahuaná-Yauyos-Chocos-Huangascar y rutas vecinales			
49 Caltopa Alto	Agrietamiento y asentamiento	V	90,17
50 Sosci	Caída de rocas	15 IV	91,17
51 San Agustín	Caída de rocas	10 V	97,22
52 Entrada a Patapampa. Km 38+750	Derrumbe y deslizamiento	50 VII	103,33
53 Frente al cerro Riverón	Derrumbe	35 VII	111,79
54 Frente a San Miguel	Agrietamiento y asentamiento	250 VII	125,7
55 Puente San Miguel	Derrumbe	5 V	125,63
56 Catahuasi	Derrumbe	300 VI	131,04
57 Quebrada Huangascar	Caída de detritos	25 V	127,24
58 Entre Huangascar y Chocos	Derrumbe	15 V	132,05
Iramo de Carretera: Chincha-San Juan de Castrovirreyna-Tantarà-San Pedro de Huacarpay y rutas vecinales			
59 Hacienda San Juan	Caída de rocas	105 V	90,82
60 Frente a Caruya	Caída de rocas	60 IV	94,67
61 Huanchor (Km. 29)	Caída de rocas	800 VI	95,33
62 Huanchor. Km. (30 + 800)	Caída de rocas	450 VI	116,11
63 Huayupa. (Km. 33 + 200)	Caída de rocas	30 IV	99,07
64 Hda. Atahuaranga. (Km. 35).	Caída de rocas	40 VI	99,87
65 Cabecera de Huachinga. (Km. 42)	Caída de detritos	400 IV	105,92
66 Km 48-50 San Juan-Tantarà	Caída de rocas	150 V	118,36
67 Santa María de Yanapampa	Caída de rocas	5 IV	121,64
68 Huancho Grande	Derrumbe	20 V	122,18
69 Chata	Caída de detritos	15 IV	133
70 Palca	Caída de detritos	180 V	135,56

Continúa Cuadro 2

Paraje	Tipo de MM	Vol. (m ³)	Intens. INQUA	Dist. al epicentro(Km)
Reserva Nacional de Paracas				
71 Frente a Lunche	Caída de rocas	80	V	132,95
72 Pache	Derrumbe	15	IV	133,83
73 Entre Tambo y Huacasca	Derrumbe y caída de detritos	20	V	138,65
Iramo: San Juan -Yanac-Liscay				
74 Huayto	Caída de rocas	90	IV	104,38
75 Cerro Rupasca	Deslizamiento	60	V	107,11
Iramo: Paica-Villa de Arma				
76 Paica	Caída de detritos	150	V	132,09
77 Frente a Pumani	Derrumbe	10	V	136,35
78 Entre Huachacmarán y Acomachay	Caída de rocas y derrumbe	300	V	138,27
Iramo de carretera: Ica-Cocharcas-Pampahuasi-Andaymarca-Santiago de Chocorvos				
79 Cerro Puca Puca	Caída de rocas y de detritos	20	V	154,33
80 Tingo	Caída de rocas y de detritos	10	V	155,34
81 Entre Tingo y Sauces.	Caída de rocas y deslizamiento	25	V	155,11
82 Sauces	Caída de rocas	20	V	154,78
83 Quebrada Andaymarca	Caída de rocas	15	V	154,89
84 San Antonio de Andaymarca.	Caída de rocas y derrumbe	80	V	154,78
85 Pucquillua	Caída de rocas y derrumbe	90	V	156,24
Iramo de carretera: Ica-San José de los Molinos-Huamani -Iambo-Santo Domingo de Capillas-Santiago de Chocorvos				
86 Labanda /Bocatama La Achirana	Caída de rocas y derrumbe	12	IV	120,35
87 Sector Socavón	Caída de detritos	150	V	131,38
88 Quebrada Dos Aguas	Caída de detritos	250	V	138,17
89 Entre Tambo y Capilla.	Caída de rocas	10	V	162,57
90 Cerro Huañancha	Caída de rocas	5	V	170,39
Cuenca río Cañete				
91 Cerro Campana	Caída de detritos	20	V	127,36
92 San Jerónimo de Yanac	Caída de detritos	5	V	112,57
93 Frente a Zañín	Caída de detritos	40	V	145,17
94 Huanchac	Caída de rocas	15	V	149,88
95 Entre Yaca y Caullama	Caída de rocas	20	V	156,64
96 Quichca	Derrumbe	10	V	128,39
97 Entre Suquia y Quichca	Caída de rocas	35	V	129,28
98 Frente a Pallca	Caída de rocas y derrumbe	15	V	130,51
99 Cerro Pucahuasi (Huangascar)	Deslizamiento	10	IV	132,15
100Tranca (Huangascar)	Derrumbe	10	IV	131,37
101Río Viñac	Derrumbe	10	V	133,1
102Quebrada Catacancha	Derrumbe	20	V	132,6
103Frente a Chocos	Caída de detritos	10	IV	127,32
104Entre Cascajal y Huayabo (C° Poquilo)	Caída de detritos	25	V	124,25
105Frente a Huancaya	Caída de detritos	5	IV	192,92
Cuenca río San Juan-Chincha				
106Tripunca	Caída de detritos	20	VI	107,81
107Cantupuquio	Deslizamiento	10	IV	135,05
108Cerca de Ayacuchito	Caída de rocas y derrumbe	10	IV	119,09
109Songo Chico	Caída de rocas	20	V	130,56
110Cascanni	Derrumbe y deslizamiento	50	V	133,73
111Quebrada Jasa Huishcana	Derrumbe	5	V	141,79
112Molienda	Deslizamiento	10	V	142,8
113Río Castrovirreyña	Derrumbe	150	V	166,09
Cuenca río Pisco				
114Jatumpampa	Caída de detritos	5	IV	161,99
115Río Pisco	Caída de detritos	300	IV	138,29
116Pampanito. (Frente a Km. 101)	Derrumbe y deslizamiento	5279	VIII	147,75
117Río Vizcacha	Deslizamiento	12	V	156,78
118Valle del Río Arma/Río Vizcacha	Caída de rocas	20	IV	152,74
119Quito Arma / Collcapampa	Deslizamiento	25	V	155,02
120Quito Arma	Derrumbe y deslizamiento	60	V	156,17
121Huayacundo Arma	Deslizamiento	75	V	156,74
122Río Quito Arma	Derrumbe	110	V	159,33
123San Antonio de Cusicancho	Deslizamiento	15	V	159,37
124Taurcarpata / Ticrapo	Derrumbe y caída de detritos	60	V	145,78
125Tarayoc	Derrumbe	40	V	145,05
126Chalma	Deslizamiento	35	V	152,14
127Quebrada Infiernillo	Derrumbe y deslizamiento	100	V	151,2
128Río Castrovirreyña	Derrumbe y caída de detritos	25	V	160,91
Cuenca río Ica				
129Quebrada Chincayo	Derrumbe y deslizamiento	20	V	159,57
130Morro / Río Ica	Caída de detritos	30	IV	132,92
131Santa Rosa de Tambo	Deslizamiento	15	V	160,93
132Santa Rosa de Tambo	Deslizamiento	60	V	162,77
133Vivanco	Caída de rocas	25	IV	133,65
134Río Pampas / Colpabamba	Deslizamiento	10	IV	173,96

