

RESPUESTA DINÁMICA DE LOS SUELOS DE LOS DISTRITOS DE LA PUNTA-CALLAO EN LIMA, PERÚ

Jorge E. Alva Hurtado (1)
Carlos E. Huamán Egoávil (2)
T. Ohtsuki (3)

RESUMEN

Los terremotos reciente ocurridos en Lima, capital del Perú, en 1940, 1966 y 1974, han ocasionado niveles leves de daño en el centro de la ciudad; sin embargo, han sido reportados daños severos en algunos distritos, tales como La Molina, Barranco, Chorrillos y La Punta-Callao, donde las características del subsuelo son muy diferentes a aquellas encontradas en el Centro de Lima. En este artículo se presentan los resultados de los estudios de microzonificación sísmica ejecutados por el CISMID en los distritos de La Punta-Callao.

Las condiciones del subsuelo en estos distritos se determinaron recopilando la información geotécnica disponible y realizando sondajes de exploración y ensayos de laboratorio. Luego, se ejecutó un programa de medición de microtrepidaciones para determinar los períodos de vibración ambiental del suelo, encontrándose valores que muestran una buena correlación con las características del subsuelo. También, con la muy limitada información disponible sobre las condiciones del subsuelo, se llevaron a cabo algunos análisis de amplificación sísmica para determinar los espectros de respuesta de condiciones típicas del subsuelo. Se concluyó que las condiciones de suelo blando existentes en La Punta-Callao modificarán la respuesta del suelo, en comparación con los suelos del centro de Lima. Finalmente, el área estudiada es dividida en cuatro zonas, de acuerdo a las condiciones del suelo, capacidades portantes, períodos predominantes, nivel freático, efectos sísmicos en el pasado y comportamiento probable del suelo bajo fuerzas sísmicas. Se proponen modificaciones al Reglamento Nacional de Construcciones del Perú vigente.

-
- (1) Profesor y Director, Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
 - (2) Investigador Asociado, Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
 - (3) Profesor Honorario de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú y Presidente de Tokyo Soil Research

Ponencia Presentada en el XIII Congreso Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Nueva Delhi, India, 1994

INTRODUCCIÓN

A partir de los terremotos ocurridos en 1940, 1966 y 1974 en la ciudad de Lima, quedó establecido que el centro de la ciudad había sufrido menor intensidad de daños que algunos distritos periféricos, tales como La Molina, Barranco, Chorrillos y La Punta-Callao. Las condiciones del subsuelo en el centro de Lima, corresponden a un depósito de grava aluvial de gran espesor con nivel freático profundo, mientras que en los distritos mencionados pueden encontrarse suelos finos con nivel freático superficial. En este artículo se describen los avances en los trabajos de microzonificación sísmica de Lima que ejecuta el CISMID.

La ciudad de Lima está ubicada en la costa oeste de Sudamérica, sobre una franja desértica entre el Océano Pacífico y la Cordillera de los Andes. Los distritos de La Punta-Callao están ubicados al oeste de la ciudad de Lima, al sur de la desembocadura del río Rímac al Océano Pacífico. Los distritos de La Punta-Callao son muy importantes para la economía peruana, debido a la presencia del puerto del Callao, el puerto más grande del Perú. En este puerto se desarrollan actividades comerciales, navales y pesqueras. Los distritos tienen una densa infraestructura urbana y cerca de un millón de habitantes.

INTENSIDADES SÍSMICAS OBSERVADAS

La región es un segmento del Cinturón Circum-Pacífico, que es una de las regiones sísmicas más activas en el mundo. La actividad sísmica en esta región es producida principalmente por la subducción de la Placa de Nazca debajo de la Placa Sudamericana. Silgado (1978) ha recopilado información histórica acerca de los eventos sísmicos más importantes ocurridos en el Perú desde el Siglo XVI al presente. En base a este estudio y a su reinterpretación, Alva-Hurtado et al (1984) han propuesto un mapa de distribución de máximas intensidades sísmicas en el Perú, el cual se muestra en la Figura 1. De este mapa puede notarse que un valor de X en la escala de Intensidad de Mercalli Modificada ha sido asignado a la ciudad de Lima. La actividad sísmica es más alta a lo largo de la costa del Perú, aunque también se presenta una zona de sismos superficiales en la selva alta, la cual es llamada zona Sub-andina.

La ciudad de Lima ha experimentado en los pasados 50 años, seis sismos con magnitudes M_s en el rango de 6 a 7.6. Estos sismos han causado niveles de daño relativamente bajos en la ciudad, a pesar de los valores altos de aceleraciones (0.40 g durante el terremoto de 1966), y duraciones largas del movimiento fuerte (1 minuto durante el terremoto de 1974), Repetto et al (1980).

