

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



Inclusión de los Efectos de Sismo de Fuente Cercana en la
Norma de Diseño Sismorresistente Peruana

Tesis para obtener el grado académico de Maestra en Ingeniería
Civil con mención en Estructuras Sismorresistentes que presenta:

Carolina Tengan Shimabukuro

Asesor:

Juan Alejandro Muñoz Pelaez

Lima, 2024

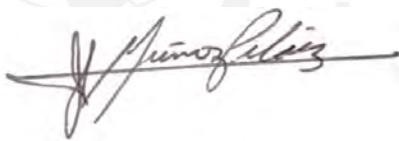
Informe de Similitud

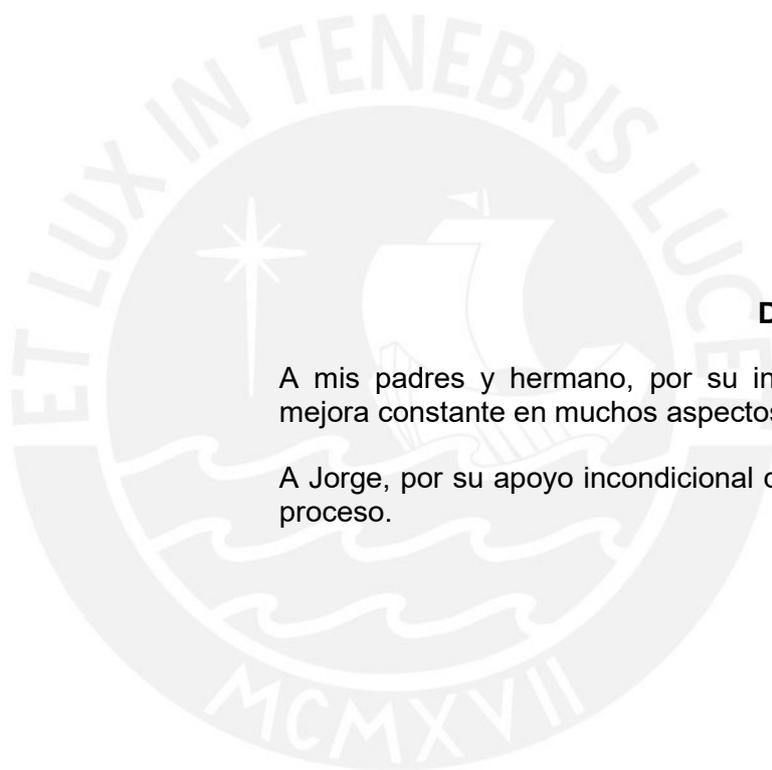
Yo, Juan Alejandro Muñoz Peláez, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada ***Inclusión de los Efectos de Sismo de Fuente Cercana en la Norma de Diseño Sismorresistente Peruana***, de la autora Carolina Tengan Shimabukuro, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 20%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 5 de julio del 2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

Lima, 8 de julio del 2024.

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>Muñoz Peláez Juan Alejandro</u>	
DNI: 09857570	Firma; 
ORCID: 0000-0002-3719-4721	



DEDICATORIA

A mis padres y hermano, por su inspiración a la mejora constante en muchos aspectos de mi vida.

A Jorge, por su apoyo incondicional durante todo el proceso.

AGRADECIMIENTOS

A los profesores de la especialidad de ingeniería civil de la universidad, por su mentoría y aporte al conocimiento durante mis años de estudio.

A mi asesor Alejandro Muñoz Peláez, por su guía y soporte durante el desarrollo del trabajo de tesis.



RESUMEN

El estado del conocimiento de los sismos generados en fallas indica que en sitios ubicados hasta 60 km se pueden generar picos en los registros de aceleración, velocidad y/o desplazamiento. Esto se conoce como efectos de fuente cercana. En el Perú, tenemos una gran cantidad de sistemas de fallas activas que podrían presentar estos efectos.

Se revisó la manera en que distintas normas internacionales incluyen estos efectos en los espectros de diseño. Se vio que la metodología establecida por el Uniform Building Code (Structural Engineering Design Provisions - 1997) es la que se adecua al estado del conocimiento de las fallas y sus efectos en el país en conjunto con la norma peruana de diseño sismorresistente E.030-19.

Se adaptó la metodología del UBC-97 para la inclusión de los efectos de fuente cercana en el espectro de diseño peruano. El procedimiento desarrollado consiste en encontrar factores con los cuales afectar cada zona del espectro elástico de la norma para incluir los efectos de fuente cercana.

La propuesta desarrollada ha hecho depender los factores de la zona sísmica, del perfil del suelo, del tipo de fuente sísmica y de la distancia a la fuente. Se ha encontrado que para la zona sísmica 4 y a una distancia de 2 km, estos factores están entre 1.3 y 1.1 para la región de periodos cortos del espectro en perfiles de suelo S0 a S3 y para la zona de periodos largos los factores se encuentran entre 2.1 y 1.4 para estos mismos perfiles de suelo. Para la zona sísmica 2, se ha encontrado que los factores de amplificación en periodos cortos tendrían prácticamente el mismo rango, pero solo para los perfiles S0 a S2, mientras que para periodos largos los factores serían de 2.1 a 1.1 y para perfiles S0 a S3.

