

Propuesta de Clasificación Sísmica del Suelo en Perú

Proposal for seismic site classification for Peru

Carmen Ortiz, Jorge Alva, Jorge Soto

Centro de Investigación en Transformación Digital en Ingeniería - CITDI, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, cortiz@uni.edu.pe

RESUMEN: El Perú está ubicado en una región altamente sísmica debido a la interacción entre las placas de Nazca y la placa Sudamericana. Asimismo, el tipo de suelo, el espesor de los estratos y sus características geotécnicas, afectan considerablemente la respuesta sísmica de las estructuras. El código peruano sismorresistente E.030 presenta limitaciones en la clasificación de perfiles de suelo. Estas limitaciones se evidenciaron con los últimos sismos de gran magnitud. Este artículo propone una nueva clasificación sísmica del suelo, basada en el análisis de perfiles de suelo, ensayos MASW, MAM y mediciones de Microtremor, así como datos geotécnicos y registros históricos de sismos. Se concluye que las propiedades del suelo de los primeros 30 metros no representan adecuadamente la respuesta sísmica de los depósitos profundos, mientras que el período predominante del suelo proporciona información importante. Esta investigación no solo mejorará el código sismorresistente del país, sino que también contribuirá al conocimiento y experiencia de profesionales e investigadores, como referencia a nivel nacional e internacional.

ABSTRACT: Peru is located in a highly seismic region due to the interaction between the Nazca and South American plates, which significant challenges in the seismic response of structures due to soil nature, strata thickness, and geotechnical characteristics. The Peruvian seismic-resistant code E.030 presents limitations in the classification of soil profiles, as evidenced in recent seismic events. This study proposes a new seismic classification based on the analysis of soil profiles that includes MASW, MAM tests, and Microtremor measurements, as well as geotechnical data and historical earthquake records. It is concluded that soil properties limited to the first 30 meters do not adequately represent the seismic response of deep deposits, while the predominant soil period provides crucial information. This research will not only improve the Peruvian seismic-resistant code, but also will contribute to the knowledge and experience of professionals and researchers, serving as a reference at a national and international level.

KEYWORDS: Clasificación sísmica del suelo, perfil de velocidad Vs, periodo predominante.

1 INTRODUCCIÓN

El tipo de suelo, el espesor de los estratos y sus características geotécnicas, influyen de manera significativa durante la propagación de las ondas sísmicas en el sitio, lo que se conoce como el espectro de respuesta. Este espectro de respuesta se utiliza en el análisis y diseño de todas las estructuras civiles en zonas sísmicas. En los códigos normativos, el espectro de diseño se determina principalmente en función del perfil geotécnico del sitio.

Diversos investigadores como Seed et al (1974, 1976) analizaron los espectros de respuesta para caracterizar los movimientos sísmicos y sus efectos sobre las estructuras. Utilizaron 104 registros de aceleración obtenidos en condiciones sobre roca, suelo rígido, suelos profundos no cohesivos, y suelos de arena y arcilla media a blanda. Como resultado, determinaron que las características del espectro dependen del perfil del terreno.

Otro estudio relevante fue llevado a cabo por Borchardt (1994) quien propuso una actualización del código NHERP edición del 1991. Para tal fin estableció la Clase de Sitio y los Factores de Amplificación en función del perfil de velocidad de onda S promedio (V_s) y el nivel de aceleración de la roca base (PGA). Asimismo, recopiló información de 20 años de trabajo, que contenía perfiles de velocidad de onda S (hasta 30 m de profundidad), 130 pozos perforados de las regiones de San

Francisco y Los Ángeles, y más de 100 registros sísmicos del Sismo de Loma Prieta de 1989. Como resultado, caracterizó la Clase de Sitio en cuatro grupos principales en términos de las propiedades físicas y los valores de velocidad de onda S (V_s).

Dobry et al. (2000) revisaron los valores de velocidad de onda S que permitieron caracterizar la Clase de Sitio del código NEHRP versión del 1994 y 1997, los que fueron aprobados en un consenso del año 1992. Estos valores fueron el resultado de los estudios empíricos de los registros sísmicos y el análisis de respuesta numérica.

Verdugo y Peters (2017) mencionan que en la clasificación sísmica del suelo se debe incorporar el periodo predominante del suelo, el cual se obtiene del análisis del Microtremor. Si el periodo predominante medido es similar al periodo teórico, el perfil teórico del sitio se considera consistente. Por otro lado, si el periodo medido es mayor que el periodo teórico, esto indica que el suelo es más flexible en profundidad, por lo que se requiere modificar la clasificación del suelo.

Otros trabajos similares en Perú corresponden a Alva et al (2019), Ortiz (2019) y Soto et al (2023) quienes evaluaron los espectros de amplificación para las ciudades de Lima y Tacna en Perú.