Sin embargo, durante los sismos recientes han sido observados daños severos en

algunas áreas fuera del centro de la ciudad de Lima, como en los distritos de La Punta-Callao. Durante el sismo del 3 de Octubre de 1974, el puerto del Callao sufrió considerable daño en sus instalaciones navales y portuarias. Se registraron intensidades máximas de IX y VIII MM para La Punta y El Callao, respectivamente. Los mayores daños se presentaron en la Escuela Naval de La Punta y en la Oficina de Correos del Callao. La falla de las torres de un silo se registró en el puerto. La Figura 2 muestra el mapa oficial de distribución de intensidades del sismo del 3 de Octubre de 1974, según el Instituto Geofísico del Perú, Giesecke et al (1980).

CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS

La ciudad de Lima está localizada principalmente en un depósito fluvio-aluvional de características variables, correspondientes al cono deyectivo Cuaternario de los ríos Rímac y Chillón. Los cerros que rodean la ciudad de Lima están constituidos principalmente por rocas intrusivas y materiales de período Cretáceo. La mayor parte de la ciudad está localizada sobre una superficie plana. La Figura 3 muestra un mapa simplificado de las condiciones geológicas de la ciudad, preparado por Martínez-Vargas (1986). En general, el perfil estratigráfico del subsuelo en El Callao consiste de rellenos superficiales que cubren una capa de materiales finos, tales como arenas, limos, arcillas y algunas veces turba. Por debajo del material fino se encuentra el conglomerado de Lima a profundidades variables. En La Punta existe una secuencia de grava mal graduada entremezclada de manera no uniforme con limos y arenas, con espesores que varían de 7 a 15 metros. Por debajo de esta capa se encuentra arenas finas con lentes de limos y arcillas cubriendo el conglomerado de Lima a los 30 metros de profundidad. El nivel freático decrece de 2 metros de profundidad en La Punta a 8 metros en la zona este del Callao.

En base a la recopilación de estudios geotécnicos existentes, perforaciones de pozos de agua subterránea y exploración de suelos y muestreo, se ha propuesto una zonificación geotécnica para La Punta-Callao. Esta zonificación se presenta en la Figura 4, Huamán (1991).

ZONA I: El perfil del suelo consiste de arenas limosas y limos arcillosos interestratificados, con espesores hasta de 5 metros, suprayaciendo al conglomerado de Lima (mezcla de bolones, grava y arena). Las capacidades portantes son del orden de 1.0 a 2.0 kg/cm² para cimentaciones superficiales, y superior a los 4 kg/cm² si la cimentación alcanza la grava de Lima. El nivel freático está profundo.

ZONA II: El perfil del suelo consiste de suelos blandos con espesores de hasta 10 a 15 metros. Los suelos son limos arcillosos, arenas limosas con turba y arcillas de alta plasticidad. Los suelos orgánicos producen asentamientos en las edificaciones y hundimientos en las pistas. Las capacidades portantes son menores que 1 kg/cm² para cimentaciones superficiales. Es recomendable el empleo de vigas de cimentación conectadas. Para estructuras de más de 2

pisos de altura se sugiere emplear plateas de cimentación y pilotes para estructuras de más de 4 pisos. El nivel freático se encuentra de 1.0 a 2.5 metros de profundidad.

ZONA III: Esta área es paralela a la línea de la costa. El perfil de suelo está compuesto por rellenos superficiales que cubren una capa de material fino. El puerto de El Callao se localiza en esta zona. El terreno es errático debido a los trabajos de relleno realizados en el pasado. En el área del puerto existen arcillas limosas orgánicas y cerca del puerto el relleno consiste de grava y grava limosa. El relleno tiene profundidades variables hasta los 11 metros, donde aparece el conglomerado. Para estructuras pesadas en esta área se emplea pilotes del tipo de capacidad por punta. El nivel freático varía de 1.5 a 3.0 metros.

ZONA IV: Esta área comprende La Punta y Chucuito. El perfil de suelo consiste de un relleno gravoso artificial de 3 metros de espesor, suelo y a veces mezclado con limo. Este relleno suprayace suelos granulares gruesos con un espesor promedio de 12 metros. Debajo del relleno existen materiales finos con más de 20 metros de profundidad en La Punta y 28 metros en el área de la Escuela Naval. Finalmente, el conglomerado aparece en la parte inferior del perfil estratigráfico. El nivel freático varía de 1.5 a 3.5 metros de profundidad. Se recomienda valores de capacidad portante de 1.5 a 2.0 kg/cm² para cimentaciones superficiales aisladas. Para cargas pesadas se sugiere el empleo de plateas de cimentación. El uso de pilotes no es recomendable en esta zona.

