

Espectros de Diseño para Edificaciones Peruanas

Alejandro Muñoz, Félix Alvarado, Guillermo Zavala, Jorge Zegarra
Pontificia Universidad Católica del Perú

RESUMEN

Se presenta una propuesta de espectros de diseño para edificaciones peruanas. Esta propuesta intenta uniformizar el peligro sísmico en el diseño de obras civiles, incorporando el comportamiento inelástico de los suelos durante sismos severos y el efecto de la distancia epicentral en la atenuación de las diferentes ordenadas espectrales. Como parte de la propuesta se sugiere una nueva metodología para la clasificación de los suelos. En suelos buenos, los espectros que se proponen tienen valores similares a los de la norma peruana en periodos cortos, mientras que para periodos largos los valores propuestos son mayores. En suelos malos la relación entre ambos espectros depende de la zona sísmica.

1. INTRODUCCION

Los espectros constituyen actualmente una de las herramientas más usadas para representar el Peligro Sísmico con fines de diseño sismorresistente.

En los últimos años se han hecho esfuerzos por uniformizar el peligro sísmico en el diseño de obras civiles de igual uso y características dinámicas diferentes. Esto se ha tratado de lograr asociando las ordenadas espectrales de diseño a la misma probabilidad de excedencia en todo el rango de periodos estructurales. Por otro lado se ha tratado de incorporar la influencia del comportamiento no lineal de los suelos en los espectros. Este documento presenta una propuesta de espectros de diseño para obras civiles en el Perú, incorporando dichos conceptos

2. INFLUENCIA DE LA ATENUACION Y LOS SUELOS EN LAS ORDENADAS ESPECTRALES

Los espectros actuales usados en muchos códigos de diseño sismorresistente, como en Perú, se basan en una aceleración pico del suelo (S_{a0}) asociada a un cierto nivel de excedencia. Este enfoque conduce a que las ordenadas espectrales, S_{a1} y S_{a2} en la figura 1, estén asociadas a valores de excedencia no necesariamente similares y por tanto para las estructuras correspondientes no se estaría considerando el mismo nivel de peligro.

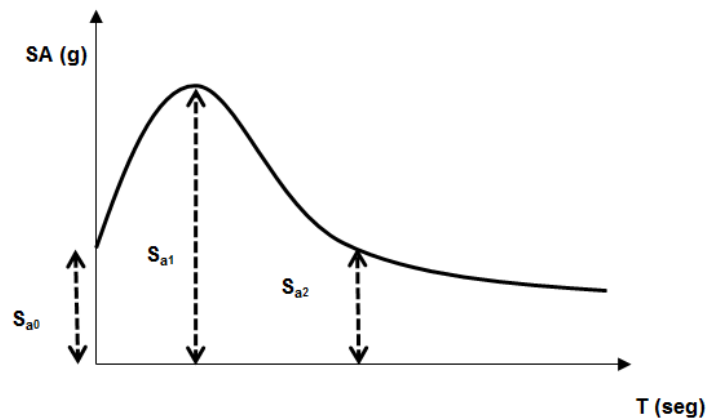


Figura 1. Espectro convencional que se escala con la aceleración pico del suelo.

Se conoce que el movimiento del suelo se atenúa con la distancia al foco de manera que las componentes de periodo corto decaen con más rapidez que las componentes de periodo largo. Es por esta razón que los espectros cambian de forma con la distancia al foco (figura 2). Por tanto es necesario considerar en la forma espectral esta variación en el intento de obtener ordenadas espectrales asociadas al mismo valor de probabilidad de excedencia.