Con respecto a los códigos normativos, el estándar ASCE 7-16 (2016) menciona que la clasificación de los suelos está enmarcada

en cinco tipos de suelos A, B, C, D y E. cuyos valores de velocidad de onda S de los primeros 30 m de profundidad (V_{s30}) están comprendidos en los rangos de 1500 m/s, 760 m/s, 360 m/s y 180 m/s, e incluye al Suelo F como suelo especial. La amplificación sísmica de estos suelos depende del tipo de suelo y la intensidad del movimiento en la base.

Por otra parte, el estándar europeo EN1998-1 (2004) clasifica a los suelos como A, B, C y D, cuyos valores de V_{s30} están comprendidos en los rangos de 800 m/s, 360 m/s y 180 m/s, e incluye al grupo de suelos especiales como suelos E, S_1 y S_2 . La clasificación sísmica de suelo tiene la descripción física del suelo.

El código chileno DS61(2011), tiene la clasificación del suelo como A, B, C, D y E cuyos valores de V_{s30} están comprendidos en los rangos de valores de 900 m/s, 500 m/s, 350 m/s y 180 m/s, e incluye al suelo F como grupo de suelos especiales. La clasificación del suelo considera la descripción de la exploración geotécnica.

De la revisión de las normatividades se observa que la clasificación sísmica del suelo está basada en el valor de V_{s30} .

Asimismo, el código peruano sismorresistente E.030 actualmente clasifica a los suelos como S_0 , S_1 , S_2 y S_3 en los rangos de valores de 1500 m/s, 500 m/s, y 180 m/s, e incluye el suelo S_4 que debe ser determinado según el Estudio de Mecánica de Suelos (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de los perfiles de suelo (Norma E.030)

Clasificación de los perfiles de suelo			
Perfil	$\bar{V}_s$	$\bar{N}_{60}$	$\bar{S}_u$
S_0	> 1500 m/s	-	-
S_1	500 m/s a 1500 m/s	> 50	>100 kPa
S_2	180 m/s a 500 m/s	15 a 50	50 kPa a 100 kPa
S_3	< 180 m/s	< 15	25 kPa a 50 kPa
S_4	Clasificación basada en el EMS		

En los últimos sismos de gran magnitud se ha observado que el código peruano presenta limitaciones en la clasificación de perfiles de suelo. Este artículo propone una nueva clasificación sísmica del suelo

2 METODOLOGIA

En esta investigación se realizó una amplia recopilación de ensayos experimentales que incluyó:

- Perfiles geotécnicos de suelos
- Ensayos geofísicos:
 - Perfiles de velocidad de onda S
 - Período de vibración del suelo
- Registros acelerográficos

Esta información, correspondiente a 15 departamentos del Perú, fue analizada con el objetivo de establecer una propuesta de clasificación sísmica de suelos para el país. La nueva propuesta fue validada mediante registros de sismos reales. La Figura 1 ilustra la metodología empleada.

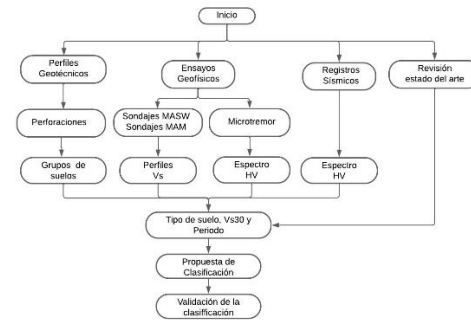


Figura 1. Metodología utilizada para la Clasificación Sísmica del Suelo.

2.1 Revisión de ensayos experimentales

Para realizar esta investigación, se revisaron registros de perfil del terreno obtenidos de perforaciones, perfiles de velocidad de onda S (V_s) obtenidos mediante ensayos MASW y MAM, así como los periodos de vibración fundamental del suelo obtenidos a través de ensayos de Microtremor y registros acelerográficos.

2.1.1 Ensayos geofísicos

Los ensayos geofísicos sísmicos, como el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) (Park et al., 1999) y el Arreglo Multicanal de Microtremores (MAM) (Hayashi, 2008), permiten obtener el perfil de velocidades de onda de corte (V_s) del terreno. El ensayo de Microtremor y el análisis de registros acelerográficos (Nakamura, 1989), por su parte, permiten obtener el período de vibración fundamental del sitio (T).

El MASW permite obtener el perfil de V_s hasta los 30 metros de profundidad, mientras que el MAM alcanza profundidades de hasta 100 metros. Para este trabajo, se recopilaron 739 perfiles de V_s : 645 de MASW y 94 de MAM (SENCICO, 2020). La información corresponde a ensayos realizados por instituciones públicas y privadas.

También se obtuvieron de SENCICO (2020) los periodos de vibración del terreno (T), con un total de 1941 ensayos de Microtremor recopilados. Los ensayos MASW, MAM y Microtremores se llevaron a cabo en diferentes ciudades del Perú. La Tabla 2 resumen los ensayos recopilados en 15 departamentos del país. La Figura 2 muestra la ubicación los ensayos revisados y el detalle en las ciudades con mayor información.