Fuente: Elaboración propia con datos de campo (Zavala, B., Valderrama, P., Hermanns, R. y Costa, C.).

ludes artificiales y laderas naturales en las zonas de la costa y sierra. El volumen acumulativo total de estos movimientos alcanzó los 42.425 m³ de material. Las distancias al epicentro tomando como referencia la ubicación del primer movimiento sísmico, oscilaron entre 32 y 198 kilómetros. Un resumen de las áreas inventariadas en la costa, carreteras y cuencas se presenta en el cuadro 2.

Los movimientos en masa generados (Zavala *et al.* 2007b) se distribuyeron arealmente a partir de la zona epicentral del sismo en:

- Acantilados costeros de la reserva nacional de Paracas, compuestos por secuencias sedimentarias marinas de las Formaciones Paracas y Pisco.

- Taludes en las carreteras de penetración a la sierra desde las localidades afectadas por el sismo (Cañete, Chincha, Pisco e Ica), con gran número de caídas de rocas, derrumbes en rocas intrusivas del batolito andino y en rocas volcánico-sedimentarias fuertemente fracturadas.

- Laderas naturales (medias y superiores) de montañas con moderada a fuerte pendiente y caras libres de terrazas; presentándose generalmente caídas de detritos.

- Acantilados costeros entre Cañete y Chincha compuestos por sedimentos de las Formaciones Cañete y Topará y cobertura superficial eólica, con caídas de detritos.

Los movimientos en masa más frecuentemente disparados por el sismo fueron caídas de rocas y derrumbes; le siguen en orden de ocurrencia caídas de detritos, asociadas a los anteriores y deslizamientos (Fig. 13). Asimismo los deslizamientos asociados a derrumbes y los deslizamientos independientes fueron los que acumularon mayor volumen de remoción. En función a cinco clases de volumen de material, en la figura 14 se muestra un histograma de frecuencia clase de volumen, en relación al número de eventos. Se tuvo un mayor número de eventos con volúmenes entre 10 y 100 m³, seguidos de entre 100 y 500 m³ (para ambas clases los volúmenes acumulativos fueron de 7.723 m³). Los eventos con volúmenes mayores a 1000 m³ fueron menores, sin embargo su



Figura 5: Estructuras extensionales con geometría tipo graben y basculamientos entre Penal Tambo de Mora y Sunampe.



Figura 6: Compresiones, producto de las cuales se presentaron abombamientos en el terreno.

volumen acumulativo fue de 31.279 m³. Un histograma comparativo del número de movimientos en masa en las laderas naturales versus los ocurridos en los taludes en carreteras (Fig. 15), muestra un mayor volumen acumulativo en los depósitos de remoción de laderas, resaltando los ocurridos en el litoral de la Reserva Nacional de Paracas.

En la reserva se diferenciaron caída de rocas y detritos, derrumbes de detritos, deslizamientos (rotacional o traslacional), avalanchas de rocas. Los volúmenes de material removido acumulativo se estimaron en 14.750 m³. Colapsos de material rocoso en zonas con intenso fracturamiento en los estratos, en donde las discontinuidades en las rocas y el grado de fisilidad de las lutitas, favorecieron estos procesos (Fig. 16). Entre Cañete y Chincha, en 53 km de línea de costa, se diferencian movimientos en masa antiguos, que probablemente podrían haber sido detonados por sismos de gran magnitud. En este sector, con el sismo solo se produjo una remoción de material superficial, bajo la forma de caída de detritos cuyos volúmenes fueron pequeños a moderados, inferiores en forma individual a los 10 m³, originando pequeños taludes de detritos. Las caídas de grandes bloques fueron aisladas; se presentaron en playa Wakama.

Las carreteras hacia la sierra desde Cañete, Chincha, Pisco e Ica, presentaron un gran número de movimientos en masa. En forma indistinta ocurrieron en rocas intrusivas del batolito andino (en mayor porcentaje), en rocas volcánico-sedimentarias en segundo lugar, y en sedimentarias en menor porcentaje (Fig. 17). En la vía entre San Clemente - Huaytará-Puente Rumichaca y rutas vecinales, los volúmenes de material caído en los cortes de carretera, oscilaron entre 10 y 375 m³; excepcionalmente se dieron deslizamientos con volúmenes de hasta 8.750 m³ (sector Capana). En conjunto el acumulado de material removido alcanzó los 9.585 m³ aproximadamente. Entre Puente Racra-Ticrapo-Castrovirreyna, los volúmenes de remoción originados variaron entre 5 y 180 m³, que en conjunto alcanzaron los 1.043 m³. En la vía Huaya-

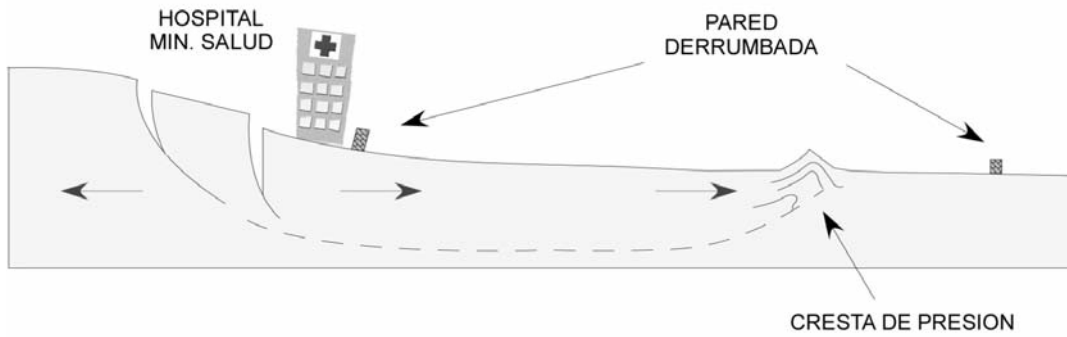


Figura 7: Perfil esquemático sin escala, que muestra las crestas de presión o lóbulos en el sector de San Clemente.