MEDICIÓN DE MICROTREPIDACIONES

Se define a la microtrepidación como la vibración natural del terreno con un período que varía en el rango de 0.05 a 2 seg y una amplitud en el rango de 0.1 a 1 micra. Esta vibración es generada por causas naturales o artificiales. Se emplea un equipo muy sensible para detectar tal vibración. Durante la medición se registra los desplazamientos en dos direcciones horizontales, perpendiculares entre sí, y en la dirección vertical. El período predominante asignado a un lugar es el resultado de promediar los dos períodos predominantes obtenidos en las dos direcciones horizontales perpendiculares. Este tipo de medición se originó en Japón por el Prof. Kanai.

En este estudio se realizaron ensayos de microtrepidaciones en La Punta-Callao para establecer los períodos predominantes del suelo. Se ejecutaron 260 mediciones distribuidas a través de los dos distritos. La Figura 5 presenta el mapa de distribución de períodos para La Punta-Callao. El rango de valores para los períodos predominantes es de 0.10 a 0.70 segundos en esta área. En El Callao, Bellavista y La Perla, los períodos varían entre 0.10 a 0.40 segundos, con un promedio de 0.30 seg, mientras que en la Punta y Chucuito el rango es de 0.40 a 0.70 seg, con un promedio de 0.50 segundos.

Se ha encontrado una buena correlación entre los períodos predominantes medidos y las características geotécnicas del terreno. Por ejemplo, la Zona I, compuesta por conglomerado superficial, tiene los períodos más bajos (menos de 0.1 seg). La Zona II, compuesta por estratos blandos de 7 a 15 metros de profundidad, tiene períodos predominantes de 0.30 seg. La Zona III presenta períodos más largos que la Zona II, con 0.40 seg en promedio, debido a la presencia de rellenos sueltos con profundidades de hasta 10 metros. La Zona IV tiene un período promedio de 0.50 seg, en concordancia con el perfil formado por suelos blandos de 40 metros de profundidad.

También se encontró una buena relación entre la Zona IV, con los valores de períodos predominantes más altos en La Punta-Callao, y los daños en las edificaciones, tales como la Escuela Naval (IX MMI) y otras edificaciones (VIII MMI) en La Punta, durante el sismo del 3 de Octubre de 1974. En el centro de Lima, con un suelo más firme, las intensidades alcanzaron valores de VII MMI.

AMPLIFICACIÓN SÍSMICA

Se ejecutaron estudios de amplificación sísmica en dos perfiles de suelos representativos de La Punta y El Callao, mediante el programa SHAKE, Schnabel et al, (1972). Los perfiles corresponden a la Escuela Naval en La Punta y a la Base Naval en El Callao. Los perfiles de suelo y sus propiedades fueron escogidos de información geotécnica disponible, Huamán (1991). Los sismos de entrada fueron los registros del 17 de Octubre de 1966; 31 de Mayo de 1970 y 3 de Octubre de 1974, cuyos acelerogramas fueron registrados por la estación Parque de la Reserva del Instituto Geofísico del Perú. Los registros fueron escalados a una aceleración máxima de 0.4 g y se supuso que actuaban en la parte inferior de los perfiles de suelo.

La Figura 6 presenta el espectro de aceleración promedio normalizado para los dos perfiles de suelo. Las formas espectrales y las amplificaciones máximas son diferentes. La amplificación máxima del perfil de la Base Naval es el doble que la del perfil de la Escuela Naval, y su forma es más pronunciada. El espectro de la Escuela Naval es más plano y presenta amplificaciones para períodos más largos. Del análisis se propone considerar una platea de diseño de 1.2 seg, más extensa que aquellas propuestas en el Reglamento Nacional de Construcciones. Como comparación, en el Centro de Lima la amplificación se produce entre 0 y 0.55 seg, y la platea de diseño alcanza 0.30 seg (Meneses, 1985). Se establece una clara diferencia entre la respuesta espectral de los perfiles de suelo de La Punta-Callao y el del Centro de Lima. En base al estudio de amplificación sísmica de los suelos de La Punta-Callao, se propone un nuevo suelo más blando para ser incorporado en el Reglamento Nacional de Construcciones.