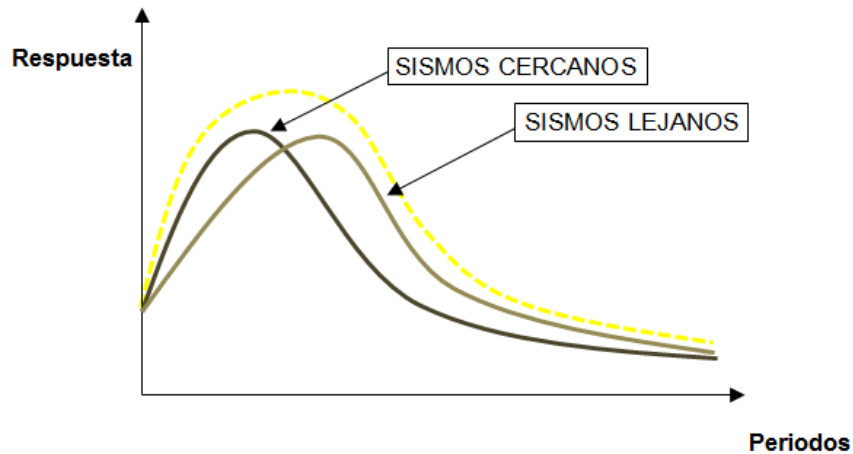


Figura 2. Efecto de la distancia epicentral en las ordenas espectrales

Los terremotos severos recientes han confirmado la fuerte influencia del comportamiento inelástico de los suelos en las aceleraciones de superficie.

Si la aceleración de la roca es baja, entonces es probable que el suelo se comporte elásticamente, sin daño en su estructura interna. En este caso existiría proporcionalidad entre la aceleración máxima en roca y el valor máximo de la aceleración en la superficie (a_r y a_s en la figura 3).

En terremotos severos, con aceleraciones altas en roca, la estructura del suelo sufrirá daño y entrara en régimen inelástico con la consiguiente disminución de la aceleración máxima en superficie.

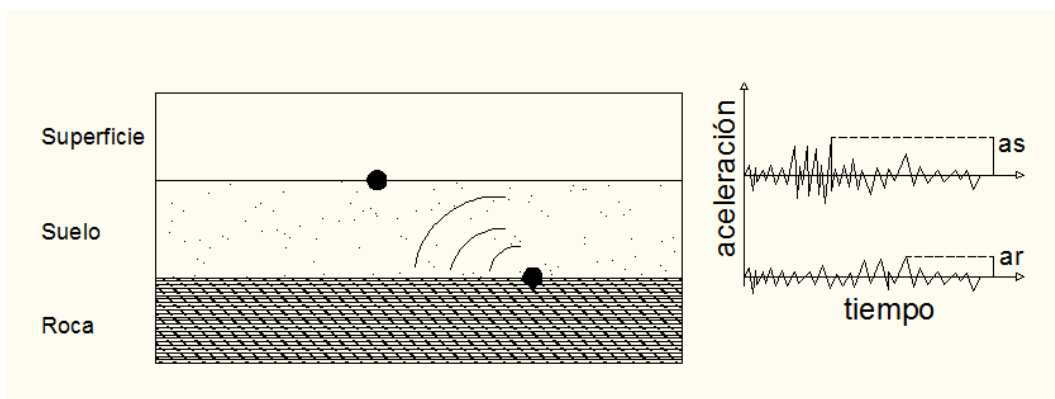


Figura 3. Influencia de los suelos en la amplificación de las aceleraciones

3. PROPUESTA DE ZONIFICACION Y VALORES ESPECTRALES

La figura 4 muestra los mapas de ordenadas espectrales en roca para periodos estructurales de 0, 0.2 y 1 segundos. Estos mapas, los primeros obtenidos en el Perú, fueron elaborados por Monroy y Bolaños [1] en el año 2004.

