

Empirical correlation between shear wave velocity and the N value of the standard penetration test in sandy soils of Juliaca city - Peru

Jair Alata, Bachiller¹, Wilfredo Zevillanos, Bachiller², Gary Durán, Magister³
^{1,2,3}Ingeniería Civil, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú
1u20151a082@upc.edu.pe, 2u201323604@upc.edu.pe, 3gary.duran@upc.edu.pe

Abstract– The application of the standard penetration test (SPT) is of a high level of detail, delayed and expensive, requires skilled labor for its execution, and its use in sandy soils, restrictive in fine and plastic soils is recommended and not recommended in the other types. While in the multichannel analysis of surface waves (MASW) its execution is not restrictive, and allows to cover large areas in a short time, however, because it is an indirect method, its approximation must be verified by drilling, obtaining samples, and others high analysis criteria as appropriate. With the implementation and improvement of soil prospection techniques in recent years, relationship studies have been carried out between both trials with different parameters.

An empirical correlation between the SPT tests was carried out by means of the number of penetration resistance strokes (N)60 as with the MASW test by means of the cutting wave velocities (Vs) in the sandy soils at 30 points in the city from Juliaca-Peru. There were 106 ordered pairs of data (N60; Vs); by means of the potential regression analysis the equation was obtained $V_s = 83.505 \cdot N60^{0.249}$; of the coefficient of determination $R^2: 0.66$ it was determined that the correlation is acceptable. The comparison was made with the correlation equations reported in the literature indicating that the proposed equation was in a trend consistent with them.

Keywords: Standard penetration test, shear wave velocity, sandy soil, correlation of test, coefficient of determination

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.392>
ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

Correlación empírica entre la velocidad de onda de corte y el valor N del ensayo de penetración estándar en suelos arenosos de la ciudad de Juliaca - Perú

Jair Alata, Bachiller¹, Wilfredo Zevillanos, Bachiller², Gary Durán, Magister³
^{1,2,3}Ingeniería Civil, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú
¹u20151a082@upc.edu.pe, ²u201323604@upc.edu.pe, ³gary.duran@upc.edu.pe

Resumen- La aplicación del ensayo de penetración estándar (SPT) es de alto nivel de detalle, demorada y costosa, requiere mano de obra calificada para su ejecución, así mismo es recomendado su utilización en suelos arenosos, restrictivo en suelos finos y plásticos y no recomendado en los demás tipos. Mientras que en el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) su ejecución no es restrictiva, y permite cubrir grandes áreas en corto tiempo, sin embargo, por ser un método indirecto, se debe verificar su aproximación mediante perforaciones, obtención de muestras, y demás altos criterios de análisis según corresponda. Con la implementación y mejoramiento de las técnicas de prospección de suelos en los últimos años, se viene realizando estudios de relación entre ambos ensayos con distintos parámetros.

Se llevó a cabo una correlación empírica entre los ensayos SPT mediante el número de golpes de resistencia a la penetración (N_{60}) como con el ensayo MASW mediante las velocidades de ondas de corte (V_s) en los suelos arenosos en 30 puntos de la ciudad de Juliaca-Perú. Se conto con 106 pares ordenados de datos (N_{60} ; V_s); mediante el análisis de regresión potencial se obtuvo la ecuación: $V_s = 83.505 * N_{60}^{0.249}$; del coeficiente de determinación $R^2:0.66$, se determinó que la correlación es aceptable. Se realizó la comparación con las ecuaciones de las correlaciones reportadas en la literatura indicando que la ecuación propuesta se encontró en una tendencia acorde a las mismas.

Palabras Clave- Ensayo de penetración estándar, velocidad de ondas de corte, suelo arenoso, correlación de ensayos, coeficiente de determinación.

Abstract- The application of the standard penetration test (SPT) is of a high level of detail, delayed and expensive, requires skilled labor for its execution, and its use in sandy soils, restrictive in fine and plastic soils is recommended and not recommended in the other types. While in the multichannel analysis of surface waves (MASW) its execution is not restrictive, and allows to cover large areas in a short time, however, because it is an indirect method, its approximation must be verified by drilling, obtaining samples, and others high analysis criteria as appropriate. With the implementation and improvement of soil prospection techniques in recent years, relationship studies have been carried out between both trials with different parameters.

An empirical correlation between the SPT tests was carried out by means of the number of penetration resistance strokes (N_{60}) as with the MASW test by means of the cutting wave velocities (V_s) in the sandy soils at 30 points in the city from Juliaca-Peru. There were 106 ordered pairs of data (N_{60} ; V_s); by means of the potential regression analysis the equation was obtained $V_s = 83.505 * N_{60}^{0.249}$; of the coefficient of determination $R^2:0.66$ it was determined that the correlation is acceptable. The comparison was made with the correlation equations reported in the literature indicating that the

proposed equation was in a trend consistent with them.