cundo Arma, Quito Arma y Cusicancha no ocurrieron grandes movimientos en masa en los cortes de carretera, pero si se apreció reactivación de algunos a nivel de laderas. Entre Cañete y Yauyos, la carretera presentó caídas de rocas, derrumbes de detritos y rocas, y agrietamientos en su plataforma. Los volúmenes de remoción oscilaron entre 10 y 300 m³ (660 m³ acumulados). Un inventario de movimientos en masa pre-sismo (INGEMMET 2003), mostraba caída de rocas, derrumbes y deslizamientos en los valles tributarios de Huangascar y Chocos; aguas abajo no se reportan eventos previos. Los detonados por el sismo se asociaron principalmente a la inestabilidad de taludes artificiales (pendiente), naturaleza de la roca (fracturamiento y meteorización), así como al grado de compactación de suelos o rellenos de la plataforma de carretera. Hacia arriba de Yauyos en dirección a Laraos y Huancaya, parcialmente se presentaron pequeños volúmenes de caídas de detritos y derrumbes entre Magdalena y Yauyos, y entre Magdalena y Tinco. En esta zona se reconocieron grandes movimientos en masa antiguos, desde caída de rocas, hasta avalanchas de rocas que produjeron represamientos de valles y lagunas. Entre San Jerónimo de Yanac-Huangascar-Chocos, la carretera fue obstruida parcialmente por caída de rocas y detritos, derrumbes, tanto en rocas del substrato muy fracturadas como coluviales de talud muy inestables. Los volúmenes de materiales alcanzaron los 40 m³ en dos sectores. Las rutas fueron limpiadas rápidamente, sin embargo la ruta entre Huangascar y Chocos, estuvo muchos días intransitable.

Entre Chincha-Tantarà-San Pedro de



Figura 8: a) Notable asimetría en el perfil transversal del hundimiento en Casalla; b) Desagregación en terrenos producto de un acortamiento más importante.

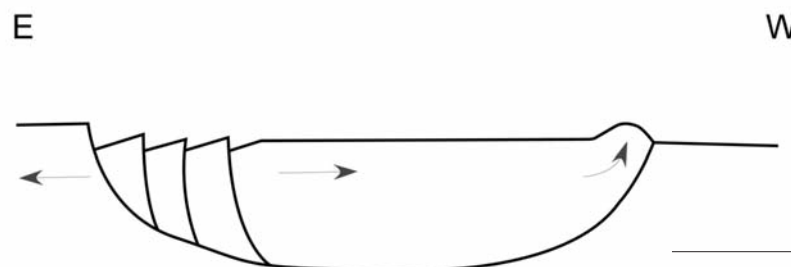


Figura 9: Perfil Interpretativo - Sector Casalla.



Figura 10: Sectores de La Hoyada (a), Panamericana Sur (b) y Tambo de Mora (c), con fuertes agrietamientos asociados a procesos de licuación de suelos.

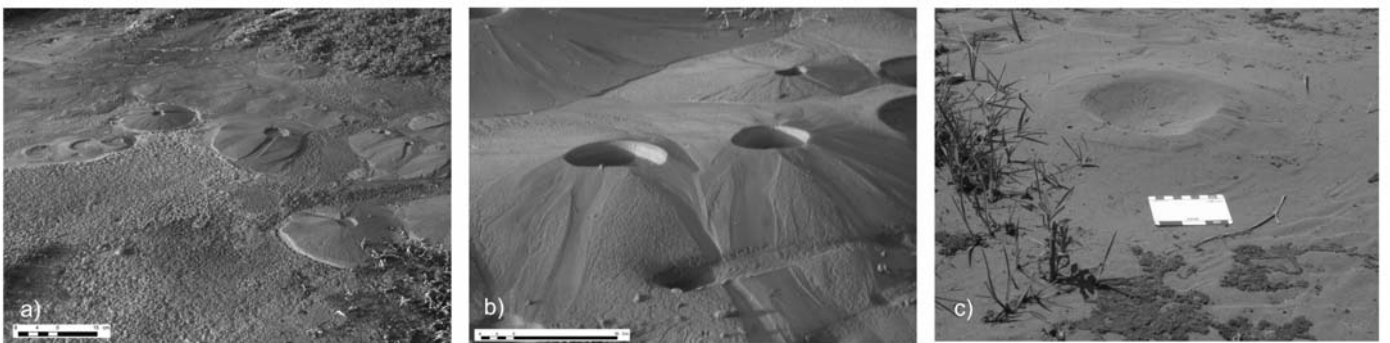


Figura 11: Típicos volcanes de arena en el sector Cabeza de Toro.



Figura 12: a) Sector Toscana/José Olaya. Grietas de hasta 1 m de ancho y profundidad y fracturas en echelón con emanaciones de agua y lodo; b) Volcanes de arena a lo largo de una grieta longitudinal, sector Manrique; c) Alineamiento de estructuras, sector Canta Gallo.

Huacarpana, la carretera y rutas vecinales presentaron pequeñas caídas de detritos y algunos bloques de rocas de tamaños inferiores a 0,50 m en Culebrillas. Desde

el km 23 hasta puente Huachingas, ocurrieron grandes caídas de rocas, derrumbes y deslizamientos planares, cuyo volumen acumulado se estimó en 2.600 m³. Entre

Palca-Villa de Arma, ocurrieron caídas de bloques y derrumbes de detritos. Se produjeron un gran número de caída de rocas y derrumbes en un tramo de 4 km, cuyo