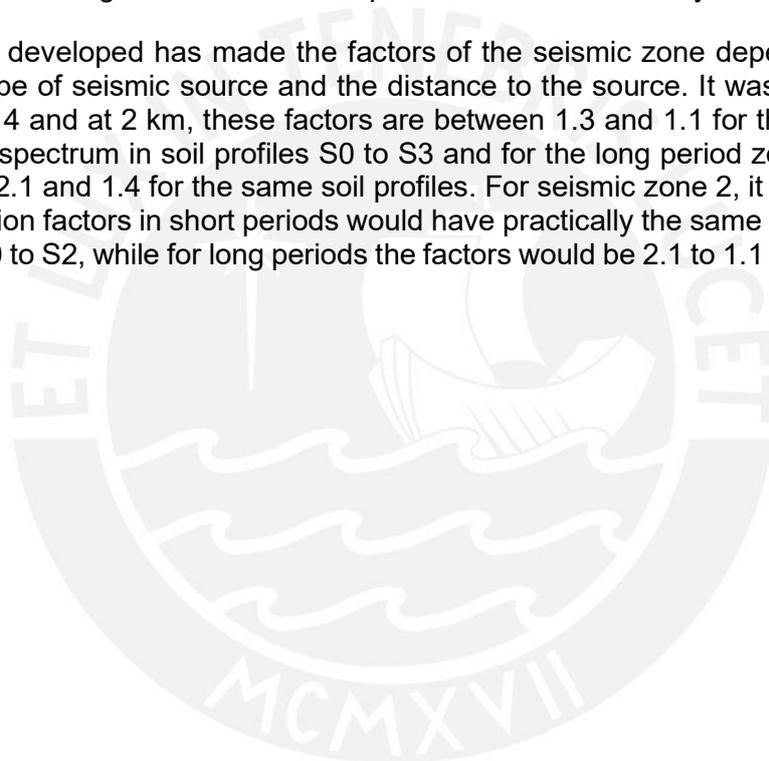
ABSTRACT

The state of knowledge of earthquakes generated in faults shows that in sites located up to 60 km, peaks can be generated in the acceleration, velocity and/or displacement records. This is known as near source effects. In Peru, we have many active fault systems that could present these effects.

The way in which different international standards include these effects in the design spectrums was reviewed. The methodology established by the Uniform Building Code (Structural Engineering Design Provisions - 1997) is the one that is adapted to the state of knowledge of the faults and their effects in the country with the Peruvian earthquake-resistant design standard E.030-19.

The UBC-97 methodology was adapted to include near source effects in the Peruvian design spectrum. The procedure developed consists of calculated factors which affect each area of the design standard elastic spectrum to include nearby source effects.

The proposal developed has made the factors of the seismic zone depend on the soil profile, the type of seismic source and the distance to the source. It was found that for seismic zone 4 and at 2 km, these factors are between 1.3 and 1.1 for the short period region of the spectrum in soil profiles S0 to S3 and for the long period zone the factors are between 2.1 and 1.4 for the same soil profiles. For seismic zone 2, it was found that the amplification factors in short periods would have practically the same range, but only for profiles S0 to S2, while for long periods the factors would be 2.1 to 1.1 and for profiles S0 to S3.



ÍNDICE DE CONTENIDO

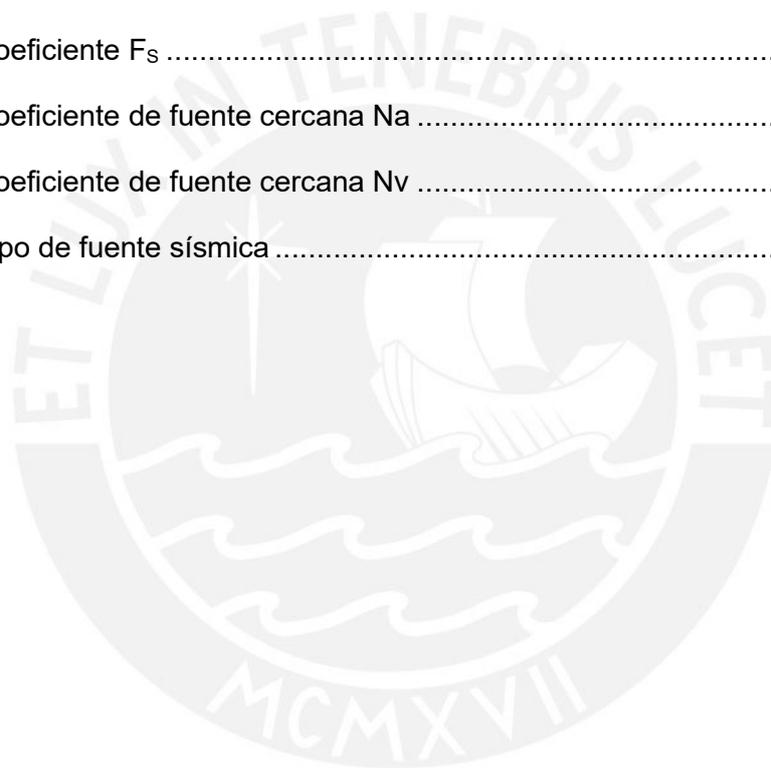
PRIMERA PARTE: MARCO DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
CAPÍTULO 1.- Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Justificación.....	1
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo general	2
1.3.2. Objetivos específicos.....	2
1.4. Hipótesis	2
1.5. Alcance	2
1.6. Metodología	2
CAPÍTULO 2.- Estado del Arte	4
2.1. Efectos de fuente cercana.....	4
2.1.1. Componente sísmico vertical:.....	4
2.1.2. Efecto hanging-wall:	5
2.1.3. Fling-step:.....	5
2.1.4. Directividad.....	6
2.1.5. Pulso de velocidad.....	6
2.1.6. Componentes sísmicos rotacionales.....	7
2.2. Sismos con efectos de fuente cercana históricos	7
2.3. Consideración de efectos de fuente cercana en normas internacionales.....	8
2.3.1. Consideración de efectos de fuente cercana en Estados Unidos.....	9
2.4. Situación actual en el Perú	12
2.4.1. Sismos en el Perú.....	13
2.4.2. Sistema de fallas activas en el Perú	15
2.4.3. Sismos históricos generados en fallas en el Perú	17