2.1.2 Perfiles geotécnicos

La caracterización física de los suelos se obtiene mediante muestras extraídas de la exploración directa (excavaciones manuales o perforaciones). Para exploraciones donde se requiere un sistema de entibados extenso, se recomienda utilizar las perforaciones. Asimismo, para exploraciones de grandes profundidades se debe emplear la perforación.

Los ensayos geotécnicos corresponden a las propiedades físicas y la clasificación de suelos basado en el Sistema Unificado de Clasificación (SUCS). La caracterización del suelo se realizó mediante la identificación del tipo de suelo.

Se recopilaron los registros de perforaciones, cuya información disponible fue la de SENCICO (2020). En total, se recopilaron 39 perforaciones, de las cuales 24 son perforaciones rotativas y 15

perforaciones de percusión. La Tabla 2 muestra el número de perforaciones en los 15 departamentos de Perú.

Tabla 2. Resumen de recopilación de ensayos geofísicos y perforaciones

Departamento	Microtremor	MASW	MAM	Perforación
Amazonas	16	2	1	-
Arequipa	49	6	2	6
Ayacucho	3	2	2	-
Cajamarca	66	17	1	-
Cusco	47	44	-	-
Huancavelica	14	-	-	-
Ica	284	68	31	6
Junín	3	2	2	-
La Libertad	121	77	2	3
Lambayeque	62	30	-	-
Lima	1207	361	28	21
Loreto	30	7	2	-
Piura	-	-	-	2
San Martín	19	3	2	-
Tacna	48	27	2	1

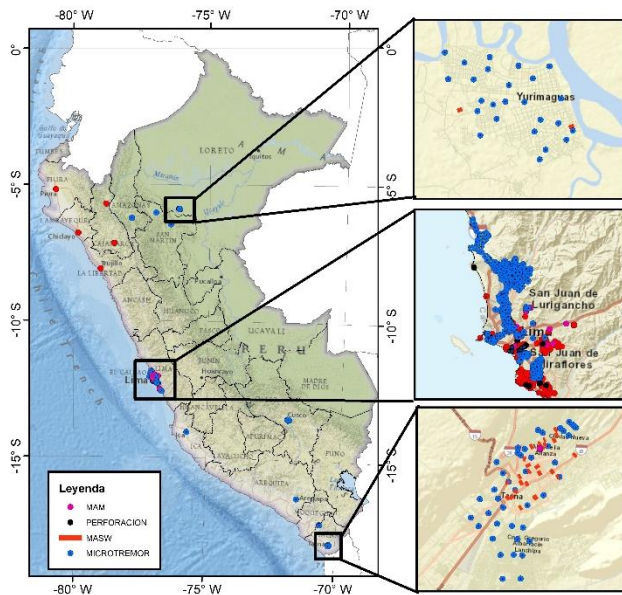


Figura 2. Ubicación de los sondajes revisados y detalle de las ciudades con mayor información.

2.1.3 Revisión de registros acelerográficos

Los registros acelerográficos permiten medir en la superficie el comportamiento del terreno durante un evento sísmico. El análisis del cociente espectral del movimiento horizontal respecto del movimiento vertical determina el período de vibración del suelo (Nakamura, 1989, 2008).

Para verificar el comportamiento de los suelos (período de vibración), se analizaron los registros acelerográficos de las estaciones sísmicas de las redes acelerográficas del CIP, UNI, SENCICO, IGP y CIDALL. Estos registros presentan una gran cantidad de datos de baja intensidad, seguidos de datos de mediana intensidad y muy pocos registros de alta intensidad. La Tabla 3 muestra las estaciones sísmicas analizadas.

Tabla 3. Ubicación de las estaciones acelerográficas

Estación	Ubicación	Suelo	Lat. (°)	Long (°)
CIP-Pisco	Pisco, Pisco – Ica	GP	-13.72	-76.208
CIP-Ica	Ica, Ica – Ica	SM	-14.07	-75.73
UNICA	Ica, Ica – Ica	SM	-14.09	-75.732
Parcona	Parcona, Ica – Ica	-	-14.04	-75.698
Palpa	Palpa, Palpa – Ica	SP	-14.53	-75.186
CIP-Nasca	Vista Alegre, Nazca – Ica	SP	-14.85	-74.94
SENCICO-Ica	Ica, Ica – Ica	SM	-14.06	-75.738
CIP-Amazonas	Chachapoyas, Chachapoyas – Amazonas	CH	-6.228	-77.876
UNTRM	Chachapoyas, Chachapoyas – Amazonas	CH	-6.235	-77.855
CIP-Moyobamba	Moyobamba, Moyobamba – San Martín	CH	-6.033	-76.974
CIP-Tarapoto	Tarapoto, San Martín – San Martín	CH	-6.461	-76.429
UNAAA	Yurimaguas, Amazonas – Loreto	SC	-5.897	-76.129
UNJ	Jaén, Jaén – Cajamarca	GP	-5.708	-78.805
PQR	Cercado de Lima, Lima – Lima	GP	-12.07	-77.04
UNTELS	Villa El Salvador, Lima – Lima	SM	-12.21	-76.932

3 ANALISIS DE RESULTADOS

3.1 Ensayos geofísicos

Después de revisar los perfiles geotécnicos de los suelos, éstos se correlacionaron con los perfiles de velocidad Vs30 y los Periodos de Vibración T. Con esta información se realizó una agrupación de los diferentes tipos de suelos y se establecieron rangos de velocidades de ondas de corte y periodos obtenidos con microtremores y con la relación (4H/Vs).