Keywords - Standard penetration test, shear wave velocity, sandy soil, correlation of tests, coefficient of determination.

I. INTRODUCCIÓN

En la ciudad de Juliaca, se producen sismos con profundidades moderadas, debido a la mayor profundidad del plano de subducción y fricción cortical; ello convierte a esta región, desde el punto de vista sísmico, como uno de los más activos. Se debe considerar la actividad sísmica originada por la reactivación de algunas fallas regionales. De acuerdo a estudios anteriores efectuados la mayor parte donde se encuentran emplazadas las estructuras, son sobre suelos de origen aluvial conformados superficialmente por arcillas y limos y subyaciendo suelos granulares que específicamente corresponde a arenas de mala y buena graduación (SP, SW) y arenas limosas (SM), con presencia de grava de forma sub-redondeada. El nivel freático se encuentra en profundidad promedio de 3.00m.

Los estudios de prospección geotécnica y caracterización del suelo se distinguen por ser invasivos siendo lo mayoría sondeos manuales o mecánicos mediante el uso del ensayo de penetración estándar – SPT entre otros, cuando las zonas de estudio son amplias, este método de prospección pierde eficacia, tornándose lento y dispendioso al requerir un número importante de sondeos para poder determinar los tipos de suelos de la zona de estudio. El gran número de sondeos determina que el costo del estudio de suelos sea también muy elevado, mano de obra calificada, y es que el ensayo de penetración estándar es recomendado en suelos arenosos, restrictivo en suelos finos y plásticos y no recomendado en los demás tipos. En el caso del análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) su aplicación es ejecutable en todo tipo de suelos, teniendo resultados que necesitan ser comprobables con ensayos de perforación tales como el SPT. Es por ello que se hace necesario la implementación de una metodología que permita correlacionar los métodos de prospección geotécnica más eficientes, tales como los valores del N-SPT a partir de los resultados de las velocidades de ondas de corte. Se toma los suelos arenosos porque es el suelo preponderante de la zona de estudio, y en cada zona las características del suelo son distintas de otras.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.394>

ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

A partir de este artículo se espera obtener parámetros más confiables, perfiles estratigráficos más representativos de los suelos de casos de estudio, también se espera la disminución de los costos de muestreo y ejecución de los ensayos, la reducción del margen de error de los resultados de la fase de laboratorio producido por alguna alteración de la muestra tanto en la captación, como en el procedimiento [1].

Diferentes investigadores han relacionado los ensayos SPT con los ensayos MASW a través de distintos métodos estadísticos. Lee realizó un análisis de regresión de los suelos de la cuenca de Taipei, a través de la multicolinealidad de ecuaciones con las velocidades de onda de corte y los valores N-SPT. Obtuvo diferentes ecuaciones, para los suelos arenosos obtuvo la ecuación: $V_s = 60.17 \cdot N^{0.56}$ y un valor de $R^2: 0.66$, usando 22 datos de pares ordenados [2]. Hasancebi y Ulusay al realizar correlaciones entre las velocidades de ondas de corte y los valores N-SPT para las evaluaciones de los sismos en los suelos de la región de Marmara en Turquía, para los suelos arenosos obtuvieron la ecuación $V_s = 90.8 \cdot N^{0.319}$ y un valor de $R^2: 0.65$, usando 97 datos de pares ordenados, los rangos de profundidad del ensayo SPT fueron desde los 2m hasta los 30m de profundidad [3]. Dikmen realizó correlaciones para poder estimar las velocidades de ondas de corte en base al N-SPT, este estudio fue realizado en la región central de Anatolia en Turquía; se obtuvo la ecuación $V_s = 73 \cdot N^{0.33}$ y un valor de $R^2: 0.72$, usando 82 datos de pares ordenados correspondientes a suelos arenosos; cabe indicar que esta ecuación se obtuvo con un valor N-SPT Corregido o N_{60} , los rangos de profundidad del ensayo SPT fueron desde los 3m hasta los 30m de profundidad [4]. Maheswari, Boominathan y Dodagoudar realizaron las correlaciones de velocidades de ondas de corte con el valor N y N_{60} del ensayo SPT, para los suelos de Chennai en India, de los suelos arenosos se obtuvieron las ecuaciones ($V_s = 100.53 \cdot N^{0.2651}$ y un valor $R^2: 0.84$) y ($V_s = 96.29 \cdot N_{60}^{0.2661}$ y un valor de $R^2: 0.83$), los rangos de profundidad del ensayo SPT fueron desde los 3m hasta los 30m de profundidad [5]. Anbazhagan, Kumar y Sitharam realizaron la clasificación del sitio y la correlación entre el valor de velocidades de ondas de corte y los valores N-SPT en la cuenca Indo-Gangetica en India, donde se obtuvo la ecuación $V_s = 60.17 \cdot N^{0.56}$ con de $R^2: 0.86$ para los tipos de suelos arenosos, este estudio se realizó con valores del N-SPT no corregidos en 17 puntos de ensayo, el ensayo SPT se realizó desde los 3m a 30 metros de profundidad, el ensayo MASW se realizó en 47 lugares hasta una profundidad de 30m [6].

