

Explicación de porqué los depósitos de grava en la ciudad de Lima, Perú presentan amplificaciones importantes en periodos largos y su implicancia en la Norma Técnica Peruana Sismorresistente

Selene QUISPE^{a,1}, Fernando LÁZARES^a y Zenón AGUILAR^a

^a*Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú*

Resumen. Diferentes arreglos de medición de microtemores de pequeña a gran escala se han ejecutado en el distrito de San Miguel, Lima, Perú con el objetivo de explicar porque los depósitos de grava de la ciudad de Lima conocido localmente como el “Conglomerado de Lima” presenta amplificaciones importantes en periodos largos (~1 s). Lo cual fue previamente reportado en el trabajos de Quispe et al. (2014) [1] y Quispe S. (2015) [2]. El perfil de velocidad de onda de corte (V_s) estimado de las mediciones de microtemores revela que existe una fuerte velocidad de contraste entre los estratos superficiales (V_s menores a ~1000 m/s) y la roca sísmica (V_s ~3000 m/s) a una profundidad mayor a 100 m. Esta particularidad explica porque los depósitos de gravas presentan amplificaciones importantes no tan solo en periodos cortos (> 0.3 s), sino también en periodos largos (~ 1 s). Adicionalmente, se ha calculado la velocidad de onda de corte promedio para los 30 primeros metros (V_{s30}) del perfil V_s . De acuerdo a la Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente” (2016) [3], este perfil clasificaría como Perfil Tipo S1: Roca o Suelos Muy Rígidos con V_{s30} entre 500 y 1500 m/s; no obstante, su respuesta de sitio corresponde a la de un suelo blando. Nuestros resultados sugieren que el V_{s30} no es suficiente para explicar cómo los depósitos de suelos controlan la amplificación de sitio. Los autores enfatizan que se continúa con los trabajos de investigación para evaluar si el V_{s30} debería ser el único parámetro dinámico para la clasificación de los perfiles de suelo de acuerdo a la Norma Técnica E.030 [3].

Palabras Clave. Depósitos de grava, respuesta de sitio, periodos largos, V_{s30} , Lima.

1. Introducción

La ciudad de Lima Metropolitana, capital del Perú, se ubica en una zona altamente sísmica debido a subducción de la Placa de Nazca debajo de la Placa Sudamericana. La historia sísmica de Lima indica que numerosos terremotos ($M_w > 8$) han azotado la ciudad en el pasado. Por ejemplo, el último terremoto que experimento la ciudad fue el 3 de octubre de 1974 ($M_w 8.1$). Lima sufrió considerables daños, muchos de los cuales estuvo relacionado a las condiciones locales del suelo [4].

¹ Dirección: Av. Túpac Amaru Nro. 210, Rímac, Lima – Perú; E-mail: selene.quispe.g@uni.edu.pe

Diferentes estudios señalan que la ciudad de Lima está esperando un evento sísmico de magnitud considerable en un futuro muy cercano, la magnitud momento estimada es de 8.5 a más [5–7]. Con el fin de mitigar el impacto que podría tener este fenómeno natural en nuestra sociedad, a la fecha se está ejecutando diferentes estudios de investigación para evaluar el comportamiento dinámico de los diferentes tipos de suelos que yacen sobre la ciudad [1, 2, 8, 9 y 10].

Uno de los parámetros importantes que controlan la amplificación del suelo es la velocidad de corte (V_s). Quispe et al. (2014) [1] ejecutó mediciones de microtemores en arreglos para estimar el perfil V_s en depósito de gravas, específicamente en el distrito de San Miguel. En su estudio revela que la respuesta de sitio de los depósitos de gravas presenta picos predominantes en periodos largos de ~ 1 s. Información que antes se desconocía. De acuerdo a la microzonificación sísmica del distrito de San Miguel [11, 12], el material que predomina son los depósitos de gravas cuyo periodo de vibración del suelo es no mayor a 0.3 s. Información que se contradice con los resultados obtenidos por Quispe et al. (2014) [1].