CONCLUSIONES

1. La distribución de daños sísmicos y su relación con las condiciones del terreno en una ciudad afectada es una importante herramienta de investigación para la microzonificación sísmica. Deberían hacerse esfuerzos especiales para enviar equipos de evaluación después de la ocurrencia de eventos sísmicos.
2. En el Perú, un país en desarrollo con escasos fondos para la investigación, los estudios de microzonificación sísmica están principalmente basados en la distribución de daños, recopilación de información geotécnica, medición de microtrepidaciones y estudios de amplificación sísmica.
3. Las mediciones de microtrepidaciones en La Punta-Callao muestran que los períodos predominantes varían de 0.10 a 0.70 segundos. En La Punta y Chucuito el valor promedio es de 0.50 seg, y en El Callao, Bellavista y La Perla el valor promedio es de 0.30 seg.
4. Los distritos de La Punta-Callao fueron divididos en cuatro zonas de acuerdo a los perfiles de suelo y sus propiedades dinámicas. Existe una buena correlación entre los períodos predominantes medidos por ensayos de microtrepidaciones y las características geotécnicas de los perfiles de suelo.
5. Los estudios de amplificación sísmica de los suelos indican que los espectros de respuesta en La Punta-Callao son distintos de aquellos en el centro de Lima. Se propone que un nuevo tipo de suelo sea incorporado en el Reglamento Nacional de Construcciones, para tomar en cuenta las condiciones de los suelos blandos, tales como aquellos existentes en La Punta-Callao.

RECONOCIMIENTOS

El estudio de investigación descrito en este artículo fue auspiciado por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC). Este apoyo es profundamente reconocido. También los autores agradecen la cooperación de A. Abe, S. Fukumoto y T. Nishimura, de la Tokyo Soil Research Co. Ltd., y J. Meneses, D. Parra y Z. Aguilar del Laboratorio Geotécnico del CISMID.

REFERENCIAS

1. Alva-Hurtado, J.E., Meneses-Loja, J.F. y Guzmán V. (1984), "Distribución de Máximas Intensidades Sísmicas Observadas en el Perú", Memorias del V Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Tacna, Perú.
2. Giesecke, A., Ocola, L., Silgado, E., Herrera, J. y Giuliani, H. (1980), "El Terremoto de Lima del 3 de Octubre de 1974", CERESIS/UNESCO.
3. Huamán-Egoávil, C.E., (1991), "Microzonificación Sísmica de La Punta y El Callao", Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
4. Martínez –Vargas, A. (1986), "Características del Subsuelo en Lima Metropolitana". Memorias del Seminario sobre Diseño y Construcción de Cimentaciones, Comité Peruano de Mecánica de Suelos, Cimentaciones y Mecánica de Rocas, Lima, Perú.
5. Meneses, J. (1985), "Evaluación de Acelerogramas y Determinación de Espectros de Respuesta en Lima", Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
6. Repetto, P., Arango, I. y Seed, H.B. (1980), "Influence of Site Characteristics on Building Damage during the October 3, 1974 Lima Earthquake", Report N° EERC 80-41, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
7. Schnabel, P., Lysmer, J. y Seed, H. (1972). "SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites", Report N° EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
8. Silgado, E. (1978)", Historia de los Sismos más Notables Ocurridos en el Perú (1513-1974)", Instituto de Geología y Minas. Boletín N°3, Serie C, Geodinámica e Ingeniería Geológica, Lima, Perú.