Se consideraron cinco tipos de suelos, tales como: arcillas y limos con espesores mayores a 15m, arenas con espesores mayores a 15m, arcilla, arena, relleno o limo con espesores menores de 15m sobre estratos de gravas, gravas y roca; y se establecieron algunos rangos como sigue:

- Para el grupo de suelos tipo Roca se identificaron valores de Vs30 que varían entre 556 m/s y 875 m/s, con un periodo de vibración de 0.16 s;
- Para el grupo de suelos tipo Grava (GM, GP, GW, GC) se identificaron valores de Vs30 que varían entre 409 m/s y 809 m/s, con periodos que varían entre 0.07 s y 0.30 s;

- Para el grupo de suelos que corresponde a Arena, Limo y Arcilla con espesores menores de 15 m sobre estratos de gravas, presentan valores de V_{s30} entre 306 m/s y 849 m/s, con periodos de vibración que varían entre 0.10 s y 0.60 s;
- Para el grupo de suelos tipo Arenas (SM, SP, SW) de espesores mayores a 15 m, presentan valores de V_{s30} que varían entre 163 m/s y 480 m/s, con periodos de vibración que varían de 0.13 s a 3.05 s; y
- Para el grupo de suelos tipo Limos y Arcillas (ML, MH, CL, CH) de espesores mayores a 15 m, se tienen valores de V_{s30} entre 82 m/s y 393 m/s, y los periodos de vibración varían entre 0.19 s y 2.83 s.

La correlación entre el tipo de suelo, el V_{s30} , T y el periodo teórico ($T=4H/V_s$) de los primeros 30 m de profundidad, se muestran en la Tabla 3 y Figuras 3, 4 y 5

Tabla 3. Tipos de suelos en función de V_{s30} y periodos del suelo

Suelo	V_{s30} (m/s)		$T(s)$ (Microtremor)		$T=4H/V_s$ (s)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Roca	556	875	0.16	-	0.14	0.22
Grava	409	809	0.07	0.30	0.15	0.29
Suelos de espesores < 15 m sobre grava	306	849	0.10	0.60	0.14	0.39
Arena espesores > 15 m	163	480	0.13	3.05	0.25	0.74
Arcillas y limos con espesores > 15m	82	393	0.19	2.83	0.31	1.46

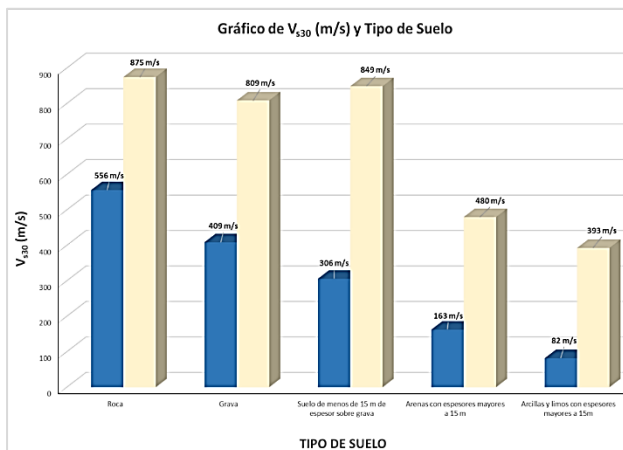


Figura 3. Valores de V_{s30} según el tipo de suelo.

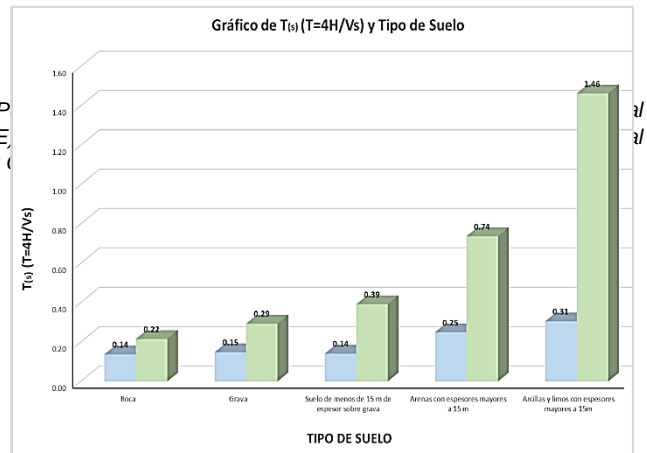


Figura 4. Valores de periodo de Microtremor según el tipo de suelo.