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo explicar porque los depósitos de gravas, los cuales se caracterizan por ser uno de los materiales más competentes en la ciudad de Lima con periodos de vibración no mayor a 0.3 s [11, 13 y 14], presentan periodos de vibración en periodos largos de ~ 1 s en su respuesta de sitio. Además, analizar porque estos nuevos resultados contradice lo establecido en la Norma Técnica E-030 “Diseño Sismorresistente” (2016) [3] referente a la clasificación de sitio, recomendándose una actualización de esta. Para tal fin, se propone realizar una serie de mediciones de microtemores en arreglos para estimar el perfil V_s hasta una profundidad de exploración que detecte la roca sísmica con velocidades de onda de corte de ~ 3000 m/s.

2. Geología de la zona de estudio y estudios previos

El distrito de San Miguel se localiza al oeste de la ciudad de Lima Metropolitana, Perú. De acuerdo a la geología local del lugar, el material que predomina en el distrito de San Miguel son los depósitos aluviales que se encuentran formando el antiguo cono aluvial del río Rímac. La litología de estos depósitos aluviales pleistocenos está constituida por conglomerados, conteniendo gravas de tamaños heterométricos y de origen polimíctico [12].

El estudio de microzonificación sísmica del distrito de San Miguel señala que en la zona de interés predominan los depósitos de gravas pertenecientes al conglomerado de la ciudad de Lima [11, 12]. La literatura indica que estos materiales presentan las mejores características geotécnicas para la cimentación de edificaciones convencionales, cuyos periodos de vibración no es mayor a 0.3 s [4, 11, 12 y 14].

Revisando las relaciones espectrales H/V estimadas a partir de las mediciones de microtemores en forma puntual que se ejecutaron en los alrededores del distrito de San Miguel para estimar el periodo de vibración de la estructura del suelo [11, 12], se evidencia que existe un pico predominante en periodos cortos (en su mayoría menores a 0.1 s), y también en periodos largos ~ 1 s. Esto también fue observado por Quispe, S. (2015) [2] cuando llevo a cabo mediciones de microtemores en arreglos para caracterizar los materiales de suelos donde se encuentra instalada la estación acelerográfica PUCP. Se menciona que esta estación se encuentra monitoreada por el Instituto Geofísico de Perú (IGP).

Con el fin de explicar esta particularidad de los depósitos de gravas, para el presente trabajo de investigación se ha ejecutado una serie de mediciones de vibraciones ambientales en arreglos de pequeño a gran escala con el fin de estimar el perfil de velocidad de onda corte (V_s) hasta alcanzar la roca sísmica (~ 3000 m/s). La V_s es un parámetro dinámico importante que controla los periodos de vibración de los depósitos de suelo. A continuación, se detalla los criterios que se utilizaron para ejecutar los ensayos.

3. Ejecución de la medición de microtremores en arreglos

3.1. Zona de trabajo

Los ensayos de investigación fueron realizados dentro de las instalaciones del Parque de las Leyendas – Felipe Benavides Barreda, ubicado en el distrito de San Miguel de la ciudad de Lima Metropolitana, como se aprecia en la Figura 1. El criterio de selección de la zona de trabajo se basó en los resultados previamente obtenidos por Quispe S. (2015) [2] en los alrededores de la estación acelerográfica PUCP (representado por un triángulo de color azul) y por la disponibilidad del área libre con un radio de apertura mayor a los 300 m. Se menciona que el sitio de medición se ha denominado LEY01.