2.5. Selección de la metodología para incorporar los efectos de fuente cercana en los espectros peruanos	17
2.5.1. Espectro de diseño según UBC-97	18
SEGUNDA PARTE: METODOLOGÍA Y RESULTADOS.....	21
CAPÍTULO 3.- Desarrollo de la metodología para incluir los efectos de fuente cercana en los espectros peruanos	21
3.1. Compatibilización de parámetros para el cálculo del Espectro FC.....	21
3.1.1. Zona sísmica	21
3.1.2. Perfil del suelo	23
3.2. Cálculo de factores de fuente cercana	25
3.3. Rango de aplicabilidad de fórmulas propuestas	31
3.3.1. Discusión de resultados.....	39
3.3.2. Ejemplo de cálculo utilizando las ecuaciones propuestas	39
CAPÍTULO 4.- Propuesta para el cálculo de factores que considere los efectos de fuente cercana en la norma E.030-19.....	43
CAPÍTULO 5.- Conclusiones y Recomendaciones	46
REFERENCIAS	47
ANEXOS.....	49
Anexo 1: Ejemplo de cálculo de espectro considerando un sismo en la falla Tambomachay	49
Anexo 2: Ejemplo de cálculo de espectro considerando un sismo en la falla Chololo	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 – Principales sistemas de fallas geológicas a nivel nacional	15
Tabla 2 – Coeficiente Sísmico C_a (Tabla 16-Q, UBC-97)	19
Tabla 3 – Coeficiente Sísmico C_v (Tabla 16-R, UBC-97).....	19
Tabla 4 – Tipo de perfiles de suelo (UBC-97)	20
Tabla 5 – Factor de fuente cercana N_a (Tabla 16-S, UBC-97).....	20
Tabla 6 – Factor de fuente cercana N_v (Tabla 16-T, UBC-97)	20
Tabla 7 – Tipo de fuente sísmica (Tabla 16-U, UBC-97).....	20
Tabla 8 – Factores de zona (Tabla N°1, E.030-2019)	22
Tabla 9 – Coeficiente sísmico C_a ajustado a la norma E.030-2019	23
Tabla 10 – Coeficiente sísmico C_v ajustado a la norma E.030-2019.....	23
Tabla 11 – Clasificación de los perfiles de suelo (Tabla N°2, E.030-2019).....	23
Tabla 12 – Comparación de perfiles de suelo del UBC-97 y la norma E.030-2019	24
Tabla 13 – Valores de C_a y C_v para los tipos de suelo según la norma E.030-2019 ..	24
Tabla 14 – Valores finales de C_a para la norma E.030-2019	24
Tabla 15 – Valores finales de C_v para la norma E.030-2019	24
Tabla 16 – Resumen de ecuaciones obtenidas para cada región	28
Tabla 17 – Resumen de ecuaciones simplificadas.....	28
Tabla 18 – Coeficiente F_a'	29
Tabla 19 – Coeficiente F_A	29
Tabla 20 – Coeficiente F_v'	29
Tabla 21 – Coeficiente F_v	30
Tabla 22 – Coeficiente F_s	30
Tabla 23 – Factor de amplificación – Distancia ≤ 2 km	33
Tabla 24 – Factor de amplificación – Distancia de 5 km	33
Tabla 25 – Factor de amplificación – Distancia de 10 km	34
Tabla 26 – Factor de amplificación – Distancia > 15 km	34

Tabla 27 – Ejemplo de aplicación – Coeficiente F_A	41
Tabla 28 – Ejemplo de aplicación – Coeficiente F_V	41
Tabla 29 – Ejemplo de aplicación – Coeficiente F_S	41
Tabla 30 – Ejemplo de aplicación - Resumen de ecuaciones simplificadas	42
Tabla 31 – Ejemplo de aplicación - Factor de fuente cercana N_a (Tabla 16-S, UBC-97)	42
Tabla 32 – Factor de fuente cercana (FC)	43
Tabla 33 – Coeficiente F_A	43
Tabla 34 – Coeficiente F_V	44
Tabla 35 – Coeficiente F_S	44
Tabla 36 – Coeficiente de fuente cercana N_a	44
Tabla 37 – Coeficiente de fuente cercana N_v	44
Tabla 38 – Tipo de fuente sísmica	45



