

## Propuesta de Clasificación Sísmica de Sitio 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 sitio. Estas limitaciones se evidenciaron con los últimos sismos de gran magnitud. Este artículo propone una nueva clasificación sísmica del sitio, 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 sitio 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 site profiles, as evidenced in recent seismic events. This study proposes a new seismic site 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 site 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 sitio, perfil de velocidad Vs, periodo del sitio.

## 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 NEHRP 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 sitio 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 sitio.

Otros trabajos similares en Perú corresponden a Alva et al (2019), Ortiz (2019) y Soto et al (2023) quienes evaluaron los espectros de amplificación de 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 emarcada 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 sísmico.

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 sitio 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)

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
$S_4$	Basada en el Estudio de Mecánica de Suelos		

$\bar{V}_s$  Velocidad promedio de la velocidad de onda de corte  
 $\bar{N}_{60}$  Promedio ponderado de  $N_{60}$  (ensayo SPT)  
 $\bar{S}_u$  Promedio ponderado de  $S_u$  (resistencia no drenada) de los primeros 30 m superiores del perfil

En los últimos sismos de gran magnitud que ocurrieron en los años 1966, 1970, 1974, 2001, 2007 y 2019 se ha observado que el código peruano presenta limitaciones en la clasificación de sitio, tal como fue evaluado por Alva et al (2019), SENCICO (2020) y Alva (2021). Este artículo propone una nueva clasificación sísmica de sitio.

## 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 sitio
- Registros acelerográficos

Esta información, correspondiente a 15 departamentos del Perú, fue analizada con el objetivo de establecer una propuesta de clasificación sísmica de sitio para el país. La nueva propuesta fue

validada mediante registros de sismos reales. La Figura 1 ilustra la metodología empleada.

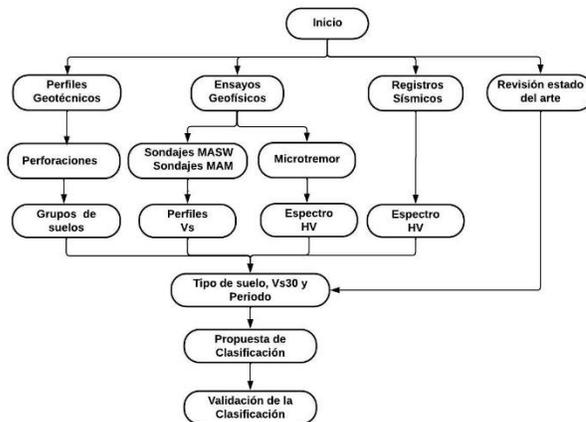


Figura 1. Metodología utilizada para la Clasificación Sísmica del Sitio.

### 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 del sitio 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 del sitio (T).

Para esta investigación con el ensayo MASW se obtuvieron perfiles de  $V_s$  hasta los 30 metros de profundidad. Con el ensayo MAM se alcanzó profundidades de hasta 100 metros del perfil  $V_s$ . 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 del sitio (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 obtuvo de las muestras extraídas de las perforaciones, a través de los ensayos estándar de laboratorio.

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

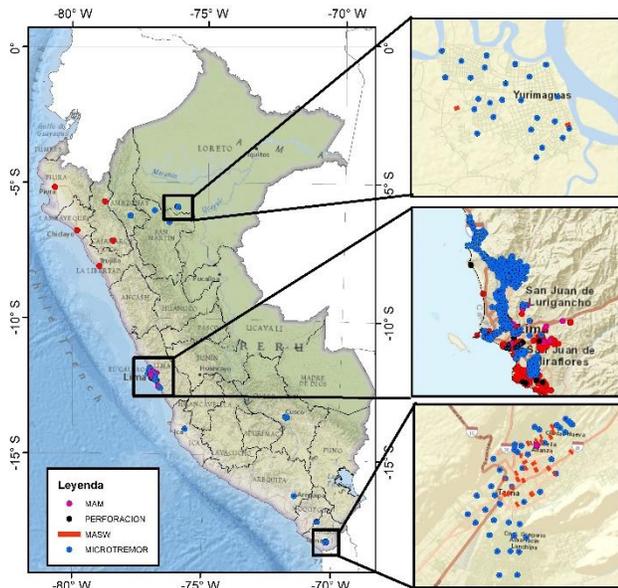


Figura 2. Ubicación de los sondajes revisados y detalle de las ciudades con mayor información.