Anbazhagan y Bajaj realizaron la clasificación de sitios sísmicos y correlación entre VS y SPT-N para sitios de suelos profundos en la cuenca Indo-Gangética en el mencionaron que las correlaciones están sujetas al tipo de suelo, así como también a la región de estudio [7].

En caso del estudio presente, se realizaron en el año 2019 los ensayos SPT y ensayos MASW en diferentes lugares de la ciudad de Juliaca, departamento de Puno, Perú. A fin de poder obtener una correlación empírica de los suelos arenosos, que permita determinar el índice del número de golpes del ensayo SPT (N-SPT) a partir las velocidades de ondas de corte (V_s) del ensayo MASW.

II. METODOLOGÍA

2.1 Ensayo MASW

El análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) es un método geofísico que registra las ondas de Rayleigh en un registro multicanal sísmico Geode de 24-bits, estas ondas son producidas mediante vibraciones generadas por golpes continuos al suelo captadas a través de 24 geófonos de 4.5 Hz de frecuencia con una separación de 3m [8]. Se realiza el procesamiento de los registros a través de la transformada de Fourier donde se obtiene curvas de velocidad de fase versus frecuencia, esto permite obtener la curva de dispersión en el modo fundamental del ensayo; luego mediante el proceso de inversión de ondas por métodos iterativos se obtiene las gráficas de velocidades de ondas de corte versus profundidad. Este valor de velocidad de onda de corte es registrado cada metro de profundidad, fundamental para el proceso de la obtención de la correlación de este artículo.

2.2 Ensayo SPT

El ensayo de penetración estándar, se registró el valor de N, que es el resultado de hincar 30cm en el suelo al dejar caer una maza de 63.5kg a una altura de 76cm sobre el tubo muestreador cilíndrico [9]. En el tubo muestreador se obtiene muestras inalteradas de suelo cada metro de profundidad, las muestras son preclasificadas en campo, luego con los ensayos estándar de laboratorio comprendidos en la Tabla I se determina su clasificación estándar en el sistema unificado de clasificación estándar. Obtenidos los resultados de los ensayos estándar de laboratorio realizado en cada metro de profundidad en conjunto con la información topográfica, se realizó las gráficas de los perfiles estratigráficos las cuales permiten visualizar la composición de los diferentes estratos a encontrar.

TABLA I
ENSAYOS ESTANDAR DE LABORATORIO EJECUTADOS A LAS
MUESTRAS EXTRAIDAS DEL ENSAYO SPT

Ensayo estándar de Laboratorio	NORMATIVA INTERNACIONAL
Análisis granulométrico	ASTM D 422-63
Contenido de humedad	ASTM D 2216-87
Clasificación unificada de suelos (SUCS)	ASTM D-2487
Límites de Atterberg	ASTM D 4318-84

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

A la obtención del registro N de la cantidad de golpes al hincar los 30cm, se realizó la normalización de la energía obteniendo el valor de N₆₀ según diferentes factores de corrección en la Tabla II [10]. Dicho valor será utilizado para desarrollar la propuesta en el siguiente ítem.

TABLA II
FACTORES DE CORRECCION ASUMIDOS EN LA NORMALIZACION DE LOS GOLPES N DEL ENSAYO SPT

Factor	Descripción	Valor
n ₁	Eficiencia del martillo	0.72
n ₂	Longitud de barra	0.75 – 0.95
n ₃	Revestimiento interno del muestreador	1.00
n ₄	Díámetro de perforación	1.00

Donde

- $n_i = n_1 * n_2 * n_3 * n_4$
- $N_{60} = N * n_i$

2.3 Tratamiento de datos

Los valores que se usarán para desarrollar el presente artículo son: La velocidad de onda de corte (Vs) del ensayo MASW y el valor N₆₀ del ensayo SPT correspondiente al número de golpes N corregido. Estos valores son registrados cada metro de profundidad estableciéndose pares ordenados (Vs; N₆₀). La Tabla III, presenta el formato que se utilizó para organizar la información en cada punto de estudio.