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ratio de aceleración espectral vertical / horizontal para el terremoto de Northridge, a una distancia de 5, 10, 20 y 40 km desde la proyección del plano de falla a la superficie (Bozorgnia et al., 1995) como se citó en Grimaz y Malisan (2014).....	4
Figura 2 Efecto Hanging-wall y footwall (Li y Xie, 2007) como se citó en Grimaz y Malisan (2014).....	5
Figura 3 Dirección de falla normal (FN) y falla paralela (FP) en casos de fallas tipo strike-slip y dip-slip, y desplazamiento permanente para fling-step y falla dip-slip. (Sommerville, 2005; Chioccarelli, 2010) como se citó en Grimaz y Malisan (2014).....	5
Figura 4 Pulso sinusoidal idealizado: (a) fling-step; (b) directividad hacia adelante. Nota: las curvas han sido normalizadas para la aceleración, velocidad y desplazamiento máximo. (modificado de Kalkan y Kunnath, 2006) como se citó en Grimaz y Malisan (2014).....	6
Figura 5 Nomenclatura y convención de signos: 3 traslacionales y 3 rotacionales (Guidotti, 2012) como se citó en Grimaz y Malisan (2014).....	7
Figura 6 Registro de velocidades – Imperial Valley, California 1979 (Bolt & Abrahamson, Estimation of strong seismic ground motions, 2003) como se citó en Frau y Saragoni (2012).....	8
Figura 7 Registro de velocidades – Chi-Chi, Taiwan 1999 (Bolt, Earthquakes, 2003) como se citó en Frau y Saragoni (2012).....	8
Figura 8 Diferentes tipos de sismo según su origen. (Tavera, Análisis y evaluación de los patrones de sismicidad y escenarios sísmicos en el borde occidental del Perú, 2020).....	13
Figura 9 Distribución de sismos de foco superficial < 60 km (Bernal & Tavera, 2002)	14
Figura 10 – Esquema sismotectónico de los principales sistemas de fallas geológicas en el Perú (Tavera, Evaluación del Peligro Sísmico Asociado a los Sismos y Efectos Secundarios en Perú, 2014).....	16
Figura 11 – Espectro de diseño de respuesta (UBC-97).....	18
Figura 12 – Zonas sísmicas (Figura N°1, E.030-2019).....	22
Figura 13 – Ejemplo de espectros de aceleraciones del Espectro FC.....	25
Figura 14 – Ejemplo de espectros de aceleraciones según norma peruana E.030-2019.....	25
Figura 15 – Espectros de aceleraciones según Espectro FC y norma E.030-19.....	26
Figura 16 – Factores calculados vs Periodo.....	32
Figura 17 – Factores para una distancia ≤ 2 km y $Z=0.45g$	35

Figura 18 – Factores para una distancia ≤ 2 km y $Z=0.35g$	35
Figura 19 – Factores para una distancia ≤ 2 km y $Z=0.25g$	35
Figura 20 – Factores para una distancia de 5 km y $Z=0.45g$	36
Figura 21 – Factores para una distancia de 5 km y $Z=0.35g$	36
Figura 22 – Factores para una distancia de 5 km y $Z=0.25g$	36
Figura 23 – Factores para una distancia de 10 km y $Z=0.45g$	37
Figura 24 – Factores para una distancia de 10 km y $Z=0.35g$	37
Figura 25 – Factores para una distancia de 10 km y $Z=0.25g$	37
Figura 26 – Factores para una distancia > 15 km y $Z=0.45g$	38
Figura 27 – Factores para una distancia > 15 km y $Z=0.35g$	38
Figura 28 – Factores para una distancia > 15 km y $Z=0.25g$	38



PRIMERA PARTE: MARCO DE LA INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO 1.- Introducción

En el Perú, se realiza una gran cantidad de estudios referentes a los sismos de subducción ya que es la fuente sísmica que genera sismos con magnitudes mayores, entre 7.0 a 8.0. Pero, por otro lado, tenemos sismos que se generan en fallas geológicas ubicadas en su mayoría cerca a la Cordillera de los Andes, los cuales alcanzan magnitudes históricas máximas entre 6.0 y 7.0. Los datos obtenidos a nivel internacional de sismos generados en fallas y registrados en sitios cercanos a ésta, nos muestran que pueden generarse picos en los registros de aceleración, velocidad y/o desplazamiento en ubicaciones menores a 60 km. A esto se le conoce como efectos de fuente cercana.

Distintas normas internacionales han empezado a incluir estos efectos dentro de sus parámetros de diseño. Actualmente no se consideran estos efectos en la norma peruana de diseño sismorresistente E.030-19, a pesar de tener conocimiento de terremotos generados en fallas que ocasionaron grandes pérdidas humanas y económicas.

Se revisaron normas de diseño sismorresistente internacionales y la forma en que se consideran estos efectos dentro de los parámetros de diseño. Se utilizó como guía los parámetros del Uniform Building Code de 1997 (UBC-97) ya que se buscaba implementar un procedimiento sencillo considerando la limitada información sobre sismos generados en fallas que se tiene. Se encontró que el espectro de diseño calculado con los parámetros del UBC-97, puede llegar a superar el espectro actual de la norma peruana con factores de hasta 1.30 para periodos corto y 2.10 para periodos largos en la zona con $Z=0.25g$ y un tipo de suelo S_0 .

1.1. Planteamiento del problema

Se tiene conocimiento de estudios e investigaciones internacionales respecto a los efectos de los sismos de fuente cerca, los daños que pueden ocasionar, y de los sistemas de fallas activas a nivel nacional. A pesar de esto, actualmente la Norma E.030-19 Diseño Sismorresistente no considera estos efectos dentro de los parámetros de diseño para ningún tipo de estructuras.