### 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 sitio (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	-13.720	-76.208
CIP-Ica	Ica, Ica – Ica	SM	-14.070	-75.730
UNICA	Ica, Ica – Ica	SM	-14.090	-75.732
Parcona	Parcona, Ica – Ica	-	-14.040	-75.698
Palpa	Palpa, Palpa – Ica	SP	-14.530	-75.186
CIP-Nasca	Vista Alegre, Nazca – Ica	SP	-14.850	-74.940
SENCICO-Ica	Ica, Ica – Ica	SM	-14.060	-75.738
CIP-Amazonas	Chachapoyas, Chachapoyas – Amazonas	CH	-6.228	-77.876
UNTRM	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	-12.070	-77.040
UNTELS	Villa El Salvador, Lima – Lima.	SM	-12.210	-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  $V_{s30}$  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  $4H/V_{s30}$ .

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  $V_{s30}$  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  $V_{s30}$  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 ( $T=4H/V_{s30}$ ) de los primeros 30 m de profundidad (H), se muestran en la Tabla 4 y Figuras 3, 4 y 5.

Tabla 4. Tipos de suelos en función de  $V_{s30}$  y periodos del sitio

Suelo	$V_{s30}$ (m/s)		T(s) (Microtremor)		$T=4H/V_{s30}$ (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

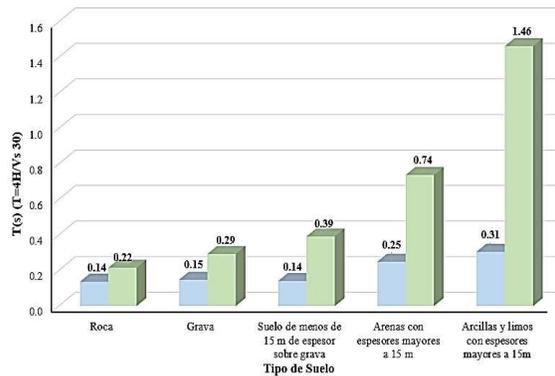


Figura 4. Valores de periodo de Microtremor según el tipo de suelo.

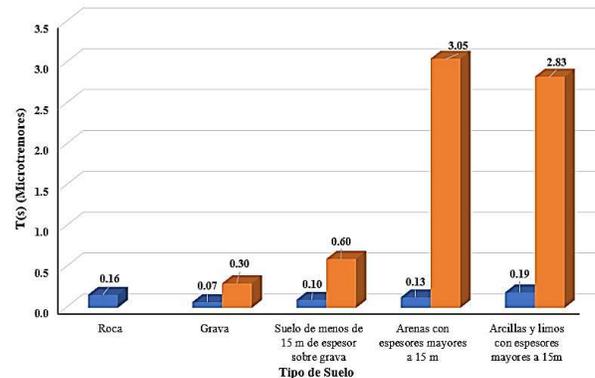


Figura 5. Valores de periodo  $T= 4H/V_{s30}$  según el tipo de suelo.

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 primer pico está influenciado por la profundidad del depósito de suelo.

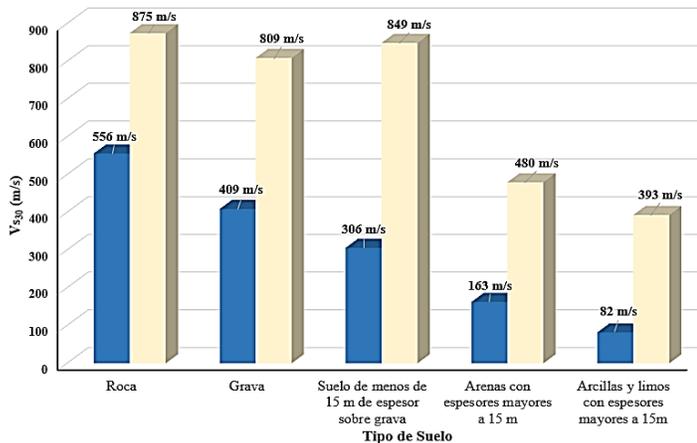


Figura 3. Valores de  $V_{s30}$  según el tipo de suelo.