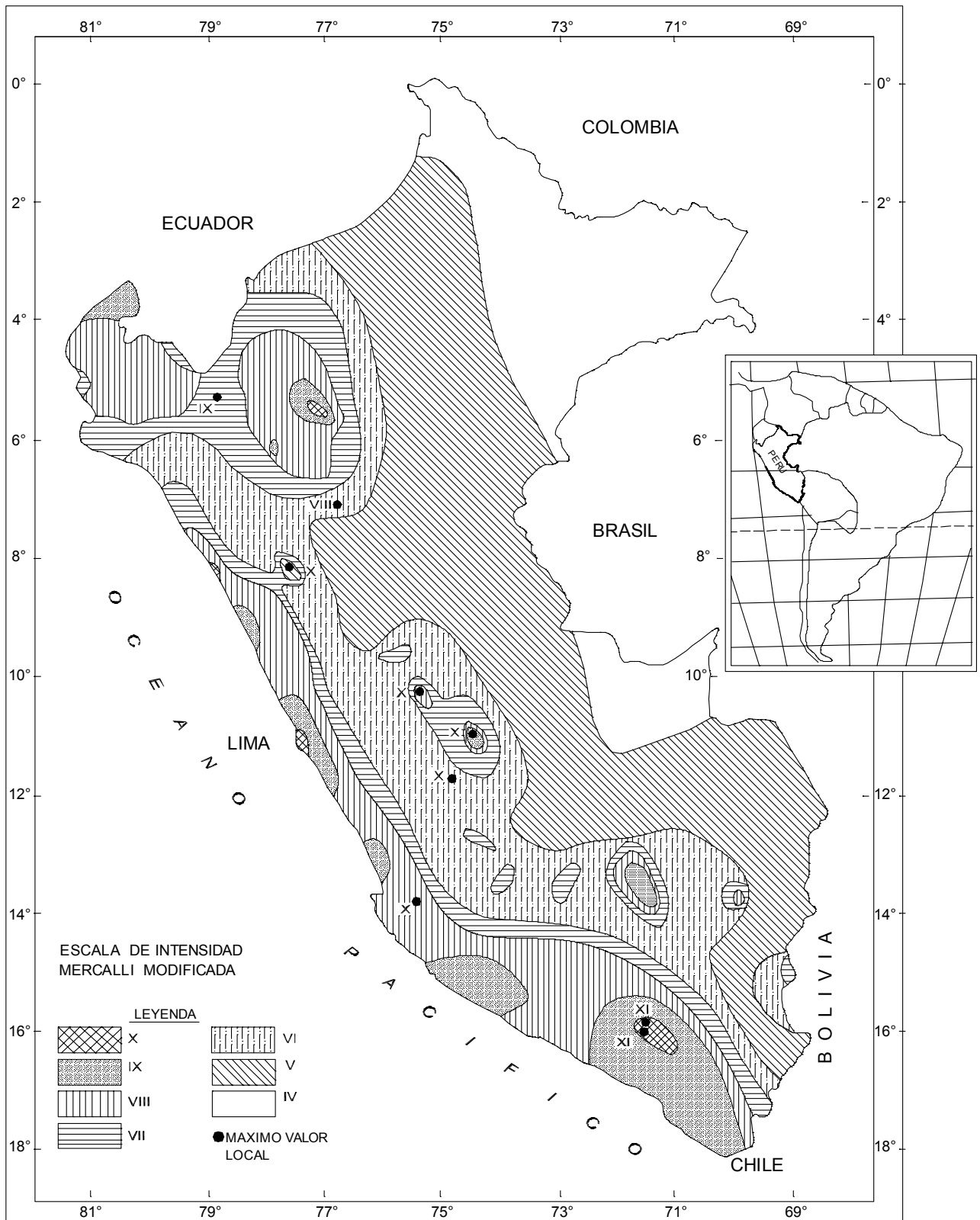


Fig. 1.- Distribucion de maxima intensidades sismicas observadas en Peru Alva et al, (1984)