1.2. Justificación

Al no incluir los efectos de fuente cercana, se puede subestimar el espectro de diseño de la norma peruana E.030-19. Esto generaría grandes pérdidas humanas y económicas en distintas ciudades ubicadas cerca de sistemas de fallas activas. Distintas normas internacionales han empezado a considerar los efectos de sismos de fuente cercana, pero actualmente la Norma Peruana no lo hace.

Como ejemplo se tienen los terremotos de 1990 y 1991 al oeste de Moyobamba con magnitudes de 6.0 y 6.5 respectivamente. El terremoto de 1990 fue localizado a 27 km de la ciudad de Moyobamba, dejando un saldo de 135 fallecidos y más de 800 heridos; mientras que el terremoto de 1991 se localizó a 18 km de la ciudad de Moyobamba, dejando 53 muertos, 252 heridos y más de 8000 viviendas con daños en las ciudades de Rioja, Moyobamba y Nueva Cajamarca. (Tavera, Buforn, Bernal, & Antayhua, 2001)

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Encontrar factores numéricos que, utilizándose en conjunto a los espectros de diseño de la Norma E.030-19 Diseño Sismorresistente, tomen en cuenta los efectos de sismos de fuente cercana y así poder tener una mejor estimación de la demanda sísmica de las estructuras.

1.3.2. Objetivos específicos

- Investigar diferentes normas internacionales que incluyan los efectos de sismos de fuente cercana.
- Identificar las fallas geológicas activas dentro del territorio nacional y los eventos sísmicos generados en éstas.
- Definir una metodología para incluir estos efectos en la norma peruana E.030-19 considerando la información disponible.
- Calcular factores que modifiquen los espectros de diseño de la norma E.030-19 de manera que se incluyan los efectos de fuente cercana.

1.4. Hipótesis

Las aceleraciones que se registran debido a un sismo de fuente cercana pueden ser incluidas en la norma E.030-19 Diseño Sismorresistente al usar factores numéricos que se multiplican al espectro de diseño.

1.5. Alcance

Se estudiaron los efectos de los sismos de fuente cercana, las normas internacionales en donde se consideran y la metodología utilizada en éstas para llegar a sus factores de modificación. Se definió la metodología para llegar a factores de modificación para utilizarlos junto a los espectros de diseño de la norma E.030-19, de manera que se pueda lograr una mejor estimación de la demanda sísmica de las estructuras.

No se utilizan Ground Motion Prediction Equations (GMPEs) debido a que actualmente no se tiene una base de datos con la información necesaria de registros de sismos generados en fallas y sus características para su aplicación.

1.6. Metodología

Para llegar al objetivo, primero se revisó la manera en que distintas normas internacionales incluyen estos efectos en sus espectros de diseño. Se observó que el espectro de diseño del UBC-97 es el más factible de ser utilizado para calcular factores a ser utilizados en conjunto con la norma peruana E.030-19 ya que considera parámetros que dependen de la cercanía a las fallas dentro de la construcción de su espectro de diseño.

Para calcular el espectro que considere los efectos de fuente cercana (Espectro FC) y calcular posteriormente los factores para ser utilizados con la norma peruana E.030-19 se compatibilizaron los valores de Z (aceleración pico) y V_{S30} (velocidad de onda de corte del suelo para los primeros 30 m) del UBC-97 al E.030-19. Luego se calculó la relación entre las fórmulas que se utilizan para obtener el Espectro FC utilizando los parámetros calculados y las fórmulas utilizadas en la norma peruana E.030-19. Esta relación calculada está expresada en parámetros que dependen de la zona sísmica, perfil del suelo, tipo de fuente sísmica y distancia a la fuente. Esta relación corresponde a los factores de amplificación del espectro de la norma peruana E.030-19 que incluyen los efectos de fuente cercana.



CAPÍTULO 2.- Estado del Arte

2.1. Efectos de fuente cercana

Según lo recopilado por Grimaz y Malisan (2014), entre las características que pueden influir en los efectos del movimiento del suelo de los sismos de fuente cercana son:

2.1.1. Componente sísmico vertical:

La relación entre la aceleración vertical pico y la aceleración horizontal del suelo puede ser mayor a 1. Esto se ha verificado en varios registros sísmicos (Elgamal and He, 2004; Shreshta, 2009; Kim et al., 2011, como se citó en Grimaz y Malisan (2014))

Esta relación depende del periodo. Por lo general, la aceleración vertical tiene mayor contenido de frecuencias que la aceleración horizontal. (Bozorgnia et al., 1995, como se citó en Grimaz y Malisan (2014))

La componente vertical del movimiento del suelo concentra la mayor parte de su energía en una banda estrecha de alta frecuencia (Collier y Elnashai, 2001, como se citó en Grimaz y Malisan (2014))

El pico de la componente vertical del movimiento ocurre ligeramente antes del pico de la componente horizontal. Este desfase generalmente aumenta con la distancia (Collier y Elnashai, 2001; Shreshta, 2009, como se citó en Grimaz y Malisan (2014))

Los códigos sísmicos suelen asumir un ratio de 2/3 en la relación entre la componente vertical y la horizontal del suelo, lo cual resulta ser poco conservador para efectos de fuente cercana.