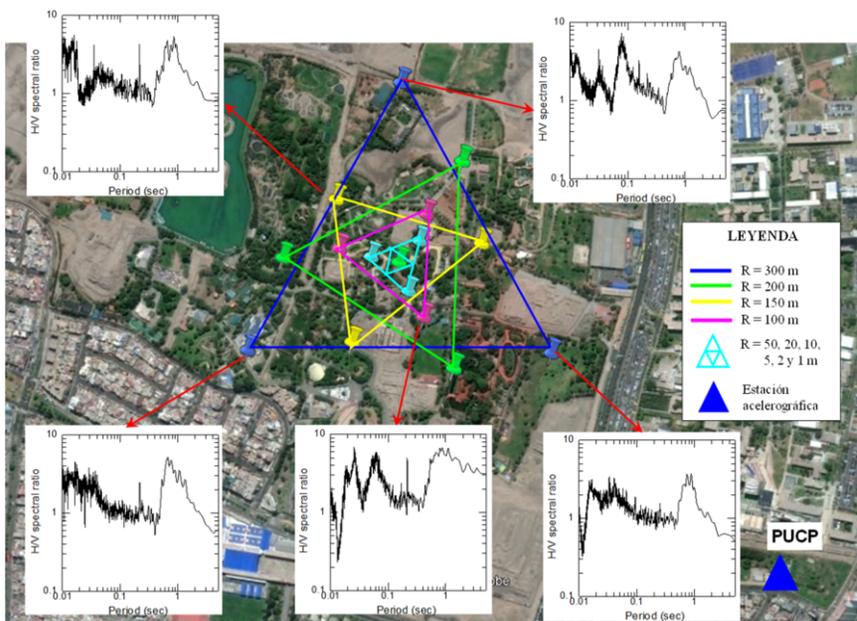


Figura 1. Se aprecia el despliegue de los sensores dentro de la zona de trabajo para la medición de microtremores en arreglos circulares pequeños y grandes. Los trabajos de campo se ejecutaron lo más cercano posible a la estación PUCP (triángulo azul).

3.2. Configuración de los arreglos

Las mediciones de microtremores fueron registradas en arreglos circulares utilizando 4 sensores de tres componentes. Los 4 sensores son desplegados sobre el terreno, un sensor

se coloca en el centro del círculo, mientras que los otros sensores se despliegan en los vértices de un triángulo equilátero de radio R . Los arreglos pequeños (radio no mayor a 20.0 m) se ejecutaron con la finalidad de tener una mejor resolución de los estratos superficiales del depósito de suelo, mientras que los arreglos grandes (radio mayor a 20 m) se realizaron para caracterizar los estratos profundos con el objetivo de detectar la roca sísmica. La frecuencia de muestreo utilizado varió de 200 a 2000 Hz, dependiendo del radio del arreglo.

4. Estimación de la curva de dispersión

El método de Coeficiente de Autocorrelación Espacial (SPAC) [15, 16] fue aplicado para definir la curva de dispersión observada de los registros de vibraciones ambientales. Esta técnica utiliza los coeficientes SPAC en el cálculo de la velocidad de fase a diferentes rangos de frecuencia. De la configuración del arreglo, el coeficiente SPAC fue calculado usando el cross-spectrum entre los registros de la componente vertical de los sensores que se encuentra a una misma distancia entre sensores y con diferentes azimuts. La velocidad de fase a una cierta frecuencia dada fue estimada ajustando los coeficientes SPAC a la función Bessel. Detalles relacionados al método SPAC puede hallarse en la literatura [15, 16].

Asumiendo que la onda Rayleigh domina principalmente la dirección vertical de las vibraciones ambientales, la componente vertical de los registros de cada sensor fue analizado. Los registros de los microtemores fueron divididos en ventanas de tiempo con una longitud de 81.92 s, y las ventanas de tiempo claramente contaminadas por el ruido artificial fueron removidas. Los coeficientes SPAC estimados de cada ventana de tiempo fueron promediados para calcular la velocidad de fase para el rango de frecuencia de interés.

La Figura 2 (a) muestra la curva de dispersión observada obtenida en el sitio de medición LEY01, representado por círculos abiertos. De la figura se observa que las velocidades de fase fueron estimadas en el rango de frecuencia de 0.01 a 1 Hz. Con respecto a la velocidad de fase se aprecia que las velocidades varían en el rango entre 200 y 2800 m/s. Se observa también que la velocidad de fase disminuye a medida que el periodo aumenta en ciertos rangos de periodo. Esto se debe a la influencia de los diferentes modos de vibración de la onda Rayleigh, indicando la existencia de estratos blandos subyaciendo estratos rígidos [17].

5. Estimación del perfil de velocidad de onda S

El método SPAC estima la curva de dispersión observada de las ondas Rayleigh, la cual es posteriormente invertida. En este estudio se utilizó el método de algoritmos genéticos Simulated Annealing para calcular el perfil de velocidad de onda S (V_s) en el sitio de medición. Esta técnica de inversión fue propuesta por Yamanaka, H. (2007) [18], y busca iterativamente que la curva de velocidad de fase teórica se adapte mejor a la curva de velocidad de fase observada "misfit". En el cálculo del modelo V_s final óptimo, 10 inversiones con 100 generaciones fueron llevadas a cabo utilizando diferentes números aleatorios. Cabe indicar que en cada generación, sobrevivieron los modelos V_s cuyo misfit es pequeño en valor, y que los modelos pobres fueron reemplazados por los modelos nuevamente generados. Los parámetros desconocidos para ser determinados de

la inversión fueron la V_s y el espesor de los estratos. La densidad de los estratos fue un valor ya establecido durante la inversión, y fue estimado utilizando la ecuación propuesta por Ludwig et al. (1973) [19] que correlaciona la V_s y la densidad.