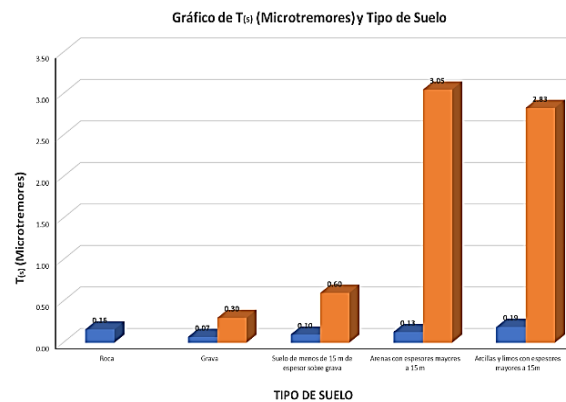


Figura 5. Valores de periodo de 4H/Vs según el tipo de suelo.

Además, durante la revisión de los periodos T de los ensayos de Microtremor, se identificó que algunos depósitos de suelo presentaban dos picos de amplitud para dos periodos distintos (T_0 y T_1 de la Figura 6), se considera que el segundo pico está influenciado por la profundidad del depósito de suelo.

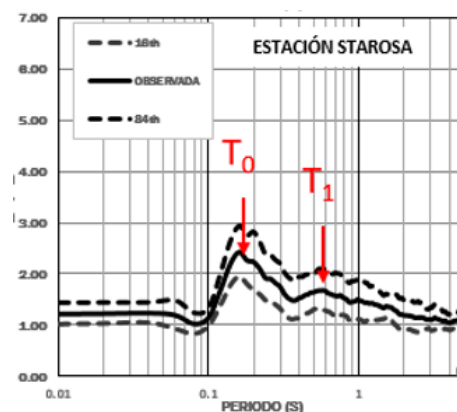


Figura 6. Periodos de vibración del suelo obtenido del Microtremor, dos picos en diferentes periodos.

Se analizó la relación entre el perfil de V_{s30} y el periodo T medido, comparándolo con el periodo teórico de los primeros 30 m de profundidad ($T=4H/V_s$), como se muestra en la Figura 7.

En la figura, se observa que la relación $4H/V_{s30}$ permite estimar de forma práctica el periodo de vibración calculado "T" (puntos

azules), comparándolo con los períodos de vibración medidos (T_0 y T_1) de los microtremores (puntos naranjas y grises). La parte superior de la Figura 7 también muestra el rango de valores V_{s30} de la clasificación sísmica del suelo según la norma E.030 (MVCS, 2018): S0, S1, S2 y S3.

Se observó que la relación $T=4H/V_s$ no siempre se cumple, ya que los períodos T pueden diferir de los valores T_0 y T_1 . Este comportamiento depende del espesor de los depósitos de suelos:

- Los períodos T tienden a aumentar en depósitos de gran espesor (arenas, limos y arcillas).
- Disminuyen si estos depósitos (arenas, limos y arcillas) se encuentran sobre suelos más rígidos como gravas y rocas.

Además, la mayor dispersión en la correlación entre V_{s30} y T se observa en el suelo Tipo S2.

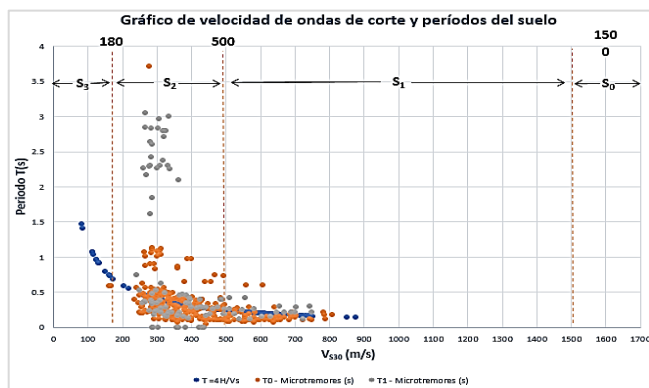


Figura 7. Relación de T y V_{s30} de los suelos.

Se realizó una clasificación de los suelos utilizando el estándar ASCE 7-16 (2016), encontrando diferencias con la clasificación de la norma peruana E.030 (MVCS, 2018).

Las diferencias se observaron principalmente en 466 perfiles de suelos con velocidades V_{s30} entre 200 m/s y 500 m/s (Suelo S2). En este rango de velocidades, según ASCE 7-16:

- 252 suelos se clasifican como Tipo C.
- 214 suelos se clasifican como Tipo D.

Estos resultados se muestran en la Tabla 4 y la Figura 8.

Tabla 4. Tipos de suelos en función de V_{s30} y períodos del suelo

Norma E.030				Estándar ASCE 7-16			
Tipo de Suelo	# perfiles	V_{s30} (m/s) Min	V_{s30} (m/s) Max	Tipo de Suelo	# perfiles	Tipo de Suelo	# perfiles
S1	163	502	875	B	6	C	157
S2	466	203	498	C	252	D	214
S3	17	82	174	E	17	-	-

Se observó que 75 perfiles de suelo se encuentran sobre depósitos con una profundidad mayor a 50 metros. En estos casos, se aprecia un aumento en las velocidades de ondas de corte (V_s) con respecto al valor de V_{s30} .