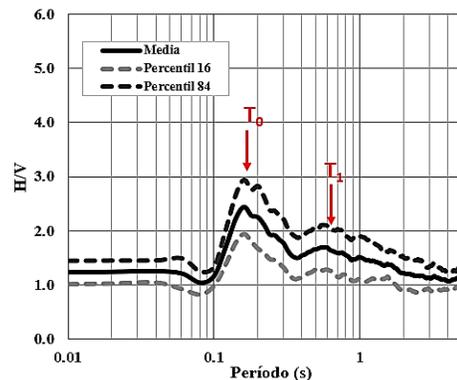


Figura 6. Periodos de vibración del sitio obtenidos del Microtremor, dos picos en diferentes periodos.

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 ( $T=4H/V_{s30}$ ), como se muestra en la Figura 7.

En la Figura 7, se observa que la relación  $4H/V_{S30}$  permite estimar de forma práctica el período 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 sitio según la norma E.030 (MVCS, 2018): S0, S1, S2 y S3.

Se observó que el periodo teórico ( $T=4H/V_{S30}$ ) 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.

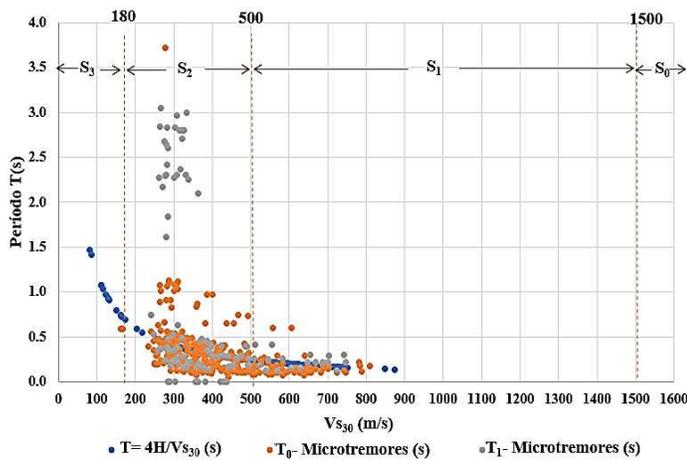


Figura 7. Relación de T y  $V_{S30}$  de los suelos.

Se realizó una clasificación de sitio 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 sitio con velocidades  $V_{S30}$  entre 200 m/s y 500 m/s (Sitio 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 5 y la Figura 8.

Tabla 5. Tipos de Sitio en función de  $V_{S30}$

Sitio	Norma E.030		Estándar ASCE 7-16			
	# perfiles	$V_{S30}$ (m/s) Min Max	Sitio	# 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 sitio se encuentran sobre depósitos de suelo 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  $V_{S30}$ .

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 sitio según la Norma E-030 vigente, se observa que la mayoría se clasifica como Sitio 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 sitio 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.

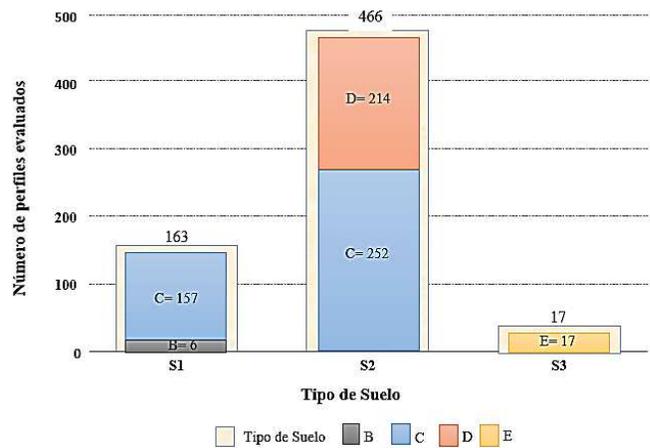


Figura 8. Comparación del tipo de sitio según la norma peruana E.030 y el estándar ASCE 7-16.

### 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 sitio aumentó en la mayoría de las estaciones, en comparación con las mediciones realizadas con microtremores. La Figura 9 y la Tabla 6 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.