TABLA III
VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE, GOLPES N₆₀, Y PROFUNDIDAD

Profundidad (m)	Velocidad de onda de corte (m/s)	N ₆₀
1	Vs1	1-N ₆₀
2	Vs2	2-N ₆₀
3	Vs3	3-N ₆₀
n	Vs-n	n-N ₆₀

Con las muestras obtenidas en el ensayo SPT se realizó la caracterización física identificando el tipo de suelo y clasificación de los estratos de cada sondaje. Los pares ordenados (Vs; N₆₀) se agruparon en función a cada tipo de suelo. Los correspondientes a las arcillas, limos y gravas fueron descartados, tomándose en cuenta solamente los datos de los suelos arenosos.

A partir de estos valores, se desarrolla una correlación o función empírica considerando una variable independiente y otra dependiente. Se utilizó el análisis estadístico de regresión potencial mediante el método de mínimos cuadrados con el software Minitab 19. La expresión tiene la forma de la función $Vs = a * N_{60}^b$, donde a y b son constantes.

Luego de realizar la regresión potencial se descartó los datos que presentaban una desviación estándar mayor a 30 m/s de velocidad de onda de corte. Finalmente, con los datos depurados se determinó la función que correlaciona la velocidad de onda de corte y el valor de N₆₀. Los datos que no

fueron tomados en cuenta serán utilizados en estudios complementarios donde se podría introducir una variable dependiente adicional buscando mejorar el ajuste de función de tendencia.

III. CASO DE ESTUDIO

3.1 Geología de la zona

Esta se realizó mediante mapeo geológico con las cartas geológicas regionales de los cuadrángulos 31-v (Juliaca), 32-v (Puno) publicados en el boletín N° 42, Serie A del INGEMMET [11].

En la Figura 1, se observa que la geología regional de la zona está conformada por afloramientos de rocas localizados, cuyas edades van desde el terciario hasta el cuaternario reciente, conformándose por las siguientes unidades: depósitos aluviales, depósitos eólicos, depósitos fluviales, depósitos coluvio-morrénicos, lacustres, rocas dacíticas o andesítica del grupo Tacaza.

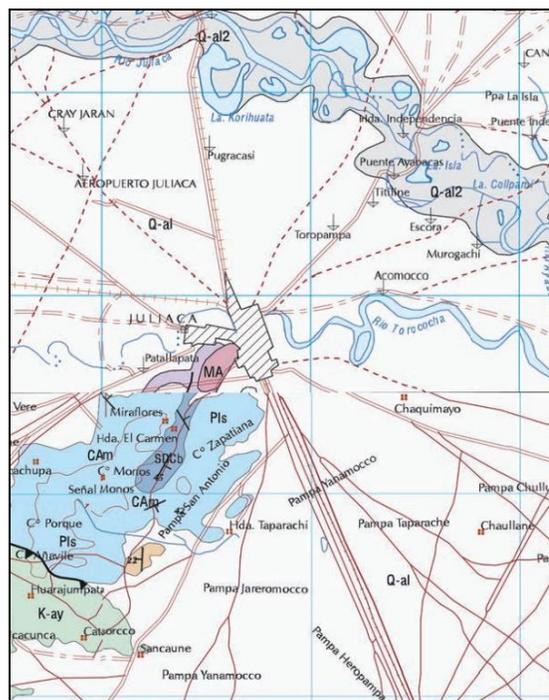


Fig 1. Mapeo geológico de la zona de estudio (INGEMMET)

Para el presente estudio se realizaron 30 sondajes y 30 ensayos MASW en la ciudad de Juliaca, departamento de Puno, Perú. La Figura 2 presenta la ubicación de casa sondaje realizado.

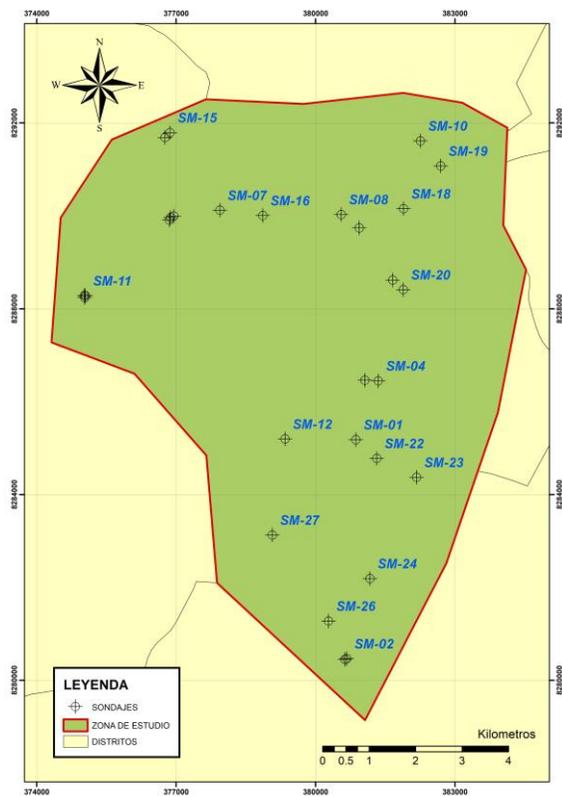


Fig. 2. Distribución espacial de los ensayos SPT y ensayos MASW.