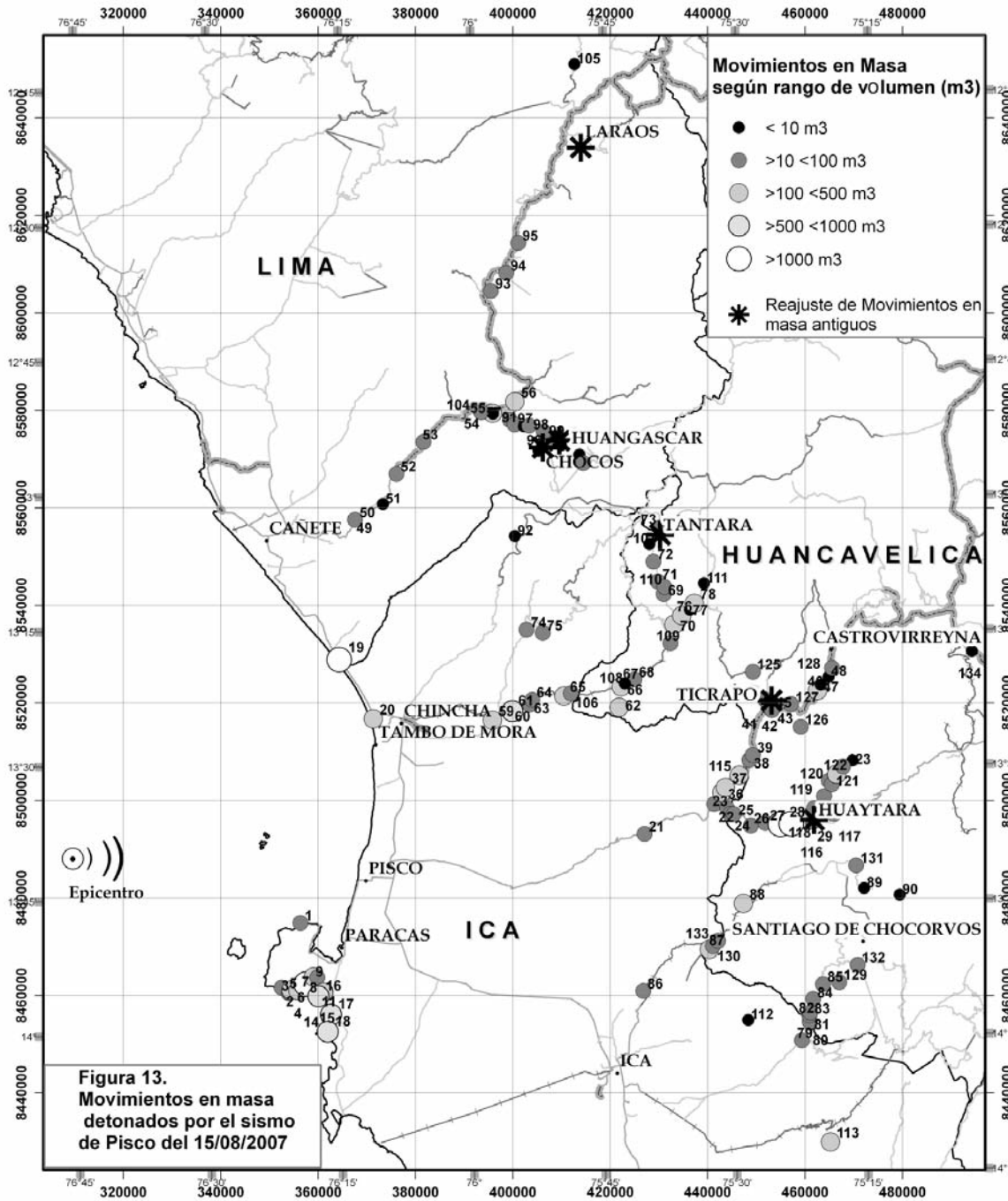


Figura 13. Movimientos en masa detonados por el sismo de Pisco del 15/08/2007

Figura 13: Movimiento en masa detonados por el sismo de Pisco 15/08/2007.

volumen acumulado fue de 460 m³. En el tramo Ica-Santiago de Chocorvos se encontraron varios sectores con derrumbes de rocas y de detritos. Los volúmenes generados por el sismo fueron pequeños, variando entre 10 y 90 m³. El acumulado de estos alcanzó los 260 m³ de rocas y detritos. El tramo Ica-San José de Los Molinos-Santo Domingo de Capillas, mostró en mu-

chos de los taludes limpieza y remoción de escombros, sugiriendo que ocurrieron en su mayoría derrumbes de detritos y algunas caídas de rocas. Se estimó un volumen de remoción de 250 m³ en un tramo de 6 kilómetros. Los ejemplos que aún se pudieron apreciar de acuerdo a su magnitud se dieron en el sector de Socabón, en 1,5 km de carretera, donde se estimó un

volumen de 150 m³. Otros sectores se encuentran entre Tambo y Capilla y en el cerro Huayñacancha, que en conjunto representan un volumen de 427 m³. Las laderas naturales de los valles o cuencas principales, a diferencia de los tramos de carreteras presentaron movimientos en masa en las laderas superiores de montañas, zonas disectadas por cárcavas y en los

TIPO DE MM - NÚMERO DE OCURRENCIAS Y VOLUMEN ACUMULATIVO

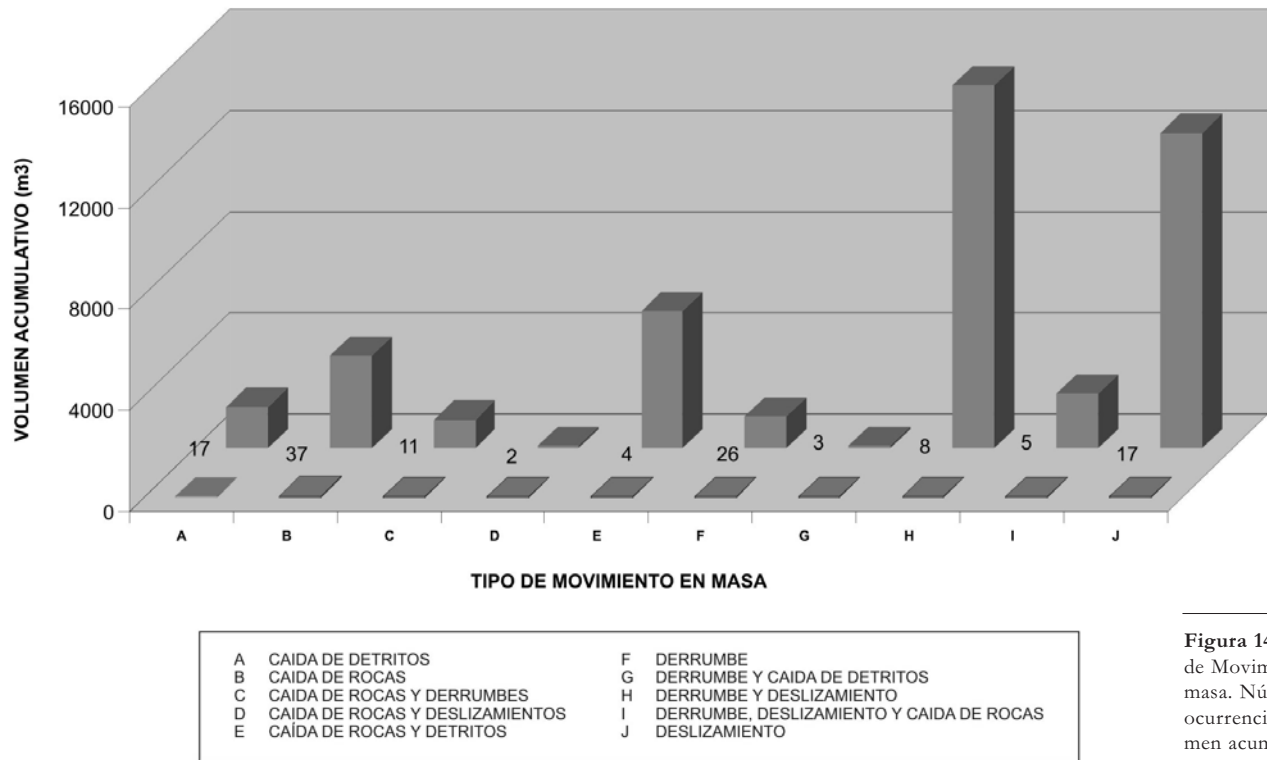


Figura 14: Tipo de Movimiento en masa. Número de ocurrencia y volumen acumulativo.