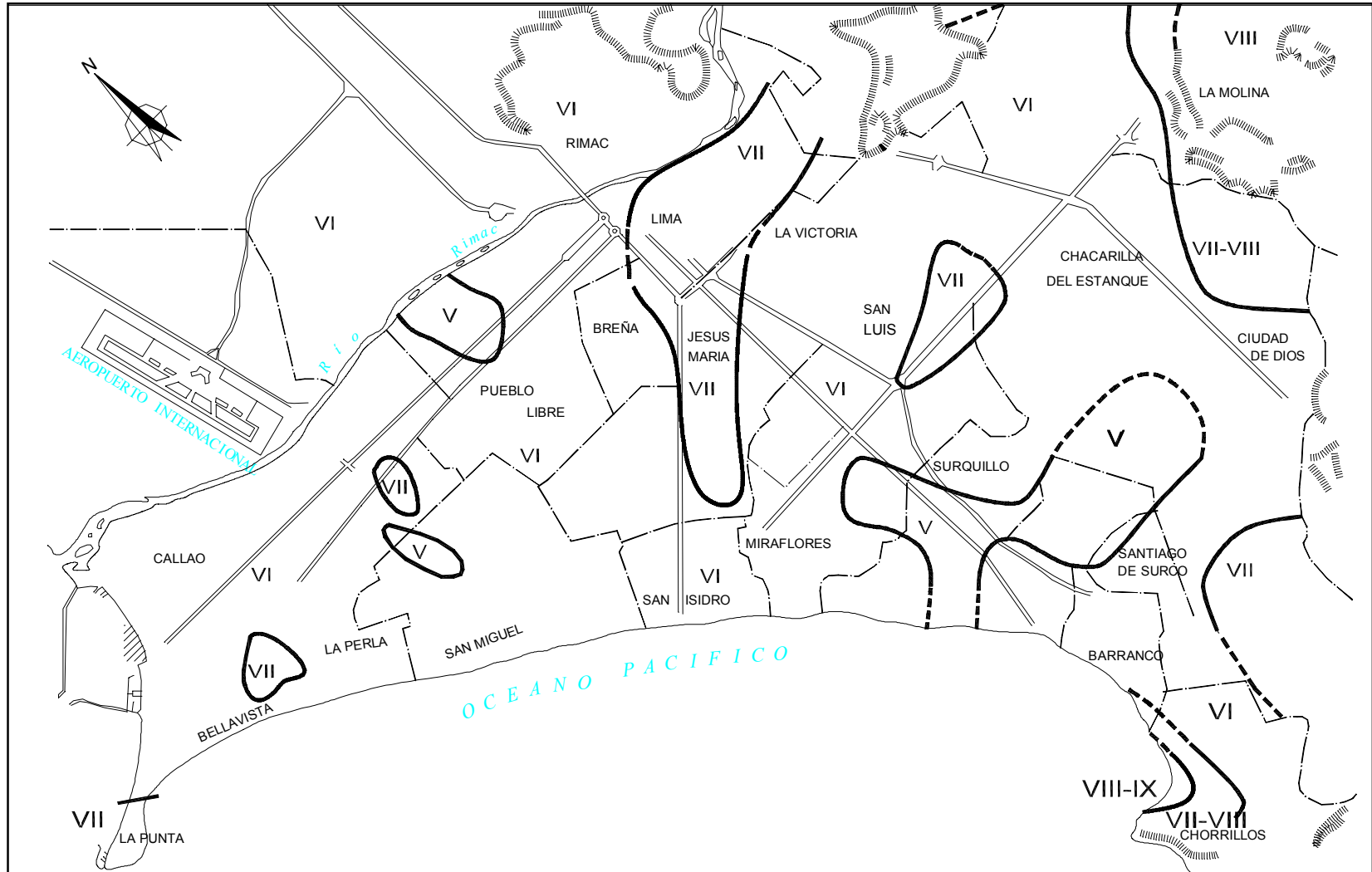
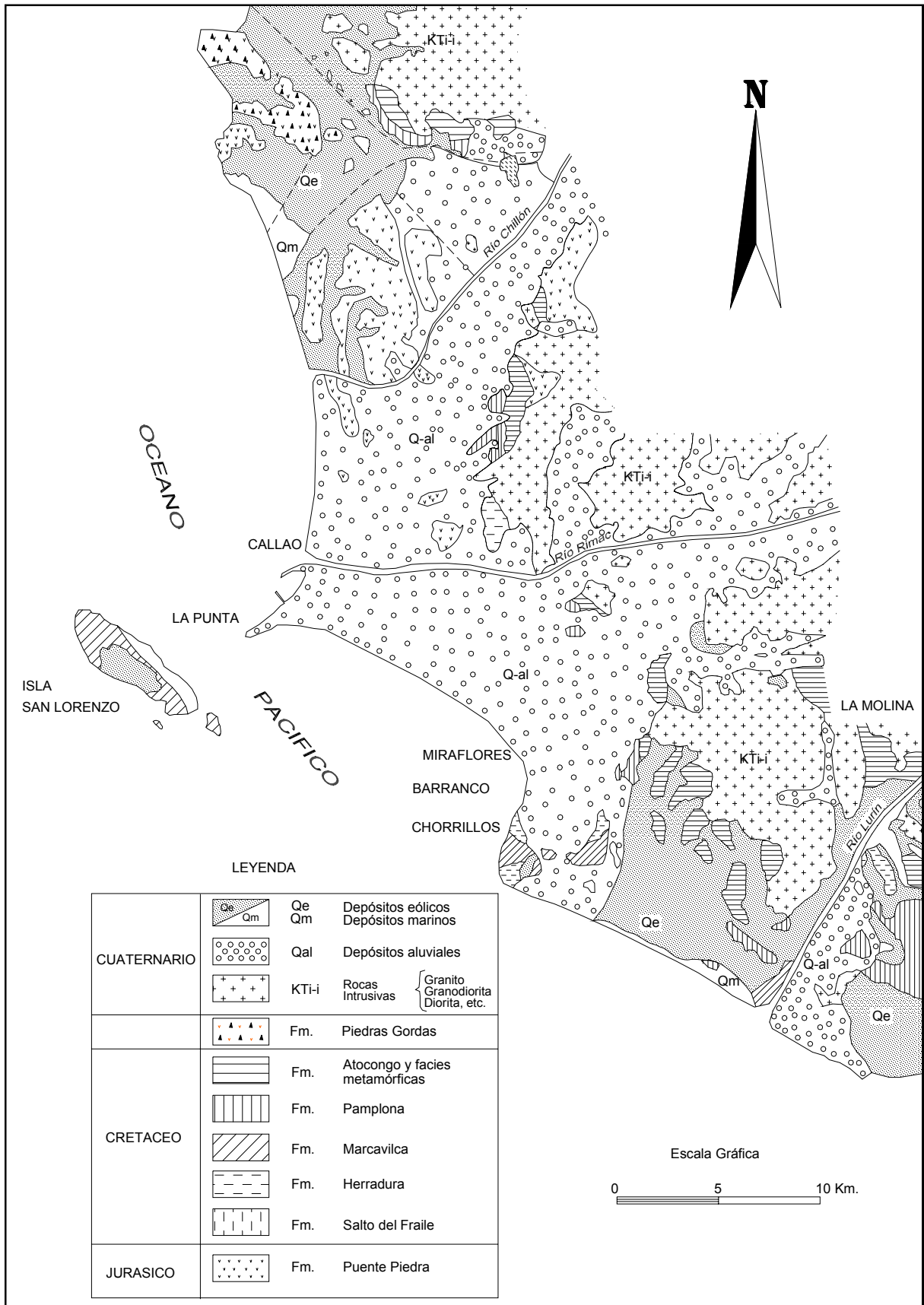