La Figura 2 (a) muestra como la curva de dispersión teórica (línea negra) puede modelar bien la curva de dispersión observada (círculos abiertos) en todo el rango de periodo. El perfil de velocidad de onda de corte (V_s) determinado de la inversión se presenta en la Figura 2 (b), representado por una línea negra sólida. De la Figura 2 (b) se aprecia que se ha cumplido con uno de los objetivos del presente trabajo de investigación que es de detectar la roca sísmica con una $V_s \sim 3000$ m/s, la cual se encuentra a una profundidad ~ 140 m. Los estratos superficiales tienen velocidades de onda de corte (V_s) mayor a 300 m/s la cual se incrementa gradualmente con la profundidad hasta una profundidad ~ 20 m, posteriormente subyace estratos relativamente menos competentes lo cual está relacionado directamente cuando la velocidad de fase disminuye a medida que el periodo aumenta, como se explicó en la sección anterior.

Con el fin de respaldar la veracidad de los resultados obtenidos de la inversión, el cociente espectral H/V calculado de la medición de microtemores (línea sólida) fue comparado con el espectro H/V teórico estimado de la elipticidad del modo fundamental de la onda Rayleigh del perfil V_s obtenido de la inversión (línea punteada), como se aprecia en la Figura 2 (c). La relación espectral H/V observada fue estimada utilizando información registrada por el sensor ubicado en el centro del arreglo circular. De la Figura 2 (c) se puede apreciar de la relación espectral H/V observado dos picos predominantes en periodos cortos (periodos menores a 0.1 s) y periodos largos (~ 1 s), los cuales han sido bien modelados por el modelo teórico de la elipticidad de la onda Rayleigh.

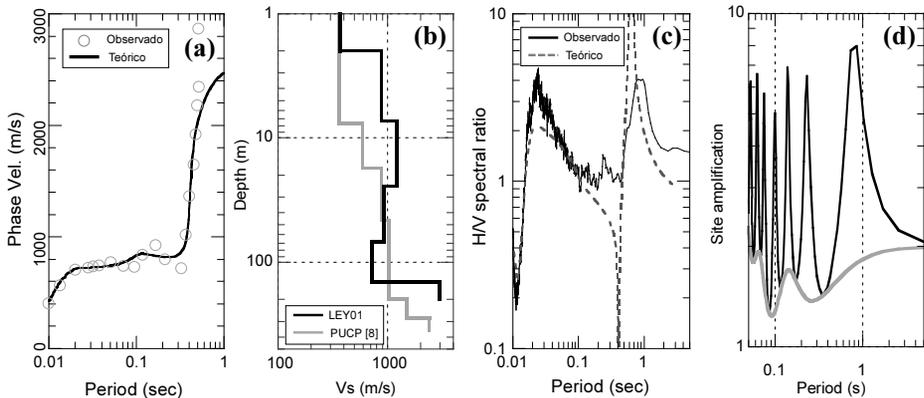


Figura 2. Resultados obtenidos en el sitio de medición LEY01 (a) Curva de dispersión observada estimada de la medición de microtemores utilizando el método SPAC, representado por círculos abiertos. La línea negra representa la curva de dispersión teórica calculada de la inversión. (b) Perfil de velocidad de onda de corte (V_s) LEY01 calculado de la inversión (línea de color negro). El perfil V_s PUCP [1] también se muestra, representado por una línea de color gris. (c) Comparación de la relación espectral H/V observado (línea negra) con el espectro H/V teórico estimado de la elipticidad del modo fundamental de la onda Rayleigh del perfil V_s obtenido de la inversión (línea punteada). (d) La línea negra representa la respuesta de sitio teórica calculada del perfil V_s LEY01; mientras que la línea gris representa también la respuesta de sitio teórica del mismo perfil V_s pero sin considerar como basamento a la roca sísmica ($V_s \sim 3000$ m/s).