CLASE DE VOLUMEN DE MM V/S NÚMERO DE EVENTOS

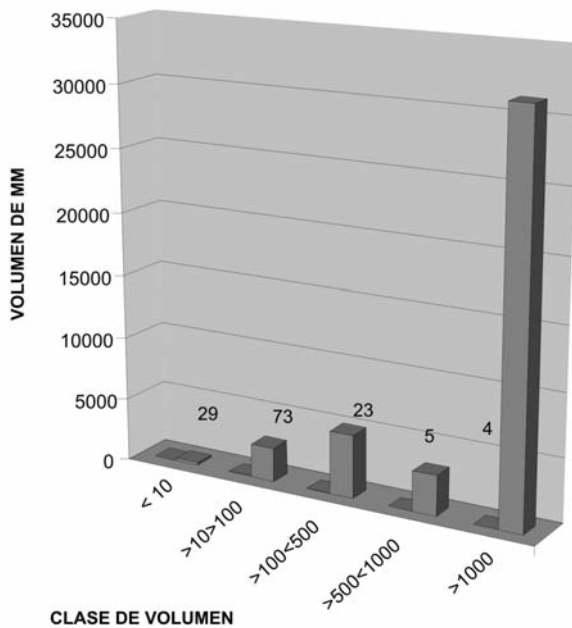


Figura 15: Clase de volumen de movimiento en masa versus número de eventos.

VOLUMEN COMPARATIVO DE MM EN TALUDES Y LADERAS

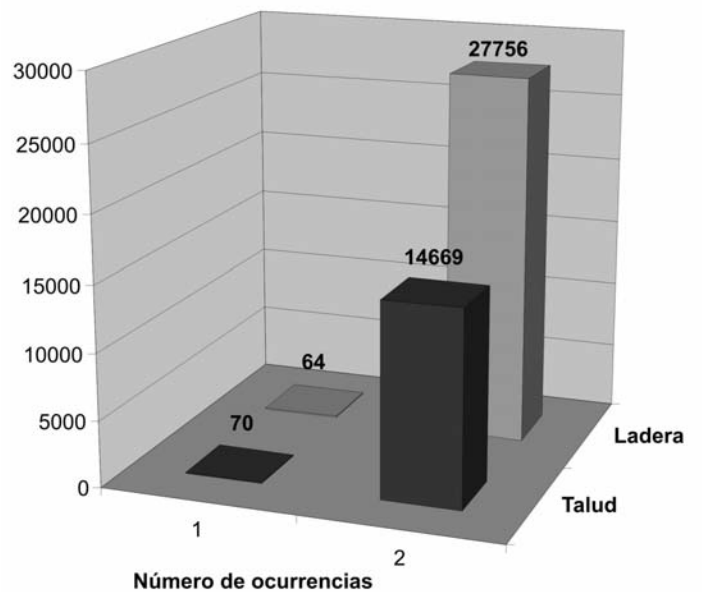


Figura 16: Volumen comparativo de movimiento en masa en taludes y laderas.



Figura 17 : Deslizamientos (a), agrietamientos (b), cuñas (c), derrumbes y caída de rocas (d), en los acantilados de la reserva nacional de Paracas.

bordes libres de terrazas, en las márgenes de los ríos (Fig. 18). Las remociones superficiales de material detrítico se dieron en forma de caída de detritos, derrumbes y caídas de rocas; los deslizamientos activados son muy escasos, pero se dan algunas pequeñas reactivaciones de procesos ya existentes. Allí probablemente favorecieron los movimientos: el tipo de suelo, presencia de humedad y su inestabilidad intrínseca. Los volúmenes acumulados de la remoción de laderas naturales, en las cuencas son los siguientes: Cañete: 240 m³, San Juan-Chincha: 275 m³, Pisco: 6161 m³ e Ica: 150 m³.

Reajuste y/o reactivación en depósitos de movimientos de masas antiguos

El área evaluada presenta depósitos antiguos de movimientos en masa de gran dimensión (avalanchas de rocas y deslizamientos), que originaron cierres de valles fluviales en épocas pasadas. Sus dimensiones implican, en el pasado reciente, movimientos en masa gigantescos, probablemente detonados por sismos o cambios climáticos importantes.

En Laraos, un depósito de avalancha de rocas originó un cierre de valle de 200 m de altura el cual mantiene su cierre natural. El volumen deslizado fue de aproximadamente 0,08 km³. Colapso de vivien-

das y de un colegio y rajaduras en muchas de ellas se presentaron en la cima del depósito, asociados a un reacomodo de materiales de la avalancha (Fig. 20). En Huan-gascar, ubicado sobre la ladera de un antiguo depósito de deslizamiento de volumen estimado en 0,7 km³; el sismo indujo agrietamientos en las viviendas del pueblo ubicadas en la parte alta, en el colegio, la iglesia y la comisaría. En Chocos, ubicado sobre un depósito de deslizamiento antiguo, con un volumen de 0,2 km³, al igual que en Laraos y Huangascar, las viviendas en la parte alta del depósito presentaron severos daños. Por la similitud en los daños de las edificaciones y su ubi-



Figura 18: Deslizamiento planar (a), caída de rocas (b) y derrumbe (c), detonados por el sismo que afectaron tramos de las carreteras de penetración a la sierra.

cación sobre depósitos de movimientos de masa antiguos, las localidades de Tantará, Huaytará y Ticrapo (Huancavelica) también habrían sido afectadas por reajustes de antiguos depósitos de movimientos de masas (Fig. 13).