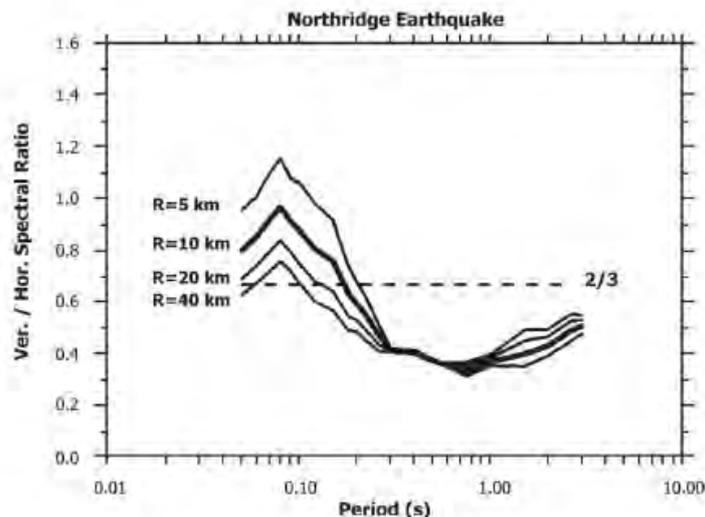


Figura 1 Ratio de aceleración espectral vertical / horizontal para el terremoto de Northridge, a una distancia de 5, 10, 20 y 40 km desde la proyección del plano de falla a la superficie (Bozorgnia et al., 1995) como se citó en Grimaz y Malisan (2014).

2.1.2. Efecto hanging-wall:

Está relacionado con el mecanismo de falla, específicamente en los casos de falla por buzamiento (dip-fault).

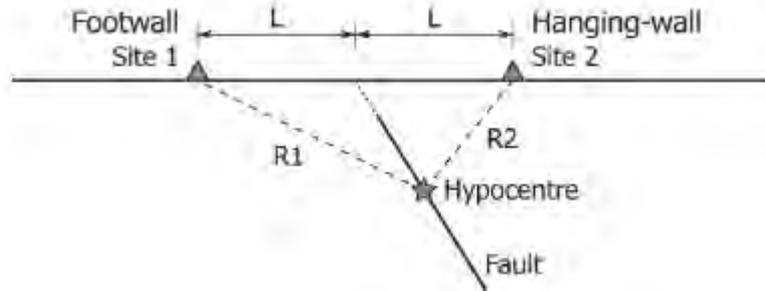


Figura 2 Efecto Hanging-wall y footwall (Li y Xie, 2007) como se citó en Grimaz y Malisan (2014).

El movimiento del suelo en la zona del hanging-wall suele ser mayor al de los sitios del footwall, en donde Shabestari y Yamazaky (2003) (como se citó en Grimaz y Malisan (2014)) indicaron valores del 46% al 50% mayores que la media calculada para fuentes cercanas a una distancia de 5 km a 25 km.

El efecto hanging-wall genera movimientos del suelo mayores y de periodo corto (Somerville, 2000, como se citó en Grimaz y Malisan (2014)) debido a la cercanía a la falla.

2.1.3. Fling-step:

Está asociado a los siguientes casos:

- Desplazamientos permanentes del suelo
- Deslizamiento en fallas tipo strike-slip paralelo a la falla, o en fallas dip-slip en la dirección normal de la falla.

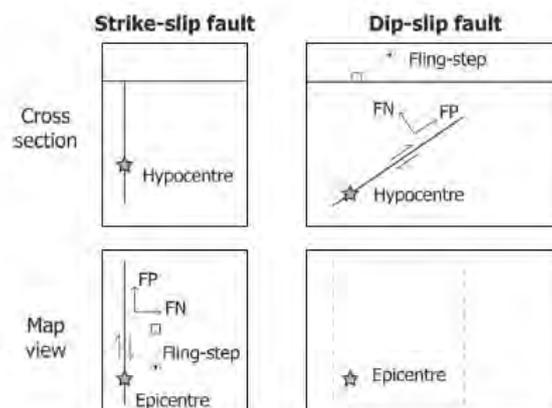


Figura 3 Dirección de falla normal (FN) y falla paralela (FP) en casos de fallas tipo strike-slip y dip-slip, y desplazamiento permanente para fling-step y falla dip-slip. (Somerville, 2005; Chioccarelli, 2010) como se citó en Grimaz y Malisan (2014).

2.1.4. Directividad

Depende de la directividad de la ruptura de la falla. Los mayores efectos, tal como se citan en Grimaz y Malisan (2014), se producen cuando:

- La ruptura se propaga hacia el sitio (Somerville, 2005)
- La velocidad de la ruptura es similar a la de la onda de corte del sitio (Somerville, 2000)
- El deslizamiento de la falla está alineado con el sitio (Somerville et al., 1997)
- El sitio se encuentra cerca a la falla, pero lejos del epicentro (Abrahamson, 2001)

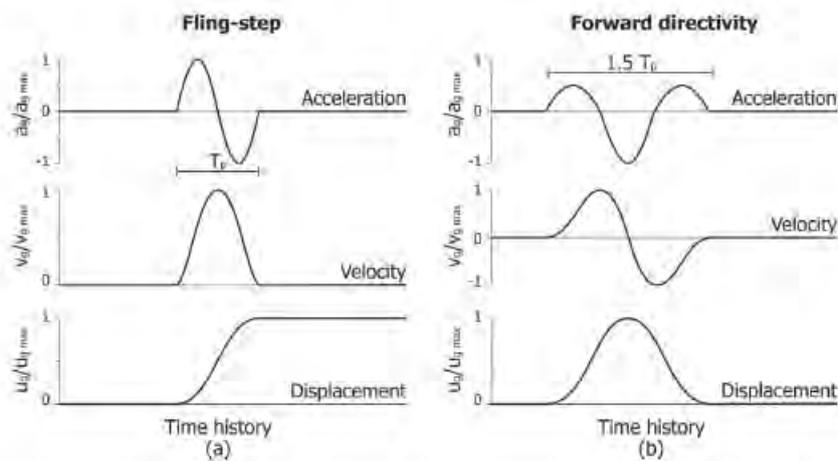


Figura 4 Pulso sinusoidal idealizado: (a) fling-step; (b) directividad hacia adelante. Nota: las curvas han sido normalizadas para la aceleración, velocidad y desplazamiento máximo. (modificado de Kalkan y Kunnath, 2006) como se citó en Grimaz y Malisan (2014).