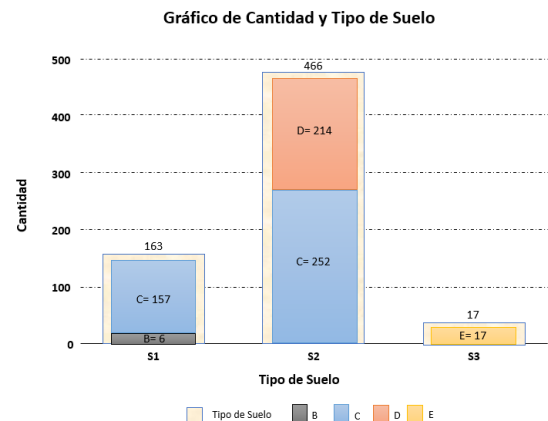


Figura 8. Comparación del tipo de suelo según la norma peruana E.030 y el estándar ASCE 7-16.

A partir del análisis de las V_s y las características geotécnicas de los perfiles de suelo recopilados, se comprueba la influencia que éstas tienen en las condiciones de sitio de cada lugar. Sin embargo, al clasificar los perfiles de suelo según la Norma E-030 vigente, se observa que la mayoría se clasifica como Suelo tipo S2, con velocidades entre 180 m/s y 500 m/s.

Esta tendencia coincide con lo observado por Alva y Ortiz (2019), Aguilar et al. (2019) y Alva et al. (2020); quienes también encontraron discrepancias en la clasificación del tipo de suelo S2 para V_{s30} entre 180 y 500 m/s. Por lo cual, en este rango, la clasificación de los perfiles de sitio debería dividirse en dos grupos.

3.2 Análisis de registros sísmicos

Se analizaron las tres componentes de los registros sísmicos de las estaciones acelerográficas de la Tabla 3. A partir de los resultados y mediante el cociente espectral, se observó que el período del suelo aumentó en la mayoría de las estaciones, en comparación con las mediciones realizadas con microtremores. La Figura 9 y la Tabla 5 muestran los resultados de las estaciones de SENCICO.

En la Figura 9 se observa el cociente espectral de la estación SENCICO Los Olivos, donde los períodos T_0 y T_1 son 0.15 s y 0.60 s, respectivamente.

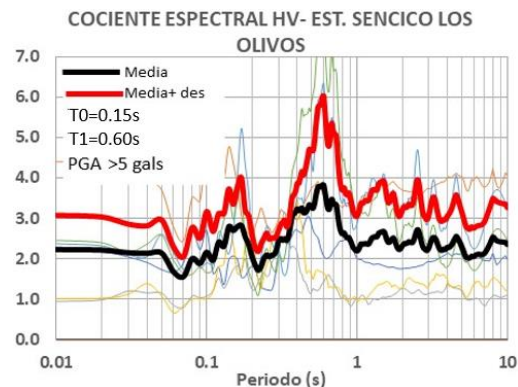


Figura 9. Cociente espectral de la estación SENCICO Los Olivos.

Además, se ha identificado que el suelo basado en los primeros 30 m de profundidad, resulta insuficiente para representar adecuadamente la respuesta sísmica de los depósitos profundos del suelo, constituidos por varios estratos.

Por otra parte, el período predominante de un depósito de suelo proporciona información importante sobre la respuesta sísmica. Los valores bajos sugieren la presencia de depósitos con suelos rígidos, mientras que los valores altos de período predominante se asocian a los depósitos de suelo flexible.

Tabla 5. Estaciones acelerográficas de SENCICO con información de velocidades de ondas de corte y períodos del suelo

Estación	Registros	Vs (m/s)	Período (Microtremor)		Período (Acelerogr.)		E.030 2018
			T ₀	T ₁	T ₀	T ₁	
Los Olivos	3	337	0.37	-	0.15	0.60	S ₂
Chorrillos	3	347	0.18	-	0.20	0.90	S ₂
Ayacucho	3	400	0.97	-	0.15	0.60	S ₂
Huancayo	3	467	0.74	-	0.30	0.60	S ₂
San Borja	3	785	0.12	0.18	0.30	0.60	S ₁
Ica	3	249	0.45	0.52	0.67	3.03	S ₂
Tacna	3	424	0.27	-	0.15	0.60	S ₂

4 PROPUESTA DE CLASIFICACIÓN

La norma E.030 establece que el espectro de diseño está determinado por el tipo de perfil del suelo y la zona sísmica. Sin embargo, teniendo en cuenta que los parámetros V_{s30} y T_s , proporcionan información importante sobre el comportamiento sísmico de un sitio; se propone que la nueva clasificación de los perfiles del suelo incluya el período predominante del sitio.