La granulometría de estos depósitos, compuesta por mezcla de grandes bloques de rocas, envueltos en una matriz fina (limo-arenosa o limo-arcillosa), así como su antigüedad, condiciona su grado de cohesión. Con el sacudimiento sísmico, sufrieron un reacomodo, generando pequeños asentamientos de terreno, con influencia directa sobre las viviendas que se ubican sobre ellos.

Respecto a los depósitos de movimientos en masa recientes, éstos se reactivaron muy levemente, principalmente ocurrieron pequeños derrumbes hacia sus caras libres, como por ejemplo en el valle del río Quito Arma, afluente del río Huaytará (cuenca Pisco). Allí, entre las localidades de Colcapampa, Huayacundo Arma y Mutanga, sobre ambos márgenes del río, se pueden observar escarpas, antiguas y recientes, de deslizamientos.

TSUNAMIS

A lo largo del litoral de la costa entre Ica y el sur de Lima (Cañete), se pudo observar la presencia de inundación por olas de tsunami, en diferente grado como consecuencia del sismo, y cuyos efectos se dieron en función a la morfología del litoral. El mayor impacto ocurrió en la bahía de Pisco y la península de Paracas (Fig. 21). En la reserva fueron afectadas las playas de El Carmen (entre El Museo y Garita de la reserva), las playas Lagunillas, Yumaque, Salinas, Mendieta-Playón, Laguna Grande, Chucho, Tunga y Ventosa en la bahía de Independencia (Fig. 21). También afectó sectores de Pisco Playa, del Grupo Aéreo N° 5 y Playa Chaco-localidad de Paracas (Zavala 2007). En este último caso inundó viviendas y casas de playa y afectó gran parte de su capacidad hotelera. Las olas del tsunami se presentaron en tres oportunidades, según las encuestas a los pobladores llegando a alcanzar en algunos

sectores alturas de 4 a 6 m, y un *run up* de hasta 10 m en playa Yumaque (DHN 2007). Los depósitos de estas tres olas se pueden apreciar en el área de inundación de Lagunillas, donde se efectuaron calicatas de exploración.

Hacia el norte de la localidad de Pisco se produjo menor invasión marina, generalmente en zonas de playa. Fueron afectadas algunas áreas agrícolas del valle inferior de Pisco; avícolas ubicadas muy cerca del litoral, entre playa Jahuay y playa Wakama y finalmente el sector de Verde y Tambo de Mora (Chincha). Un grado de afectación menor se dio en las playas de Cañete y Lima.

INTENSIDAD MACROSÍSMICA INQUA

Una nueva escala de intensidad macrosísmica propuesta por la Subcomisión de Paleosismicidad de INQUA (*EEE Intensity Scale*), es utilizada para calibrar los efectos de los terremotos históricos e instrumentales sobre el terreno, empleando criterios geológicos y geomorfológicos producidos sobre el paisaje y medio ambiente en general (Michetti *et al.* 2007). Esta propuesta es útil además para el análisis de peligrosidad sísmica en el desarrollo y expansión de zonas urbanas, obras de ingeniería, etc.

Las apreciaciones geológicas y geomorfológicas de deformaciones superficiales, movimientos de masas y tsunamis, utilizando los formatos propuestos, permitió indicar que el sismo de Pisco alcanzó una intensidad INQUA entre VII y VIII. Los efectos primarios como longitudes de



Figura 19: Dos ejemplos de movimientos en masa en las laderas naturales, detonados por el sismo; caídas de detritos y rocas en las laderas o vertientes.



Figura 20: Laraos a) Ubicada sobre antiguo deslizamiento; b) Reacomodo del depósito originó daños en las viviendas ubicadas en la cima del depósito.

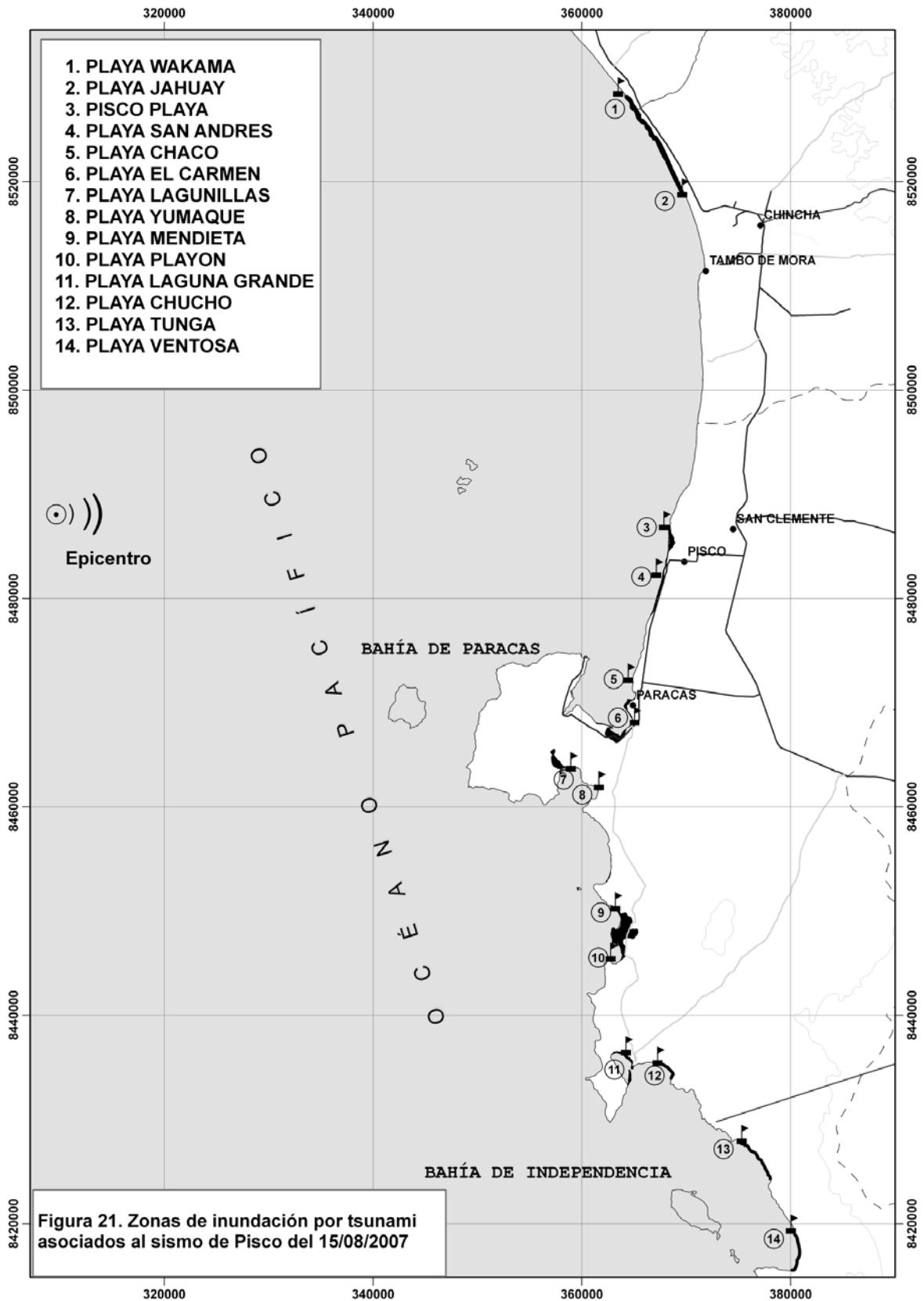


Figura 21: Zonas de inundación por tsunami asociadas al sismo de Pisco 15/08/2009.