3.2 Prospección Geofísica

Se ejecuto el ensayo MASW en 30 puntos en la zona de estudio. Estos consistieron en obtener los valores de la V_s en cada metro de profundidad del punto de estudio. Para la ejecución del ensayo se distribuyó 24 geófonos con separaciones de 3m, con disparos de distancias variables de 5, 10, 15 y 20m, las señales se captaron en el registrador sísmico Geode. En la Figura 3 se aprecia el equipo de prospección geofísica y el trípode del equipo SPT ubicado a la mitad de la línea del ensayo MASW.



Fig. 3.Registro de las ondas superficiales en el Geode, ensayo MASW.

La obtención del promedio de los valores de las ondas de corte (V_s) se da a partir de los perfiles unidimensionales del ensayo MASW correspondiente a cada golpe (SHOT). La Figura 4 presenta un ejemplo de la variación de la velocidad de onda de corte promedio en función a la profundidad y el resultado de cuatro golpes (SHOT 01, SHOT 02, SHOT 03 y SHOT 04).

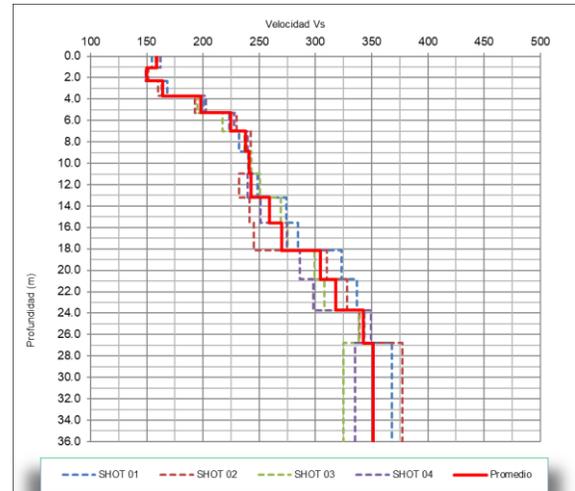


Fig. 4. Distribución espacial de los ensayos SPT y ensayos MASW.

3.3 Prospección Geotécnica

Se realizaron ensayos SPT en los mismos 30 sitios donde se ejecutaron los ensayos MASW. Se obtuvieron muestras con las cuales se determinó la estratigrafía de cada punto de ensayo a partir de los ensayos estándar de laboratorio. La estratigrafía del suelo de la zona de estudio está compuesta por una cobertura vegetal de espesor variable entre 30 a 50 cm, subyacen capas de arcilla de alta plasticidad y limo de baja plasticidad hasta los 3m de profundidad aproximadamente, a este nivel se encuentra el nivel freático. En seguida se aprecia la presencia de arena mal graduada con presencia de limo, de compacidad suelta a densa, cuyo espesor varía entre 9 y 11 metros. En la Figura 5 se muestra la estratigrafía de la zona de estudio.

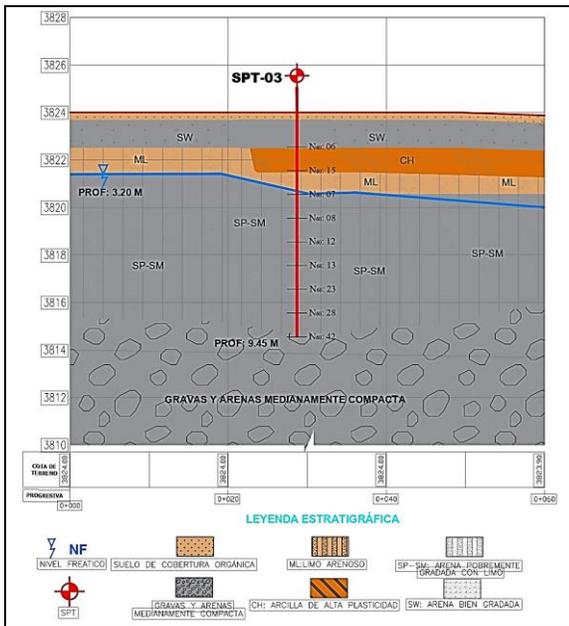


Fig. 5. Perfil Estratigráfico de la zona de estudio.

IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

De la ejecución de los 30 ensayos MASW que se ejecutaron en la zona estudiada, se obtuvieron 168 pares ordenados según la Figura 6. Estas muestras corresponden al tipo de suelo, de arenas, sean en cualquiera de sus formas según la clasificación SUCS: SP, SW, SM, SC, SP-SM, SC-SM, SW-SM, SW-SC.

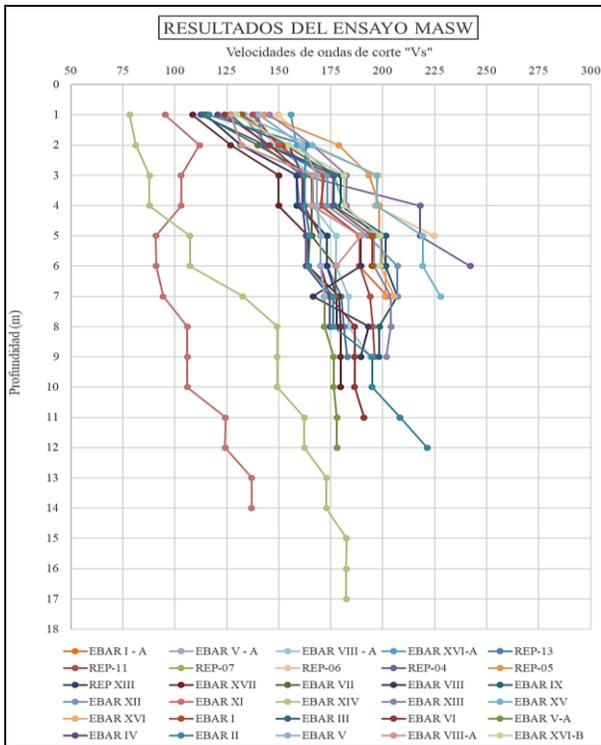


Fig. 6. Valores de velocidades de ondas de corte versus profundidad.

Con respecto a los ensayos SPT realizados en 30 sitios, se obtuvieron valores de N_{60} respecto a cada metro de profundidad, estos resultados se observan en la Figura 7.

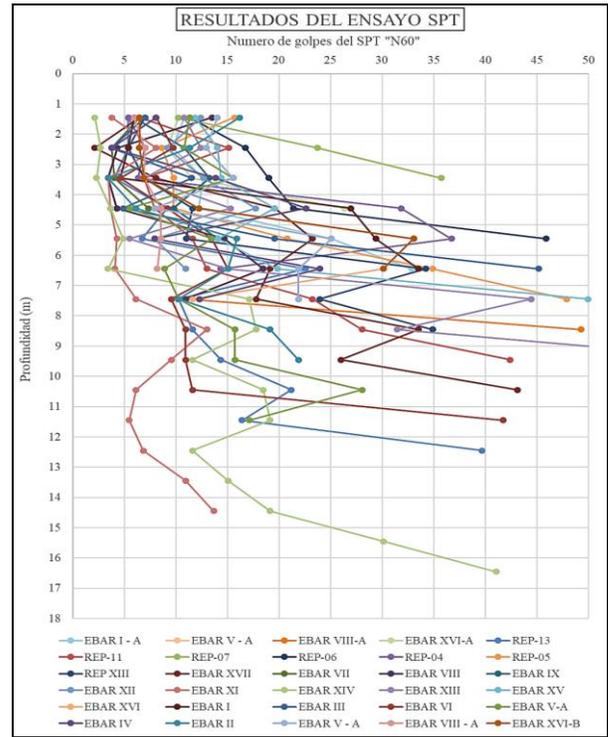


Fig. 7. Valores del número de golpes N_{60} versus profundidad.

Con lo pares ordenados obtenidos se procedió a realizar una regresión potencial. A partir de los resultados se descartaron los datos con una desviación estándar mayor a 30 m/s de velocidad de onda de corte. Luego de la depuración se realizó la regresión potencial con 106 pares ordenados (V_s ; N_{60}).

Teniendo los valores de V_s , N_{60} se optó por realizar un análisis de regresión potencial utilizando el método de mínimos cuadrados para la relación $V_s = a \cdot (N_{60})^b$. En la Figura 8, se presenta la dispersión de los datos, y su línea de tendencia obtenida respecto al tratamiento estadístico optado.