El período predominante (T_s), puede obtenerse utilizando la relación espectral H/V (método de Nakamura). Este período debe ser consistente con la clasificación del sitio obtenida de acuerdo con V_{s30} . Si T_s es más grande de $0.65T_p$, significa que las condiciones del suelo por debajo de 30 m hacen que el sitio sea más flexible, lo que implica que la clasificación del suelo debe modificarse o desarrollar un estudio de análisis de respuesta de sitio.

La Tabla 6 presenta una nueva propuesta de clasificación de suelos. Es importante destacar que, mientras que la norma E.030 agrupa los suelos S₂ en un rango de 200 m/s a 500 m/s, la propuesta divide este rango en dos grupos. Además, se considera como perfil tipo roca S₀ a partir de velocidades mayores a 800 m/s y se incluye un rango de valores de período de los suelos.

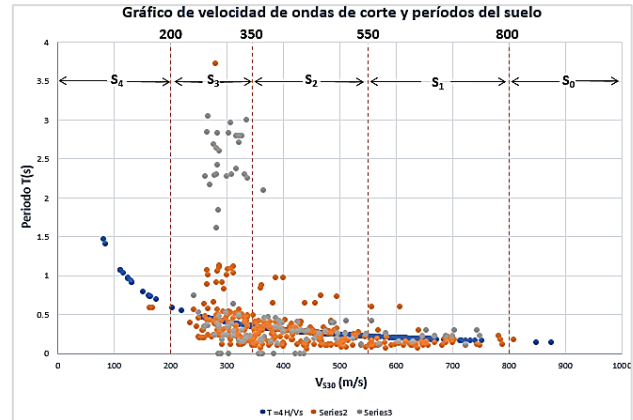
Tabla 6. Propuesta de clasificación sísmica de los suelos

Perfil	V_{s30} (m/s)	T_s (s)
S ₀	> 800	< 0.2 s
S ₁	550 - 800	0.2 s - 0.4 s
S ₂	350 - 550	0.4 s - 0.6 s
S ₃	200 - 350	0.6 s - 0.9 s
S ₄	< 200	> 0.9 s

S5 Requiere análisis de sitio Medición de Microtremor

5.1 Validación de la propuesta

Para validar la propuesta, se analizó nuevamente la relación entre el perfil de V_{s30} , y el período de vibración registrado (T) con la nueva propuesta de clasificación, encontrado una mejor



correlación, como se muestra la Figura 10.

Figura 10. Relación de T y V_{s30} de los suelos, según la nueva propuesta.

Adicionalmente, se clasificaron los perfiles del suelo de donde se registraron los sismos de gran magnitud que ocurrieron en el Perú (1966, 2007, 2019), Ecuador (2016) y México (1985). Se observa que la propuesta planteada se ajusta de mejor manera a las características de los perfiles de suelos y su comportamiento frente a sismos de mayor magnitud.

En la Tabla 7 y Figura 11 se presentan los registros acelerográficos utilizados y las características del perfil del suelo.

Tabla 7. Registros sísmicos utilizados para el análisis de sitio

Fecha	Mw	Estación	V_{s30} (m/s)	PGA (cm/s ²)	T (s) Microtr.	Suelo
17/10/1966	7.6	PQR	619	269	0.18	S ₁
15/08/2007	7.9	PARCONA	422	484	0.34	S ₂
15/08/2007	7.9	UNICA	255	334	0.62	S ₃
26/05/2019	8.0	UNAMUNO (GUAYAQUIL)	114	20	-	S ₄
19/09/1985	8.1	SCT (MÉXICO)	75	161	-	S ₄

Asimismo, para verificar el período T_p del sitio, se normalizaron los espectros de respuesta y se compararon con los espectros de amplificación C^*S de la Norma E-030 actual para los diferentes tipos de suelos. También se superpusieron los espectros normalizados de Seed et al. (1974) para cada tipo de suelo (Figura 12).

Los resultados confirmaron que la propuesta tiene un buen ajuste.

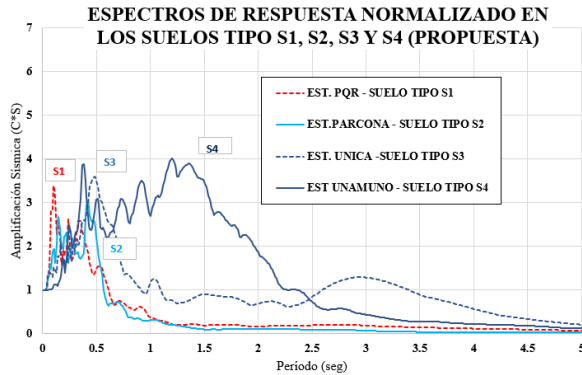


Figura 11. Espectros de aceleración normalizados para los diferentes tipos de suelo S1, S2, S3 y S4.