Figura 22: Huellas de altura de inundación por tsunami (a) y efectos sobre áreas agrícolas (b) y puertos (c) en las localidades de Paracas y Pisco.

ruptura superficial fueron del orden de hasta cientos de metros, los máximos desplazamientos superficiales de deformación fueron del orden de centímetros. El área afectada con efectos secundarios se extendió entre 10 y 100 kilómetros. Los movimientos en masa ocurridos tanto en la zona costera como en la andina se dieron en un área aproximada de 22.500 km². Este valor ploteado en la gráfica que relaciona el área afectada por movimientos en masa y magnitud sísmica (Keefer 1984), presenta un alto grado de correlación para el sismo de Pisco, indicando una magnitud entre 7,5 - 8,0 (Fig. 23). Los efectos superficiales originados por el sismo utilizando la escala INQUA, indican una intensidad VII-VIII. Ésta, comparada con otros mapas de intensidades sísmicas generados por el Instituto Geofísico del Perú (IGP), y el Servicio Geológico de los Estados Uni-

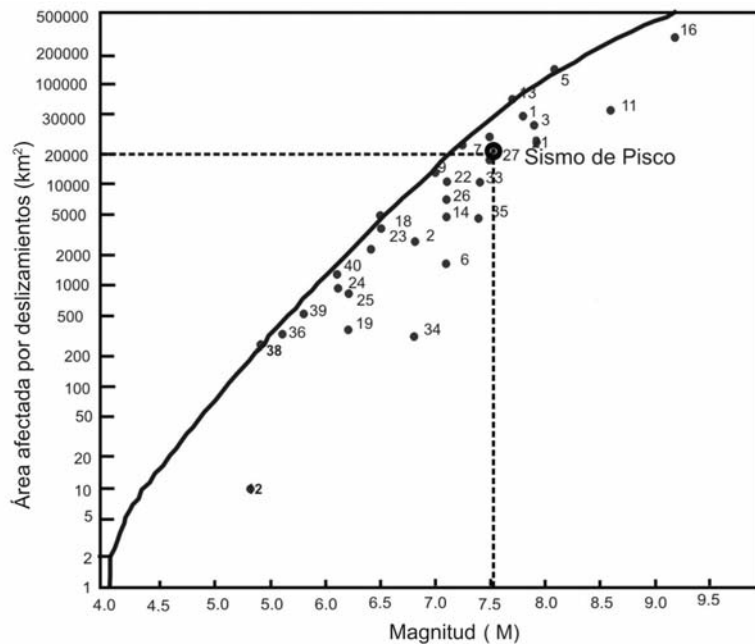


Figura 23: Área afectada por deslizamientos para sismos de diferente magnitud (Ms), comparada con curva propuesta por Keefer (1984).

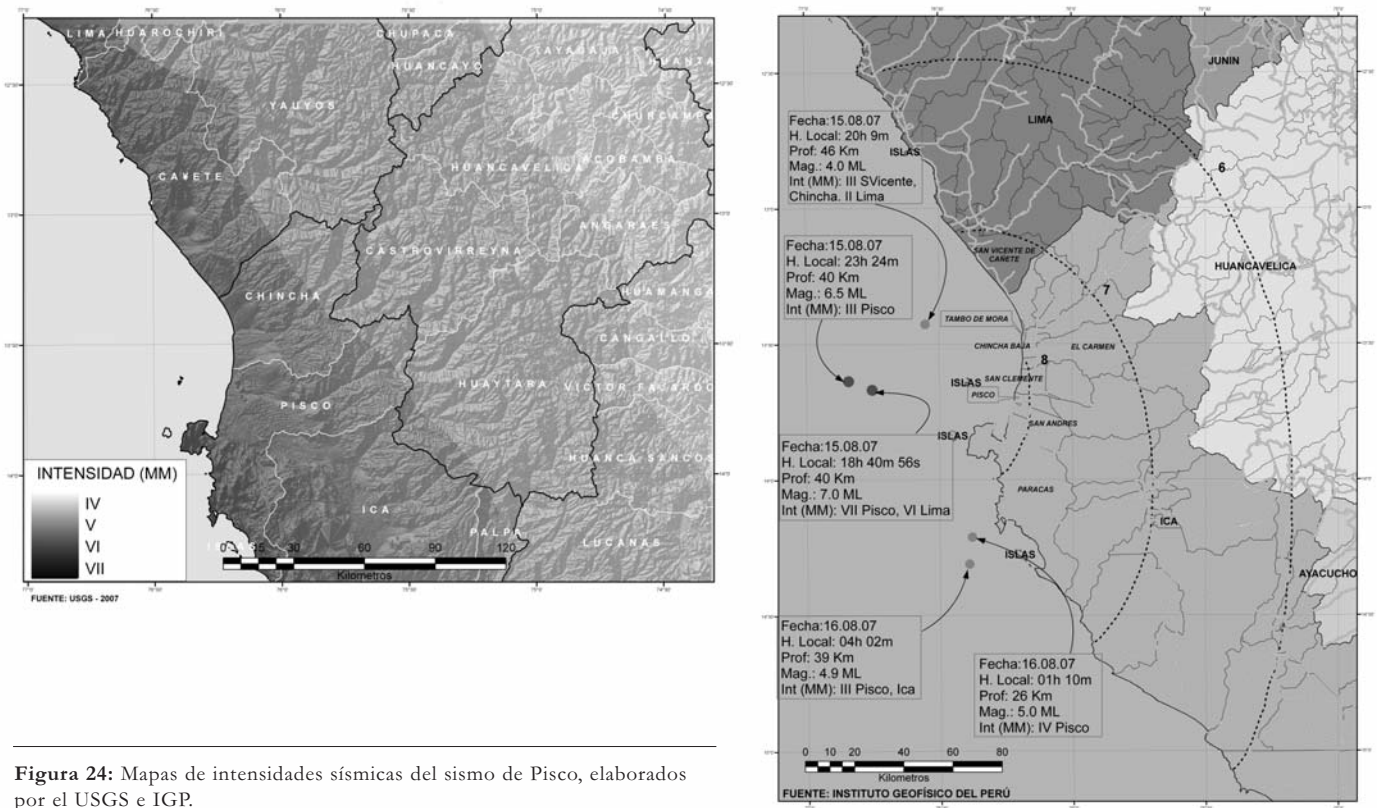


Figura 24: Mapas de intensidades sísmicas del sismo de Pisco, elaborados por el USGS e IGP.

dos (USGS), muestra una gran correlación (Fig. 24).