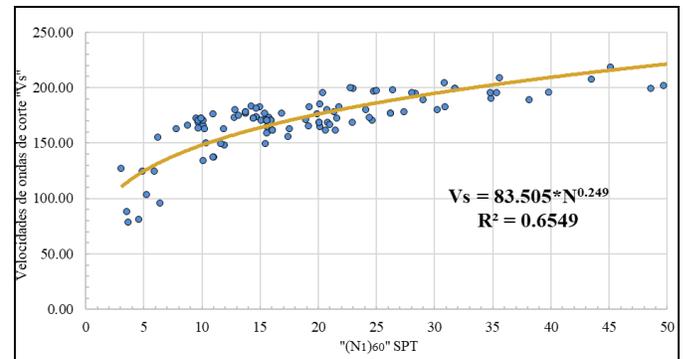


Fig. 8. Desarrollo de la correlación de las velocidades de ondas de corte V_s y el número de golpes corregido N_{60}

La función potencial obtenida es $V_s = 83.505 * N_{60}^{0.249}$, cuyo coeficiente de determinación R^2 fue 0.66.

La Figura 9 presenta la comparación de la correlación obtenida en la presente investigación con aquellas obtenidas en otros estudios. La Tabla IV presenta la expresión de estas correlaciones.

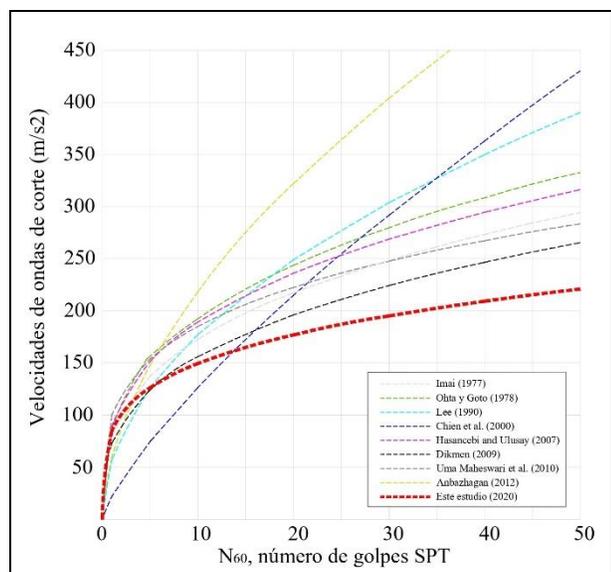


Fig. 9. Gráfica comparativa de las ecuaciones de la Tabla IV y la de este artículo.

Puede apreciarse que cuando el valor de N_{60} aumenta la diferencia de entre la velocidad de onda de corte que proporcionada cada correlación. Esto se debe a la variabilidad de las propiedades geotécnicas de los suelos de cada zona estudiada.

TABLA IV
CORRELACIONES EMPÍRICAS VS Y SPT-N

Nº	Autores	Correlaciones existentes para todo tipo de suelos o suelos arenosos
1	Imai (1977)	$V_s = 80.6N^{0.331}$
2	Ohta y Goto (1978)	$V_s = 88N^{0.34}$
3	Lee (1990)	$V_s = 57.4N^{0.49}$
4	Chien et al. (2000)	$V_s = 22N^{0.76}$
5	Hasancebi and Ulusay (2007)	$V_s = 90.82N^{0.319}$
6	Dikmen (2009)	$V_s = 73N^{0.33}$
7	Uma Maheswari et al (2010)	$V_s = 100.53N^{0.265}$
8	Anbazhagan et al. (2012)	$V_s = 60.17N^{0.56}$

El coeficiente de determinación R^2 , 0.66, es un resultado aceptable en relación a la cantidad de datos que se analizaron (106). A su vez la línea de tendencia presenta un comportamiento por debajo del rango de las anteriores investigaciones. Las correlaciones son dependientes del tipo de suelo y son específicas para cada región del mundo, por lo que ampliar la cantidad de datos o incluir otras variables sería de gran beneficio para complementar la presente investigación, de tal manera que se pueda identificar el factor o característica

del suelo que genera este comportamiento de la línea de tendencia en comparación a las otras.

V. CONCLUSIONES

Los resultados de la investigación permiten concluir que, al determinar la correlación del N_{60} con las V_s de los suelos arenosos de la ciudad de Juliaca se obtiene la ecuación: $V_s = 83.505 * N_{60}^{0.249}$ que muestra valores favorables al predecir el uno o el otro valor al tener un coeficiente de determinación superior a 0.65. Así mismo puede observarse que al realizar la comparación gráfica de las ecuaciones obtenidas de los estudios previos para suelos arenosos con la ecuación propuesta en esta investigación, esta presenta una línea de tendencia favorable y en similitud del comportamiento. Es necesario mencionar que estas investigaciones previas se han desarrollado en diferentes localidades del mundo, sin embargo, cada localidad o caso de estudio presenta características y propiedades únicas; por lo expuesto se puede pensar en la utilización de esta correlación para los suelos arenosos del Perú con condiciones similares a la zona de estudio, como apoyo en investigaciones geotécnicas, microzonificación sísmica, elaboración de mapas de riesgo.