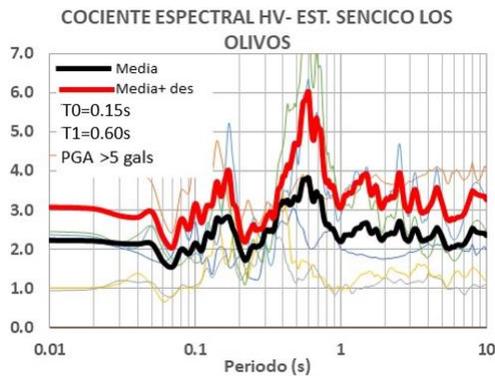


Figura 9. Cociente espectral de la estación SENCICO Los Olivos.

Además, se ha identificado que el sitio basado en los primeros 30 m de profundidad, resulta insuficiente para representar adecuadamente la respuesta sísmica de los depósitos profundos del sitio, 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 6. Estaciones acelerográficas de SENCICO con información de velocidades de ondas de corte y períodos del sitio

Estación	Registros	$V_s$ (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 <sub>2</sub>
Chorrillos	3	347	0.18	-	0.20	0.90	S <sub>2</sub>
Ayacucho	3	400	0.97	-	0.15	0.60	S <sub>2</sub>
Huancayo	3	467	0.74	-	0.30	0.60	S <sub>2</sub>
San Borja	3	785	0.12	0.18	0.30	0.60	S <sub>1</sub>
Ica	3	249	0.45	0.52	0.67	3.03	S <sub>2</sub>
Tacna	3	424	0.27	-	0.15	0.60	S <sub>2</sub>

#### 4 PROPUESTA DE CLASIFICACIÓN

La norma E.030 establece que el espectro de diseño está determinado por el tipo de perfil del sitio 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 sitio 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 sitio por debajo de 30 m hacen que el sitio sea más flexible, lo que implica que la clasificación del sitio debe

modificarse o desarrollar un estudio de análisis de respuesta de sitio.

La Tabla 7 presenta una nueva propuesta de clasificación de sitio. Es importante destacar que, mientras que la norma E.030 agrupa el sitio 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 7. Propuesta de clasificación sísmica de sitio

Perfil	$V_{s30}$ (m/s)	$T_o$ (s)
S0	> 800	< 0.2 s
S1	550 - 800	0.2 s - 0.4 s
S2	350 - 550	0.4 s - 0.6 s
S3	200 - 350	0.6 s - 0.9 s
S4	< 200	> 0.9 s
S5	Requiere análisis de sitio	Medición de Microtremor

#### 4.1 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.

Adicionalmente, se clasificaron los perfiles del sitio 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 sitio y su comportamiento frente a sismos de mayor magnitud.

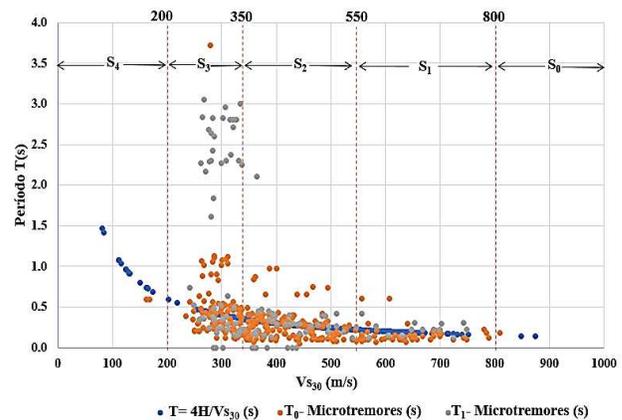


Figura 10. Relación de T y  $V_{s30}$  de los suelos, según la nueva propuesta.

En la Tabla 8 y Figura 11 se presentan los registros acelerográficos utilizados y las características del perfil del sitio.

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 sitio. También se superpusieron los espectros normalizados de Seed et al. (1974) para cada tipo de sitio (Figura 12).

Los resultados confirmaron que la propuesta tiene un buen ajuste.