Fig. 2. Distribución de Intensidades MM del Sismo del 3 de Octubre de 1974 en Lima
 Giesecke et al, (1980)



**Fig. 3.- Mapa Geológico de Lima
Martínez, (1986)**

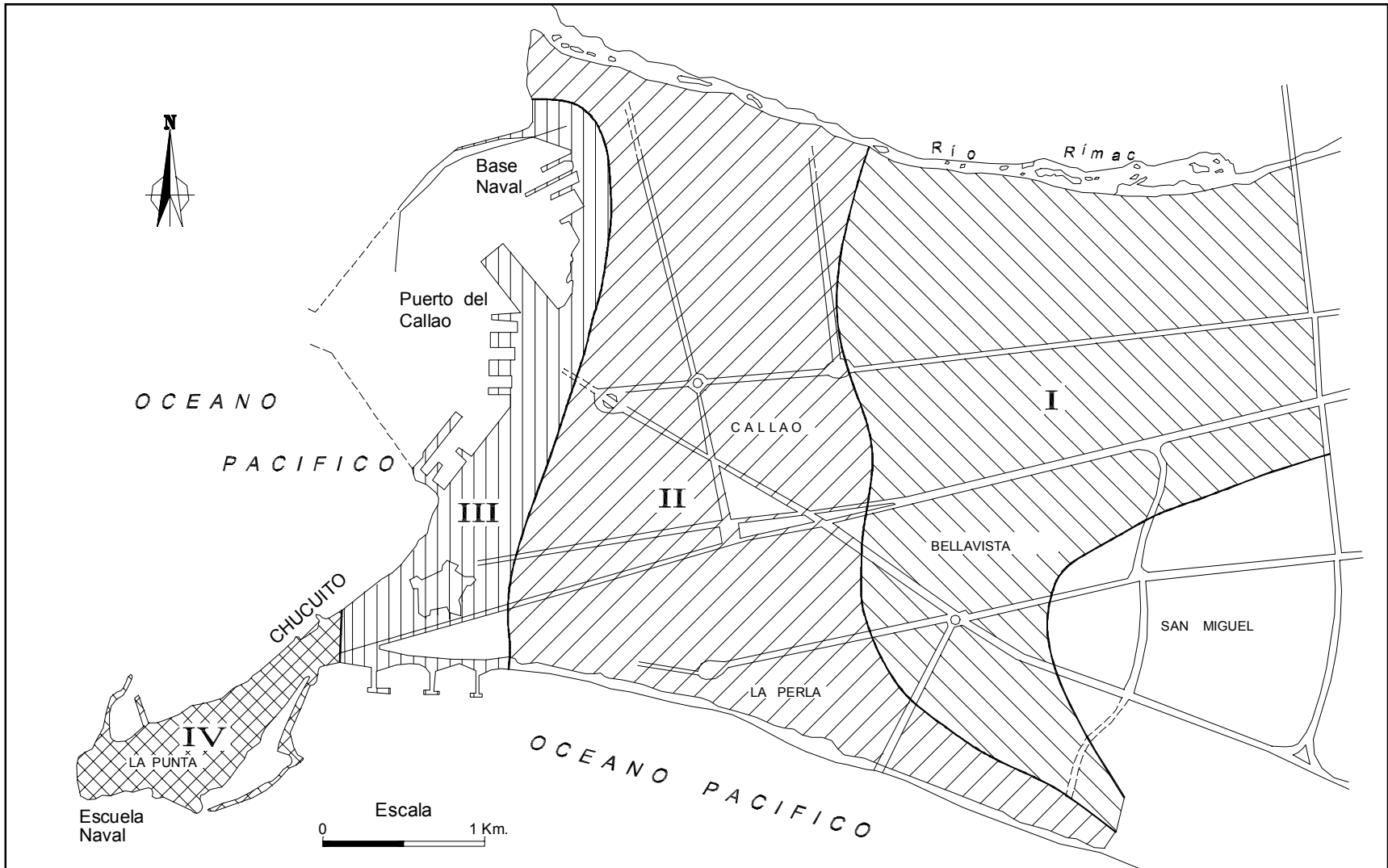


Fig 4. Mapa de Microzonificación de La Punta Callao Huamán, (1991)