La difusión y más producción de este tipo de estudios da una posibilidad de brindar mejores aproximaciones de los estudios de suelos al tener estudios de correlaciones entre los valores N con parámetros como la densidad relativa, grado de compacidad, grado de consistencia, ángulo de fricción, capacidad de carga [15]. Con posteriores investigaciones sobre correlaciones en suelos cohesivos se conllevaría a dar un complemento adecuado a esta investigación, debido a que sobre los suelos arenosos de la ciudad de Juliaca se ubica una capa de suelo arcilloso o limoso. Es necesario tomar otros parámetros de los suelos que permitan mejorar la relación entre ambos ensayos, tales como la profundidad, porcentaje de finos, porcentajes de arenas gruesas, medias, finas, coeficiente de compacidad, coeficiente de curvatura, límite líquido, límite plástico; estos valores se obtienen de los ensayos de clasificación estándar a las que fueron sometidas las muestras extraídas en el ensayo SPT.

VI. AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento a la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, por los conocimientos brindados durante los años de estudio y las sugerencias de los profesores durante las presentaciones en los cursos de investigación aplicada.

VII. REFERENCIAS

- [1] Trujillo, Mario (2018). Correlación empírica entre la velocidad de propagación de las ondas (V_s) y el resultado del ensayo de resistencia a la penetración estándar, aplicado a los suelos departamento del Huila, Putumayo y Casanare - Colombia (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica.

- [2] Lee S.H.H. (1992). Analysis of the multicollinearity of regression equations of shear wave velocities, *Soils and Foundations*, 32(1), 205–214.
- [3] Hasancebi N. and R. Ulusay, (2007). Empirical correlation between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessment, *Bull. Eng. Geol. Environ.* 66,203–213.
- [4] Dikmen, U. (2009). Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils, *Journal of Geophysics and Engineering*, 6(1), 61–72.
- [5] Uma Maheswari R., A. Boominathan and G.R. Dodagoudar (2010). Use of surface waves in statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance of Chennai soils”, *Geotechnical and Geology Engineering*, (28), 119-137.
- [6] Anbazhagan, P., Kumar, A. & Sitharam, T. (2012). Seismic site classification and correlation between standard penetration test N value and shear wave velocity for Lucknow City in Indo-Gangetic Basin. *Pure and applied Geophysics*, (170), 299-318.
- [7] Bajaj, K. y Anbazhagan, P. (2019). Seismic site classification and correlation between VS and SPT-N for deep soil sites in Indo-Gangetic Basin. *Journal of Applied Geophysics*, (163), 73-83.
- [8] American Society for Testing Materials (ASTM) (1995). Standard guide for using the seismic refraction method for subsurface investigation ASTM D5777. Philadelphia: ASTM.
- [9] American Society for Testing Materials (ASTM) (1984). Standard test method for penetration test and split – barrel sampling of soils (SPT) ASTM D1586. Estados Unidos de America: ASTM.
- [10] Das, Braja M. (2012). Fundamentos de ingeniería de cimentaciones, (7ª. ed.). México: Internacional Thomson. Pag. 83.
- [11] Instituto Geológico Minero y Metalúrgico-INGEMMET (1993). Boletín N°42, Serie A, 1993, Geología de la cordillera occidental y altiplano al oeste del Lago Titicaca sur del Perú (Proyecto Integrado del Sur) – Condorama.
- [12] Imai, T. (1977). P and S wave velocities of the ground in Japan. Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Tokyo 2, 257 - 260.
- [13] Ohta, Y. and N. Goto (1978), Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes, *Earthquake Eng. Struct. Dynam.* 6, 167–187.
- [14] Chien, L.-K. and Oh, Y.-N., (2000). Laboratory and field shear wave measurement at a reclaimed site in West Taiwan, *Geotechnical Testing Journal GTJODJ*, 23(1), 021–035.
- [15] Das, Braja M. (2013). Fundamentos de ingeniería geotécnica, (4ª. ed.). México: Internacional Thomson. 296-299.
- [16] American Society for Testing Materials (ASTM) (2007). Test Method for Particle-size Analysis of Soils. ASTM D422-63(2007)e2. Estados Unidos de América: ASTM.
- [17] American Society for Testing Materials (ASTM) (2019). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. ASTM D2216-19. Estados Unidos de América: ASTM.
- [18] American Society for Testing Materials (ASTM) (2017). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM D2487-17. Estados Unidos de América: ASTM.
- [19] American Society for Testing Materials (ASTM) (2017). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM D4318-17e1. Estados Unidos de América: ASTM.