2.1.5. Pulso de velocidad

El fling-step y el efecto de la directividad puede generar un pulso de velocidad. Las características de los pulsos generados son:

- Gran amplitud y periodo largo
- Altos ratios de PGV/PGA (velocidad pico máxima/aceleración pico máxima) y PGD/PGA (desplazamiento pico máximo/aceleración pico máxima)
- La energía se concentra en uno o pocos pulsos

2.1.6. Componentes sísmicos rotacionales

Se ha encontrado que los estudios sísmicos rotacionales pueden ser de gran importancia. La rotación alrededor de los componentes horizontales se le llama "rocking", mientras que la rotación en el componente vertical se le llama torsión (Zembatym, 2006, como se citó en Grimaz y Malisan (2014)). Estos efectos son relevantes cuando tanto el componente horizontal como el vertical, tienen una importancia comparable: dependen de la amplitud del espectro de respuesta en la componente vertical en el rango de periodo largo (Castellani et al., 2012, como se citó en Grimaz y Malisan (2014)). Es por ello, que pueden tener implicancias importantes en los efectos de fuente cercana.

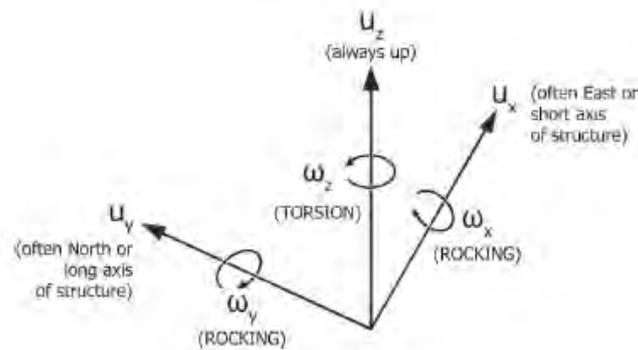


Figura 5 Nomenclatura y convención de signos: 3 traslacionales y 3 rotacionales (Guidotti, 2012) como se citó en Grimaz y Malisan (2014).

2.2. Sismos con efectos de fuente cercana históricos

Como menciona Frau y Saragoni (2012), desde 1950 se observa que en los acelerogramas de terremotos a nivel mundial el movimiento del suelo puede ser de carácter vibratorio o de carácter impulsivo. Para el caso de los efectos de fuente cercana, son de carácter impulsivo. El sismo de Port Hueneme en marzo de 1957, en EE. UU., a pesar de tener una magnitud de 4.7 y un pico de aceleración de solo 0.08g, causó grandes daños (Bertero, Anderson, & Masani, 1999). De manera similar ocurrió con terremotos en Marruecos 1960, Lybia en 1963, Macedonia en 1963 y San Salvador en 1965 (Rosenblueth & Prince, 1965).

De manera más específica, el 27 de junio de 1966 en Parkfield, en la falla de San Andrés, se registró un terremoto relativamente pequeño de magnitud 5.6. El registro ubicado a 60 m desde la falla mostró cuatro pulsos de aceleración en un periodo muy corto de 1.5 s. Estos cuatro pulsos generaron un pulso de desplazamiento de 23 cm en una duración de 1.3 s. Debido a la poca duración de estos pulsos, este terremoto no generó daños tan grandes (Bertero, Anderson, & Masani, 1999), pero se pudo observar la importancia y la forma en que pueden presentarse estos pulsos en registros cercanos a la fuente.

- Imperial Valley, California – 1979

En este terremoto la ruptura se presentó en sentido a la estación El Centro, alejándose de la estación Bonds Corner. En la Figura 6 se observan ambos registros:

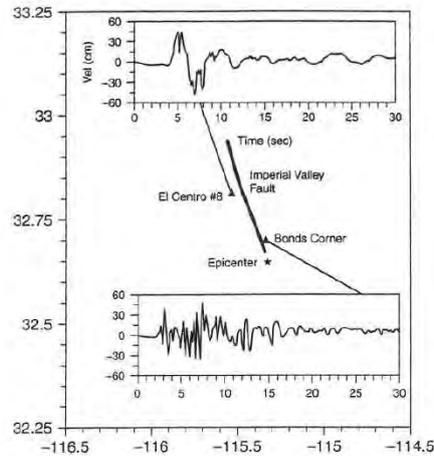


Figura 6 Registro de velocidades – Imperial Valley, California 1979 (Bolt & Abrahamson, Estimation of strong seismic ground motions, 2003) como se citó en Frau y Saragoni (2012)

Se puede observar la diferencia entre los registros al tener una directividad hacia adelante (El Centro #8) y una directividad hacia atrás (Bonds Corner) (Bolt & Abrahamson, Estimation of strong seismic ground motions, 2003).