6. Discusión de resultados

6.1. Descripción geotécnica del perfil Vs

La Figura 2 (b) muestra el perfil Vs LEY01 representado por una línea negra. Se observa que el primer estrato superficial tiene una Vs ~ 300 m/s, posteriormente subsigue un depósito con una Vs ~ 1000 m/s, extendiéndose hasta la roca sísmica con una velocidad de onda S ~ 3000 m/s. En la Figura 2 (b) también se superpone el perfil Vs PUCP [1] representado por una línea gris. Este perfil se ubica a unos 500 m de la zona de estudio. Como se mencionó anteriormente, este perfil se ejecutó con el fin de caracterizar las propiedades dinámicas de la estación acelerográfica PUCP. Ambos perfiles se ubican en depósitos de gravas, por lo que se podría decir que son similares; no obstante, la roca sísmica en el perfil Vs LEY01 se encuentra más superficial (a una profundidad ~ 140 m) en comparación al perfil PUCP. Es importante mencionar que el perfil Vs PUCP llega tan solo a detectar como máximo un estrato con una Vs ~ 2500 m/s a una profundidad ~ 300 m, por lo que la roca sísmica probablemente se encuentra a una mayor profundidad.

6.2. Porque los depósitos de gravas presentan amplificaciones importantes en periodos largos

En la Figura 1 se aprecia todos los arreglos circulares a gran escala que se ejecutaron en este estudio. De esta información generada se ha estimado también la relación espectral H/V para algunos sensores. Los resultados una vez más evidencian que los depósitos de gravas presentan periodos predominantes no tan solo en periodos cortos menores a 0.3 s [11, 12], sino también en periodos largos (~ 1 s).

Los estudios preliminares realizados por Quispe, S. (2015) [2] y Verdugo, R. (2017) [20] señalan que un material competente como el conglomerado de Lima puede presentar amplificaciones importantes no tan solo en periodos cortos sino también en periodos largos debido a la fuerte velocidad de contraste que existe entre los estratos superficiales y los estratos profundos. En la zona de estudio, los estratos superficiales corresponderían a los depósitos de suelos con Vs menores a ~ 1000 m/s, mientras que los depósitos profundos corresponderían a la roca sísmica (Vs ~ 3000 m/s), ver perfil Vs LEY01 en la Figura 2(b). Para investigar el efecto de la estructura profunda en la respuesta de sitio, la Figura 2 (d) muestra la amplificación de sitio considerando todo el perfil Vs LEY01, representando por una línea negra; mientras que la línea gris punteada representa la respuesta de sitio sin considerar como basamento a la roca sísmica (Vs ~ 3000 m/s). La Figura 2 (d) evidencia que los estratos superficiales controlan la amplificación del suelo en periodos cortos o frecuencias altas, mientras que los depósitos de suelo profundo controlan la amplificación del suelo en periodos largos o frecuencias bajas. Así mismo la fuerte impedancia que existe entre los estratos superficiales y profundos a una profundidad mayor de 100 m, hace que la zona de estudio presente una amplificación importante en todo el rango de periodo o frecuencia.

6.3. Evaluación de la respuesta de sitio y su implicancia en la Norma Técnica Peruana Sismorresistente

En este estudio, la velocidad de onda de corte promedio para los 30 primeros metros es calculada (Vs30) para el perfil Vs LEY01, resultando 952 m/s. De acuerdo a la Norma

Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente” [3], este perfil clasificaría como un Perfil Tipo S1 correspondiente a una roca o suelos muy rígidos con V_s entre 500 y 1500 m/s. No obstante, al evaluar la respuesta de sitio del presente perfil de velocidad de onda S, no corresponde a la respuesta de sitio típica de un material competente, sino a la de un depósito de suelo blando debido a que se aprecia amplificaciones importantes en todo el rango de periodo, ver Figura 2 (d).

Por lo expuesto, los resultados obtenidos en este estudio indicarían que el V_{s30} – parámetro estándar para la clasificación de sitio – no sería suficiente para la evaluación de la respuesta de sitio. Estudios recientes han reportado la misma dificultad, por lo que recomiendan que otro parámetro debe ser incluido. Verdugo R. (2017) [20] señala que este parámetro sería el periodo predominante estimado de las mediciones de microtemores en forma puntual. Los autores del presente estudio comparten la misma opinión debido a que la técnica de la medición de microtemores estima los periodos predominantes que controlan la amplificación de los depósitos de suelo que yacen sobre la roca sísmica, es decir no solamente considera la influencia de los estratos superficiales como el V_{s30} sino incluye también la influencia de la estructura profunda. Por tal motivo dada la importancia de la influencia de los estratos profundos en la respuesta de sitio, especialmente cuando se reporta una fuerte impedancia entre los estratos superficiales y profundos a una cierta profundidad, se recomienda una actualización de la clasificación de los perfiles de suelo de la Norma Técnica E-030 [3] incorporando otro parámetro a parte del V_{s30} .