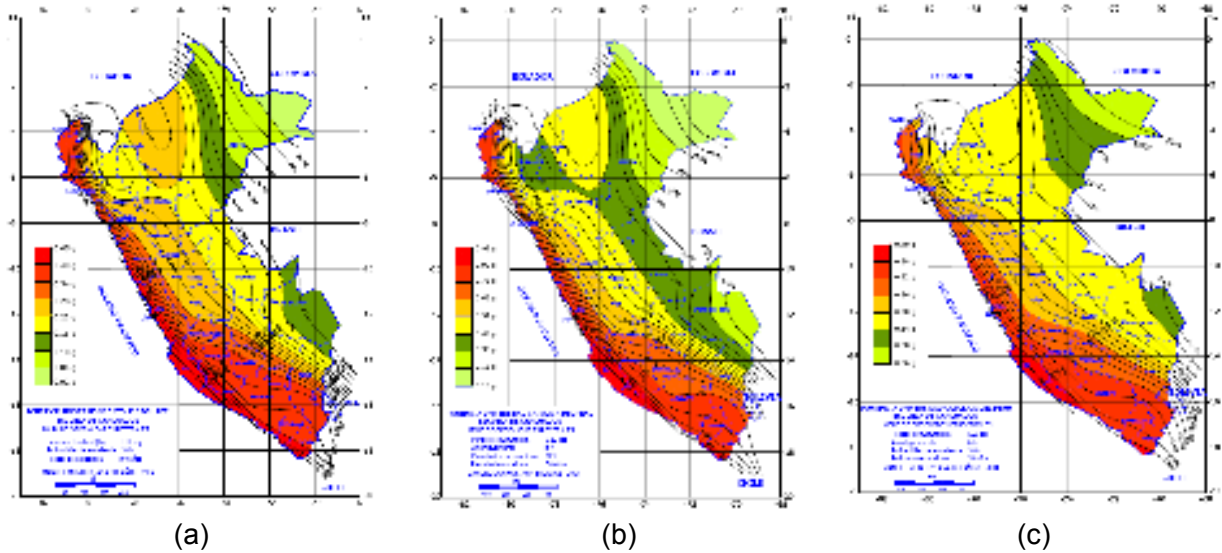


Figura 4. Mapas de ordenadas espectrales con diferentes periodos estructurales para el Perú, 2004.

Para considerar la diferencia entre la atenuación de las ordenadas espectrales Monroy y Bolaños usaron la ley de atenuación de Young et al. (1997), que se muestra a continuación:

$$\ln(S_a) = 0.2418 + 1.414 \cdot M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \cdot \ln(R + 1.7818 e^{0.554 \cdot M}) + 0.00607 \cdot H + 0.3846 \cdot Z_t$$

Para obtener los valores de aceleraciones espectrales en roca se puede utilizar los mapas de isoaceleraciones espectrales (figuras 4.b y 4.c). Sin embargo, por simplicidad, se propone utilizar las zonas de la actual Norma Peruana de Diseño Sismorresistente [2] junto a los valores espectrales para 0.2 y 1 seg. , S_s y S_1 , obtenidos de los mapas referidos como valores promedio e indicados en la Tabla 1.

Tabla 1. Aceleraciones espectrales para periodos estructurales de 0.2 segundos (S_s), 1 segundo (S_1) y parámetro Z (PGA) para las tres zonas sísmicas del territorio peruano.

	S_s	S_1	Z (PGA)
Costa	1	0.42	0.4
Sierra	0.75	0.31	0.3
Selva	0.375	0.16	0.15

4. PROPUESTA PARA INCOPORAR LOS EFECTOS DE SITIO

El cociente entre los valores espectrales en superficie y en roca cambia según el perfil de suelo, periodos estructurales y tamaños del evento sísmico. Para considerar el efecto del perfil de suelo, es necesario establecer una clasificación sencilla de los suelos y asignarles los factores de amplificación respectivos.

Se propone usar la siguiente versión simplificada del estándar ASCE 7-05 [3], según la cual para clasificar el estrato se debe estudiar los 30 metros superiores. En todos los casos se debe evaluar un parámetro representativo y según su valor adoptar un tipo de estrato. El valor característico del suelo podrá ser calculado utilizando una de las alternativas que se detallan a continuación.

Como primera alternativa se puede utilizar el ensayo estándar de penetración (SPT), aplicable para todo tipo de suelo. Se utiliza el valor promedio de N , resultado del SPT, calculado como la media armónica de los valores de N en cada estrato (N_i), sin importar si el suelo es cohesivo o granular.