Tabla 8. Registros sísmicos utilizados para el análisis de sitio

Fecha	Mw	Estación	V <sub>s30</sub> (m/s)	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	T (s) Microtr.	Sitio
17/10/1966	7.6	PQR	619	269	0.18	S1
15/08/2007	7.9	PARCONA	422	484	0.34	S2
15/08/2007	7.9	UNICA	255	334	0.62	S3
26/05/2019	8.0	UNAMUNO GUAYAQUIL	114	20	-	S4
19/09/1985	8.1	SCT (MÉXICO)	75	161	-	S4

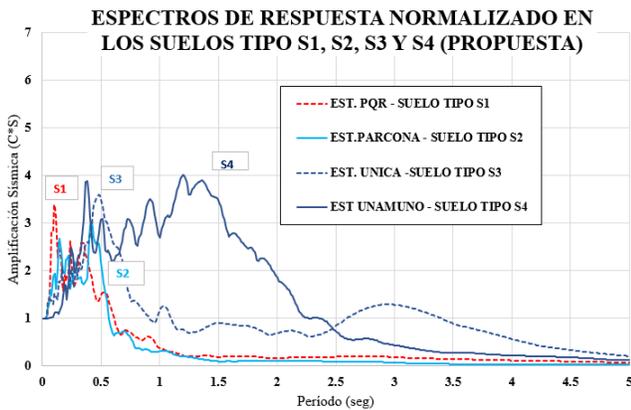


Figura 11. Espectros de aceleración normalizados para los diferentes tipos de sitio S1, S2, S3 y S4.

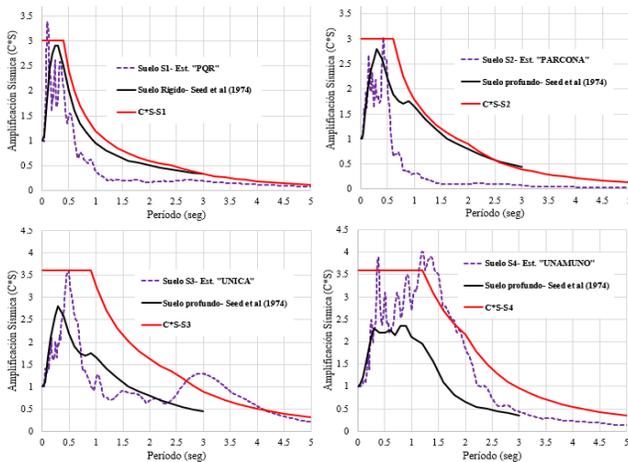


Figura 12. Comparación de espectros de aceleración normalizados de los diferentes tipos de sitio (S1, S2, S3 y S4), los espectros C\*S y los espectros normalizados de Seed et al (1974)

## 5 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 Sitio para Perú esté basada en los parámetros: V<sub>s30</sub> y el período predominante del sitio T<sub>s</sub>.

En la propuesta de Clasificación, se incorpora un nuevo perfil del sitio entre el rango de valores de V<sub>s30</sub> de 200 m/s a 550 m/s (S2 y S3).

## 6 AGRADECIMIENTOS

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

## 7 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 acelerográficas. Reporte Técnico. In press.

Alva, J.E., Ortiz, C.E. and Soto, J. (2019). Registros en Perú y Ecuador del Sismo de Lagunas-Alto Amazonas-Loreto del 26 de mayo de 2019. VII Conferencia Ecuatoriana de Ingeniería Sísmica. Guayaquil, Ecuador.

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.

Alva, J.E. (2021). Contributions of Geotechnical Engineering to E.030 Earthquake-Resistant Code (In Spanish). *Proceeding of 34th National Symposium on Disaster Prevention and the International Symposium on Earthquake-Resistant Engineering*, 20–21 of August. Lima, Peru.

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).

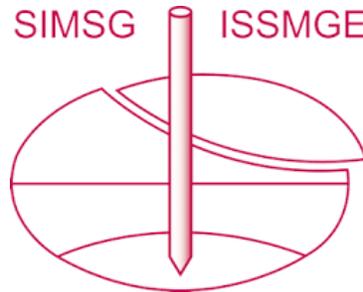
Eurocode 8 (2004). Design of structures for earthquake resistance. European Committee for Standardization.

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 Sistematizada de Perfiles de Suelo. <https://perfilesusuelos.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.

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

*The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12<sup>th</sup> to November 16<sup>th</sup> 2024 in Chile.*