7. Conclusiones

El presente trabajo de investigación ha ejecutado mediciones de microtemores a gran escala en el distrito de San Miguel, Lima, Perú con el objetivo de caracterizar los depósitos de gravas hasta alcanzar la roca sísmica ($V_s \sim 3000$ m/s). Para tal fin, se ha llevado a cabo una serie de mediciones de microtemores en arreglos circulares, cuyo radio ha variado de 1 a 300 m, información que ha permitido definir la curva de dispersión observada en el rango de periodo de 0.01 a 1 s, aplicando la metodología SPAC. Posteriormente, se ha realizado la inversión para obtener el perfil de velocidad de la onda S en el sitio de interés.

Con el fin de validar el perfil V_s LEY01 se ha comparado la relación espectral H/V observado con la elipticidad del modo fundamental de la onda Rayleigh teórico calculado del perfil V_s . Los resultados indican que el perfil V_s LEY01 explica bien los dos periodos predominantes de vibración del depósito de grava que se aprecian en la relación espectral H/V observado, uno en periodo cortos menores a 0.1 s y el otro en periodos largos ~ 1 s.

El estrato superficial del perfil V_s LEY01 presentan velocidades ~ 300 m/s, posteriormente subsigue un estrato con una $V_s \sim 1000$ m/s que se extiende hasta la roca sísmica ($V_s \sim 3000$ m/s) a una profundidad ~ 140 m. La velocidad de contraste que existe entre los estratos superficiales (velocidades de la onda S menores a ~ 1000 m/s) y la roca sísmica ($V_s \sim 3000$ m/s) hacen que los depósitos de gravas en la zona de estudio presenten periodos predominantes de vibración de ~ 1 s. Como evidencia de ello, se calcula la respuesta de sitio teórica donde se puede apreciar que esta fuerte impedancia entre los estratos superficiales y profundos hace que los depósitos de gravas presenten amplificaciones importantes no solamente en periodos cortos, sino sobre todo en periodos largos.

Finalmente, La velocidad promedio de onda de corte en los primeros 30 m de profundidad (Vs30) ha sido calculada para el perfil LEY01, cuyo valor es de 952 m/s. De acuerdo a la Norma Técnica E.030 (2016) [3], el perfil de suelo estimado en el presente estudio de investigación clasificaría como Perfil Tipo S1: Roca o Suelos Muy Rígidos. La respuesta de sitio típica del Perfil Tipo S1 presenta amplificaciones importantes solamente en periodos cortos, no en periodos largos; sin embargo, el análisis de amplificación del perfil Vs evidencia lo contrario, lo cual sugeriría que el Vs30 no es suficiente para explicar cómo los depósitos de suelos controlan la amplificación de sitio, de acuerdo a lo reportado por Verdugo, R. (2017) [20]. Los autores enfatizan que se continúa con los trabajos de investigación para evaluar si el Vs30 debería ser el único parámetro dinámico para la clasificación de los perfiles de suelo de acuerdo a la Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente” (2016) [3].