Como segunda alternativa se puede utilizar el ensayo estándar de penetración (SPT) para suelos granulares y la resistencia al corte no drenado (s_u) para suelos cohesivos. Así, se deberá analizar los estratos suelos granulares y cohesivos separadamente. Para los suelos granulares se calcula N promedio según la primera alternativa, considerando solamente los espesores de cada uno de los estratos granulares. Para los suelos cohesivos se utiliza la resistencia al corte no drenado (s_u) promedio, la cual se calcula como la media armónica de los valores de s_u en cada estrato cohesivo (s_{ui}). Este método también es aplicable si solamente se encuentran suelos cohesivos. Si al comparar con la tabla 1 se obtiene clasificaciones de sitio distintas utilizando el valor característico de los estratos cohesivos y granulares, se toma la más desfavorable.

La tercera alternativa consiste en estimar la velocidad de ondas de corte (v_s), la cual se calcula como la media armónica de los valores de velocidad de onda de corte en cada estrato (v_{si}).

La tabla 2 indica los valores promedio característicos de los perfiles clase A, B, C, D y E. Por simplicidad, los perfiles A, B y C del estándar ASCE han sido agrupados.

Tabla 2. Clasificación de sitio para el cálculo de espectros de diseño.

Tipo de Perfil	Descripción	Ensayo estándar de penetración (SPT)	Resistencia promedio al corte no drenado (s_u)	Velocidad promedio de Onda de corte (v_s)
A	Roca dura	>50	> 1 kg/cm ² (100 kPa)	> 360 m/s
B	Roca			
C	Roca blanda y suelo muy denso o duro			
D	Arena medianamente densa a densa o arcilla compacta	15 a 50	0.5 a 1 kg/cm ² (50 a 100 kPa)	180 a 360 m/s
E	Arena suelta o arcilla blanda	<15	< 0.5 kg/cm ² (< 50 kPa)	< 360 m/s
		Cualquier perfil que tenga más de 3m de suelo teniendo las siguientes características: 1. Índice de Plasticidad IP > 20 2. Contenido de humedad $w > 40\%$ y 3. Resistencia al corte No Drenado $s_u < 0.25$ kg/cm ²		
F	---	---	---	---

Factores de amplificación de suelo

Los valores de aceleración espectral en roca para 0.2 y 1 segundos (S_s y S_1) son modificados por el perfil de suelo y en la superficie las nuevas ordenadas espectrales S_{DS} y S_{D1} pueden expresarse mediante factores de amplificación (F_a y F_v) como:

$$S_{DS} = F_a * S_s \quad \text{y} \quad S_{D1} = F_v * S_1$$

La tabla 3 muestra los valores de F_a y F_v propuestos para las tres zonas. Estos valores están basados en ASCE 7-05 y en la distribución en territorio peruano de la aceleración pico en roca.

Tabla 3. Factores de amplificación de suelo Fa y Fv

Clase de sitio	Zona Tipo de Suelo	Costa		Sierra		Selva	
		Fa	Fv	Fa	Fv	Fa	Fv
A	Roca Dura	1	1.4	1.1	1.5	1.1	1.4
B	Roca Moderadamente dura						
C	Roca Suave, Suelo Denso						
D	Suelo Rígido	1	1.6	1.2	1.8	1.3	1.9
E	Suelo Blando, Arcilla	0.9	2.4	1.2	2.6	1.7	3
F	Requiere estudio de sitio	-	-	-	-	-	-

5. PROPUESTA DE NUEVOS ESPECTROS

Esquema general adoptado

La figura 5 muestra la forma del espectro propuesto, adoptado del ASCE.

Para construir este espectro es necesario tener ordenadas espectrales y factores de amplificación de suelo correspondientes a periodos especiales, periodos ancla.