CONCLUSIONES E INTERPRETACIONES

1. De acuerdo a las características de daños apreciados en el área epicentral, los procesos geológicos asociados al sismo, en orden de mayor afectación fueron:

- Licuación de suelos en áreas aluviales con nivel freático superficial y/o zonas de humedales y litorales; incluye sedimentos de la Formación Pisco.
- Tsunamis a lo largo de la costa con efectos sobre balnearios, áreas pobladas y de cultivo, carreteras y trochas, muelles o embarcaderos y zonas avícolas.
- Fracturamientos, deslizamientos en cuñas, derrumbes y caídas de rocas en secuencias de la Formación Paracas específicamente dentro de la Reserva Nacional de Paracas, que afectaron gran parte de su potencial turístico.
- Movimientos en masa distribuidos en orden de mayor afectación en: a) Acantilados

de la reserva; b) Taludes de las carreteras de penetración a la sierra; c) Laderas medias y superiores de montañas con caídas de detritos; d) Caídas de detritos en sedimentos de las Formaciones Cañete y Topará en la zona costanera y depósitos eólicos recientes; e) Reactivación de depósitos de movimientos de masas antiguos (Laraos, Chocos).

2. Las deformaciones superficiales reconocidas no están vinculadas con rupturas primarias o reactivaciones de estructuras preexistentes. Son el resultado de procesos asociados al sacudimiento cosísmico (*ground shaking*); tales como expansión lateral (*lateral spread*) y licuación. Las rupturas observadas en el Penal de Tambo de Mora-Sunampe, corresponden a expansión lateral amplificadas por efecto de borde libre producido por el desnivel topográfico al pie del acantilado. De confirmarse esta hipótesis con información de subsuelo, ello implica que el acantilado en toda esta zona, no solo es susceptible a generar deslizamientos e inestabilidades de ladera durante un sismo, sino también el des-

arrollo de rupturas y hundimientos importantes al pie del mismo.

3. Los efectos de procesos o deformaciones superficiales originados por el sismo indican una intensidad sísmica de grado VII a VIII utilizando la escala INQUA.

4. Excepto los daños causados por caídas de rocas en las carreteras hacia la sierra y acantilados de la Reserva Nacional de Paracas, en general no se produjeron grandes daños por movimientos de masas. La mitad de ellos se dieron en taludes artificiales. Son pequeños en comparación con algunos eventos prehistóricos identificados y es importante definir cuál es la causa que originó grandes deslizamientos, en el pasado, en la costa como en la región andina.

5. En las poblaciones costeras afectadas por el sismo (Pisco, Chincha, Ica y Cañete), será necesario realizar estudios geotécnicos y de microzonificación sísmica, para determinar los parámetros adecuados de construcción en los diferentes tipos de suelo existentes, en las áreas que se piensan repoblar o en todo caso reubicar.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Costa, C. y Valderrama, P. 2007. Deformaciones Superficiales asociadas al sismo de Pisco del 15/08/2007. INGEMMET, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico. Informe Interno, 40p., Lima.
- DHN 2007. Informe Post-Tsunami. Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina (Agosto, 2007). Informe Interno, 46 p., Lima.
- Fernández, M. 1993. Geología de los Cuadrángulos de Pisco, Guadalupe, Punta Grande, Ica y Córdova. Carta Geológica Nacional INGEMMET, Boletín 47, Serie A, 62p., Lima
- INGEMMET 2003. Estudio de Riesgos Geológicos del Perú, Franja N° 3. Dirección de Geología Ambiental. Boletín N° 28, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 373p., Lima.
- Keefer, D.K. 1984. Landslides Caused by Earthquakes: Geological Society of America Bulletin 95: 406-421.
- Macharé, J., Laureyro, J. y Sebrier, M. 1991. Actualización del mapa neotectónico del Perú escala 1: 2.000.0000. 7° Congreso Peruano de Geología, Actas: 23-28, Lima.
- Michetti, A.M., Audemard, F.A., Azuma, T., Clague, J., Comerci, V., Esposito, E., Guerriero, L., Gürnipar, A., Mecalpin, J., Mohammadioun, B., Mörner, N.A., Ota, Y., Porfido, S., Roghazin, S., Serva, L., Tatevossian, E y Vittori, E. 2007. INQUA Environmental Seismic Intensity Scale. INQUA Scale Project, APAT (Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici, Italia).
- Salazar, H. y Landa, C. 1993. Geología de los Cuadrángulos de Mala, Lunahuaná, Tupe, Conayca, Chinchá, Tantaray y Castrovirreyna. Carta Geológica Nacional, INGEMMET, Boletín 44, Serie A, 105p., Lima.
- Silgado, E. 1978. Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974). Geodinámica e Ingeniería Geológica, Instituto de Geología y Minería, Boletín 3, Serie C, 131p., Lima.
- Tavera, H., Bernal, I. y Salas, H. 2007. El Terremoto de Pisco del 15 de agosto de 2007: Aspectos Sismológicos. El Terremoto de Pisco del 15 de agosto de 2007, Volumen Especial - IGP (Versión preliminar), 10p., Lima.
- Zavala, B. 2007. Efectos geológicos del sismo de Pisco en la Reserva Nacional de Paracas. INGEMMET, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, Informe interno, 49p., Lima.
- Zavala, B., Valderrama, P. Yatayhua, J. 2007a. Procesos geológicos cosísmicos e instrumentación sísmica efectuada en zonas afectadas el sismo de pisco del 15/08/2007. Informe Interno, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, INGEMMET, 72 p., Lima.
- Zavala, B., Valderrama, P., Costa, C. y Hermanns, R. 2007b. Movimientos en masa y deformaciones superficiales asociadas al sismo de Pisco del 15/08/2007. Informe Interno, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, INGEMMET, 171 p., Lima.

Recibido: 12 de junio, 2009
Aceptado: 27 de octubre, 2009