Referencias

- [1] Quispe S., Chimoto K., Yamanaka H., Tavera H., Lazares F., and Aguilar Z. (2014). “Estimation of S-wave Velocity Profiles at Lima City, Peru Using Microtremor Arrays”, *Journal of Disaster Research*, Vol. 9, No. 6, pp. 931-938.
- [2] Quispe S. (2015). “Evaluation of local site amplification in Lima, Peru using earthquake ground motion records (Doctoral thesis)”. Tokyo Institute of Technology, Japan.
- [3] Normas Legales. (2016). “Decreto supremo que modifica la Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente”, del Reglamento Nacional de Edificaciones, aprobada por Decreto Supremo N°011-2006-Vivienda, modificada con Decreto Supremo N°002-2014-Vivienda”, El Peruano.
- [4] Repetto P., Arango I. y Seed H. B. (1980). Influence of site characteristics on building damage during the October 3, 1974 Lima earthquake. Report-Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, California, EERC 80/41.
- [5] Dorbath L., Cisternas A., and Dorbath C. (1990). “Assessment of the Size of Large and Great Historical Earthquakes in Peru”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 80, No. 3, pp. 551-576.
- [6] Sladen A., Tavera H., Simons M., Avouac J. P., Konca A. O., Perfettini H., Audin L., Fielding E. J., Ortega F., and Cavagnoud R. (2010). “Source Model of the 2007 Mw 8.0 Pisco, Peru Earthquake: Implications for Seismogenic Behavior of Subduction Megathrusts”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, B02405, doi:10.1029/2009JB006429.
- [7] Pulido N., Tavera H., Aguilar Z., Calderón D., Chlieh M., Sekiguchi T., Nakai S., and Yamazaki F. (2012). “Mega-Earthquakes Rupture Scenarios and Strong Motion Simulations for Lima, Peru”, *The International Symposium for CISMID 25th Anniversary Technological Advances and Learned Lessons from Last Great Earthquakes and Tsunamis in the World*, (Paper No. TS-6-2). Lima, Peru.
- [8] Calderon D. (2012). “Dynamic Characteristics of the Soils in Lima, Peru, by estimating Shallow and Deep Shear-wave velocity profiles (Doctoral thesis)”. Graduate School of Engineering, Chiba University, Japan.
- [9] Calderon D., Sekiguchi T., Nakai S., Aguilar Z., and Lázares F. (2012). “Study of Soil Amplification Based on Microtremor and Seismic Records in Lima Peru”, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 1-20.
- [10] Quispe S., Yamanaka H., Aguilar Z., Lázares F., and Tavera H. (2013). “Preliminary Analysis for Evaluation of Local Sites Effects in Lima City, Peru from Ground Motion Data by using the Spectral Inversion Method”. *Journal of Disaster Research*, Vol. 8, No. 2, pp. 243-251.
- [11] CISMID. (2005). “Estudio de vulnerabilidad y riesgo sísmico en 42 distritos de Lima y Callao”, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.
- [12] CISMID. (2015). “Estudios de Microzonificación Sísmica y Análisis de Riesgo en las Zonas ubicadas en los distritos de: San Juan de Miraflores, Santa Rosa, San Miguel (Provincia y departamento de Lima); Carmen de la Legua-Reynoso (Provincia Constitucional del Callao)”, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.
- [13] Aguilar Z. (2005). “Seismic Microzonation of Lima”, *Japan-Peru Workshop on Earthquake Disaster Mitigation*, Japan Peru Center for Earthquake Engineering Research and Disasters Mitigation (CISMID), Faculty of Civil Engineering, National University of Engineering, Lima, Peru.

- [14] Calderón D., Aguilar Z., Lazares F., Alarcón S. and Quispe S. (2014). "Development of a Seismic Microzoning Map for Lima City and Callao, Peru", *Journal of Disaster Research*, 2014, Vol. 9, No. 6, pp. 939-945.
- [15] Aki, K. (1957). "Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors", *Bulletin Earthquake Research Institute*, Vol.35, pp. 415-456.
- [16] Okada, H. (2003). "The microtremor survey method", *Geophysical Monograph Series No. 12*, Society of Exploration Geophysicists.
- [17] Tokimatsu K., Shinzawa K., Kuwayama S. (1992b). "Use of short-period microtremors for Vs profiling", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 118, No. 10, pp. 1544-1558.
- [18] Yamanaka, K. (2007). "Inversion of surface-wave phase velocity using hybrid heuristic search method", *Butsuri Tansa (Geophysical exploration)*, Vol. 60, pp. 265-75 (in Japanese with English abstract).
- [19] Ludwig, W. J., Murauchi, S., Den, N., Buhl, P., Hotta, H., Ewing, M., Asanuma, M., Yoshii, T. and Sakajiri, N. (1973). "Structure of East China Sea-West Philippine Sea Margin off Southern Kyushu, Japan", *J. Geophys. Res.*, 78, 2526-2536.
- [20] Verdugo, R. (2017). "Seismic Site Classification", *In Proceedings of the Earthquake Geotechnical Engineering*, Vancouver, Canada.