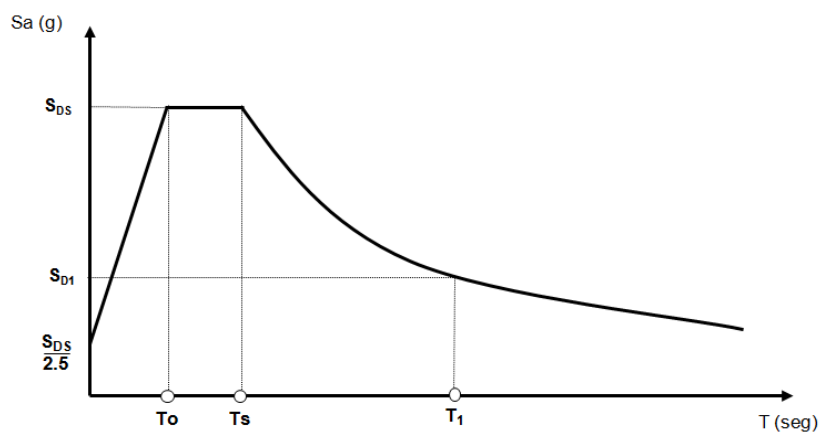


Figura 5. Espectro de peligro sísmico ASCE/SEI-7-05

Periodos ancla y forma espectral

El espectro se construye utilizando ciertos periodos: T_0 , T_S y T_1 (periodos ancla) con sus correspondientes valores de pseudoaceleración (S_{DS} y S_{D1}). Luego, para cada rango de periodos se establecen funciones de interpolación sencillas.

Los periodos ancla T_0 , T_S y T_1 se calculan con las siguientes expresiones, obteniéndose todos los valores de tiempo en segundos:

$$T_0 = 0.2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad T_S = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad T_1 = 1$$

El tramo inicial del espectro ($T=0$ a $T=T_0$) es una recta definida por la siguiente expresión, donde T es el periodo estructural:

$$S_a = S_{DS} \left(0.4 + 0.6 \frac{T}{T_0} \right)$$

La plataforma localizada entre $T=T_0$ y $T=T_S$, que es el límite máximo de aceleraciones para periodos cortos y toma un único valor $S_a = S_{DS}$.

Por último, el tramo curvo del espectro que comprende valores de T mayores a T_S , está definido como la siguiente expresión:

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T}$$

6. COMPARACION CON LOS ESPECTROS DE LA ACTUAL NORMA PERUANA.

Se compararon los valores espectrales de los perfiles A/B/C, referidos como “suelo bueno”, con los correspondientes valores del perfil S1 de la actual norma. De manera similar se compararon los resultados del perfil tipo E, referidos como “suelo malo”, con el perfil S3 de la norma actual. Debido a la distinta naturaleza del método de clasificación, no necesariamente un suelo S1 de la norma actual clasificaría como uno A/B/C en esta propuesta

Comparación en Suelo Bueno

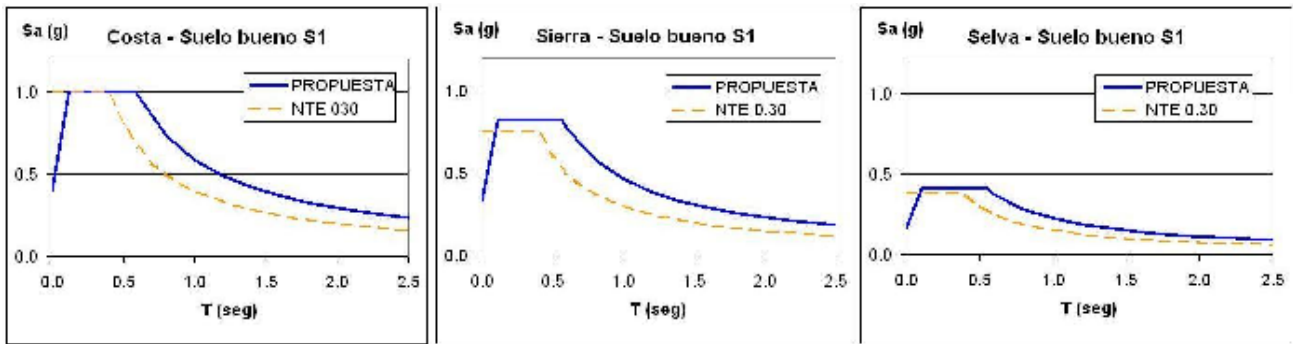


Figura 6. Comparación de espectros de diseño NTP-E.030 vs PROPUESTA, para costa, sierra y selva en suelo bueno

La figura 6 muestra que, para periodos cortos, las ordenadas espectrales de la norma y la propuesta son similares mientras que para periodos medios y largos, las ordenadas de la propuesta son del orden del 30% mayores a los valores de la norma.