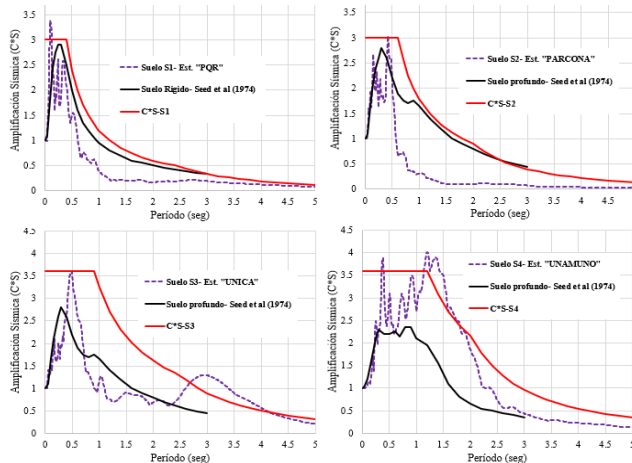


Figura 12. Comparación de espectros de aceleración normalizados de los diferentes tipos de suelo (S1, S2, S3 y S4), los espectros C*S y los espectros normalizados de Seed et al (1974)

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se evidencia el efecto de la no linealidad. Se demuestra que las propiedades del suelo que representan únicamente los primeros 30 metros son insuficientes para caracterizar la respuesta sísmica de los depósitos más profundos.

Se comprueba que el período predominante de un depósito de suelo proporciona información importante sobre la respuesta sísmica. Los valores bajos sugieren presencia de depósitos con suelos rígidos, mientras que los valores altos de período predominante se asocian a los depósitos de suelo flexible.

Se propone que la Clasificación Sísmica de Suelos para Perú esté basada en los parámetros V_{s30} y el período predominante del sitio T_s .

En la propuesta de Clasificación, se incorpora un nuevo perfil del suelo entre el rango de valores de V_{s30} de 200 m/s a 550 m/s (S2 y S3).

7 AGRADECIMIENTOS

Al CITDI-UNI y SENCICO por el auspicio para llevar a cabo esta investigación.

8 REFERENCES

- Aguilar, Z., Tarazona, J., Vergaray, L., y Barrantes, J. (2019). Site Response Analysis and its comparison with the Peruvian Seismic Design Spectrum. *Journal TECNIA*. 29 (2), 91-97
- Alva, J.E. y Ortiz, C.E. (2019). Análisis de registros de perfiles de velocidades de onda de corte y registros acelerográficos. Reporte técnico. In press.
- Alva, J.E., Ortiz, C.E. and Soto, J. (2020). Seismic Amplification in Tacna-Peru, using seismic motion data and arrangements of microtremor. Proceeding of the 17th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE). Sendai, Japan.
- ASCE 7-16 (2016). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineering. USA
- Borcherdt R. (1994) Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). *Earthquake Spectra*. 10 (4), 617-653
- Dobry R., Borcherdt RD, Crouse CB, Idriss IM, Joyner WB, Martin GR, Power MS, Rinne EE., Seed RB. (2000). New Site Coefficients and New Site Classification System Used in Recent Building Seismic Code Provisions. *Earthquake Spectra*. 16 (1).
- DS 61(2011). Decreto Supremo, Diseño Sísmico de Edificios. Diario Oficial de Chile. (In Spanish).
- Eurocode 8 (2004). Design of structures for earthquake resistance. European Committee for Standardization.
- Hayashi, K. (2008). Development of the Surface-Wave methods and its application to site investigation. PhD. Dissertation, Kyoto University. <https://doi.org/10.14989/doctor.k13774>.
- MVCS (2018). E.030 Diseño Sismoresistente, Norma Técnica Peruana. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento
- Nakamura, Y. (1989) A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI), 30 (1), 25-33.
- Nakamura, Y. (2008) On the H/V Spectrum. The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China
- Ortiz, C.E. (2019) Determinación de la amplificación de las ondas sísmicas en los suelos y coeficiente sísmico establecido en la norma E-030, en la ciudad de Tacna. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Park, C., Miller, R., Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Society of Exploration Geophysics*. 64(3), 800-808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>.
- Seed, H., Ugas, C., Lysmer, J. (1974). Site-Dependent Spectra for Earthquake-Resistant Design. EERC 74-12.
- Seed, H. B., Ugas C. and Lysmer J. (1976). Site-dependent spectra for earthquake-resistance design. *Bull. Seismological Society of America*. Vol. 66, No.1, 221-243.
- SENCICO (2020). Plataforma Virtual de Visualización Sistemática de Perfiles de Suelo. <https://perfilesuuelos.sencico.gob.pe/>
- Soto, J., Alva, J.E. y Ortiz, C.E. (2023). Assessment of spectral amplification in city of Lima, Peru. *Smart Geotechnics for Smart Societies*. 1 (1): 1633-1642. doi:10.1201/9781003299127-242
- Verdugo, R. y Peters, G. (2017). Seismic soil classification and Elastic Response Spectra. Proceeding of 16th World Conference of Earthquake Engineering. Santiago, Chile. Paper N° 4276.