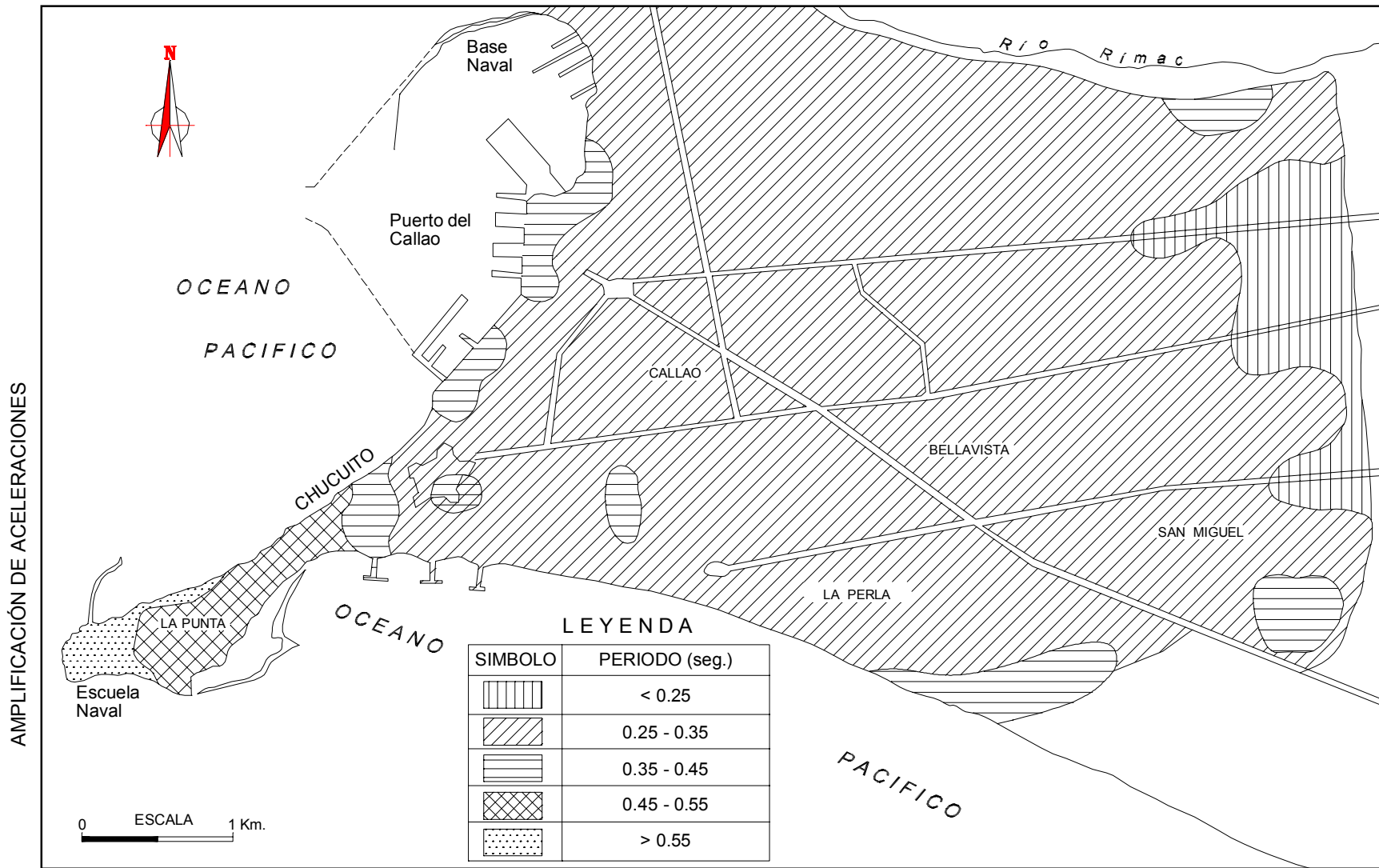


Fig. 5. Mapa de Distribución de Periodos de La Punta-Callao Huamán, (1991)