Comparación en Suelo Malo

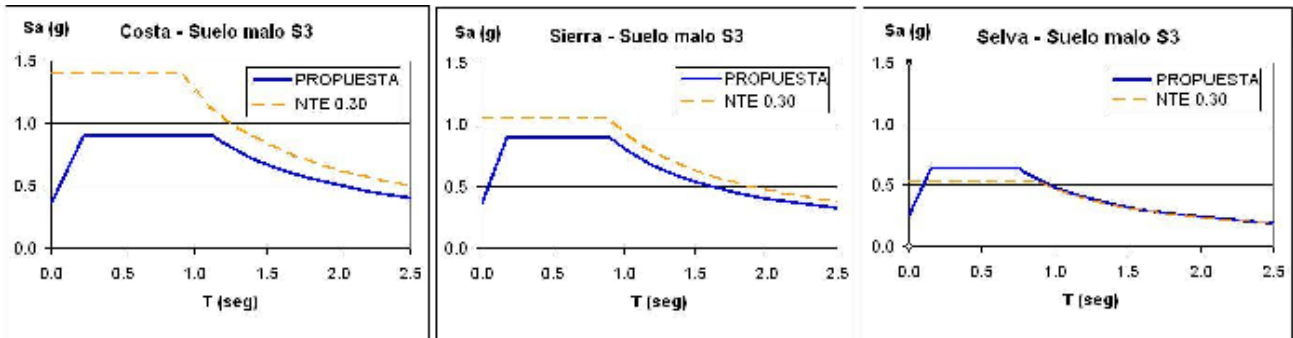


Figura 7. Comparación de espectros de diseño NTP-E.030 vs PROPUESTA, para costa, sierra y selva en suelo malo

En la costa, para periodos cortos, los valores propuestos son menores a los correspondientes de la norma (del orden del 50% menos) y para periodos medios y largos esta diferencia se reduce al 25% aproximadamente. En la sierra la respuesta espectral propuesta es menor en 15% que la norma, para todo el rango de periodos. En la selva, para periodos cortos, la propuesta supera en 20% la respuesta espectral de la norma, y para periodos medios y largos los valores son similares.

7. CONCLUSIONES

- Los espectros de diseño de la actual Norma Peruana de Diseño Sismorresistente no incorporan el comportamiento inelástico de los suelos, ni tampoco la diferente atenuación que sufren las ordenadas espectrales con la distancia a las fuentes. La presente propuesta de espectros de diseño ha tratado de incorporar de manera sencilla ambos efectos.
- El nuevo sistema de clasificación de suelos que se propone, a diferencia de la actual norma, permite una clasificación más objetiva sustentada en valores representativos del estrato.
- En suelos buenos, los valores espectrales propuestos son similares a los de la actual norma para periodos cortos; en cambio los valores propuestos son más altos para periodos medios y largos.
- En suelos malos la relación entre los valores espectrales depende de la zona sísmica. La propuesta presenta una reducción considerable de aceleraciones espectrales para la costa, una reducción moderada para la sierra, y un pequeño aumento para la selva.

REFERENCIAS

- [1]. Monroy M., Bolaños L., *“Espectros de Peligro Sísmico Uniforme – Programa MRiesgo”*, Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería Civil – Pontificia Universidad Católica del Perú, 2004.
- [2]. SENCICO, *“Norma Técnica de Edificación E.030 Diseño Sismorresistente”*, Reglamento Nacional de Construcciones, 2003.
- [3]. ASCE/SEI Standard 7-05 *“Minimum Design Loads for Buildings and other Structures”*, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2006.
- [4]. Newmark, N.M. and Hall, W.J., *“Earthquake Spectra and Design”*, EERI Monograph, Berkeley, California, 103 pp, 1982.
- [5]. Kramer, S.L., *“Geotechnical Earthquake Engineering”*, Prentice Hall, Upper Saddle River, Nueva Jersey, 1996.
- [6]. Borcherdt, R.D., *“Estimates of Site-Dependent Response Spectra for Design (Methodology and justification)”*, EERI Monograph, Earthquake Spectra, Vol 10, N°4, 1994.