- Chi-Chi, Taiwán – 1999

Este terremoto presenta pulsos largos de velocidad. En la Figura 7 se observa que en el registro de velocidades se tiene un pulso muy marcado hacia un solo lado.

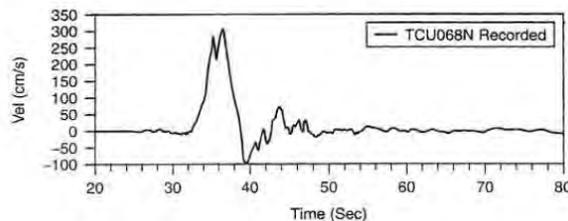


Figura 7 Registro de velocidades – Chi-Chi, Taiwan 1999 (Bolt, Earthquakes, 2003) como se citó en Frau y Saragoni (2012)

2.3. Consideración de efectos de fuente cercana en normas internacionales

Por otro lado, según mencionan Grimaz y Malisan (2014) en un trabajo de recopilación, entre las otras normas internacionales que consideran los efectos de fuente cercana se tienen:

EN 1998-1:2004: Eurocode 8 – part 1 (CEN, 2004)

Considera los efectos solo para edificaciones con clase de importancia IV (edificaciones cuya integridad durante un evento sísmico es de suma importancia: hospitales, plantas de energía, estaciones de bomberos). Se usa un espectro de respuesta específico si la edificación se encuentra a una distancia menor a 15 km de una falla potencialmente activa con una magnitud mayor a 6.5 Ms.

Applied Technology Council ATC-40 (ATC, 1996)

El efecto de fuente cercana toma en cuenta las características de la zona y forma parte de un check list para el diseño sísmico. Los valores tomados son los mismos que en el UBC-97. Como comentario se indica que el movimiento del suelo puede tomar valores de hasta un 50% más al considerar los efectos de fuente cercana. Se indica también que deben realizarse estudios específicos para estructuras con requerimientos especiales.

GB 50011-2010 (Ministry of Construction, 2010)

En los Estándares Nacionales de la República Popular de China – Code for Seismic Design of Buildings, los efectos de fuente cercana son considerados en estructuras dentro de los 10 km a ambos lados de la falla. Estos efectos se consideran al multiplicar el componente horizontal y vertical por un factor de 1.50 para distancias dentro de los 5 km, y 1.25 para distancias entre los 5 km y 10 km. No se realizan modificaciones en los periodos del espectro.

New Zealand NZS 1170 – part 5 and commentary (NZS, 2004): Near-Fault factor (NZS, 2004, Clause 3.1.6, C3.1.6)

Los efectos de fuente cercana toman en consideración la directividad y la polarización del periodo largo. No se toma en cuenta el efecto de hanging-wall ya que no se satisface la condición del dip-slip. Se incluyen comentarios sobre la directividad hacia adelante y hacia atrás, así como las diferencias entre la ubicación de manera paralela o normal a la falla. El factor de fuente cercana se determina tomando en consideración la probabilidad de excedencia anual a menos de 20 km de la falla. Para distancias mayores a 20 km el factor es de 1.0. El efecto de fuente cercana varía con el periodo (1.0 para periodos menores a los 1.5 s y 1.72 para periodos mayores a 5 s)

2.3.1. Consideración de efectos de fuente cercana en Estados Unidos

En el año 1994 ocurrió un sismo en la ciudad de Northridge, California, de magnitud 6.8 generado en una falla no identificada hasta esa fecha. (National Institute of Standards and Technology, 1994) Por otro lado, en el año 1995 ocurrió un sismo en la ciudad de Kobe, Japón, con una magnitud de 6.9 sobre la falla de Nojima, con una profundidad de 16 km. (Risk Management Solutions, Inc., 2005) Ambos sismos dejaron lecciones aprendidas referentes a los sismos generados en fallas y sus efectos en ciudades cercanas al epicentro.

Es por ello, que el Uniform Building Code del año 1997 (UBC-97) actualizó los parámetros referentes a las fuentes cercanas, e introdujo los factores C_a y C_v relacionados a la aceleración y velocidad respectivamente. (Luco, 2019)

2.3.1.1. Uniform Building Code – 1997 (UBC-97)

El UBC-97, introduce dentro de su norma de diseño, los parámetros C_a , C_v y parámetros específicos de clasificación del suelo según sus características y la velocidad de onda de corte hasta los primeros 30 m (V_{s30}). Esta modificación incluye también la inclusión de parámetros que modifican el valor de Z (factor sísmico de zona) dependiendo del tipo de fuente en donde se genera el sismo, la cercanía a la falla y el valor Z según la zona sísmica.

2.3.1.2. Next Generation of Ground-Motion Attenuation Models NGA-West1

Según menciona Luco (2019), el United States Geological Survey (USGS) empieza a elaborar mapas de peligro sísmico desde el año 1996, luego del sismo de Northridge. A lo largo de los años se han ido generando distintos mapas de peligro sísmico, mientras que a la par, se iban realizando modificaciones a las metodologías utilizadas correspondientes al estudio de peligro sísmico. De esta manera es que se han generado actualizaciones a estos mapas en los años 2002, 2008, 2014 y 2018.

Es de este modo, que en el año 2008 se crea un proyecto multidisciplinario llamado Next Generation of Ground-Motion Attenuation Models (NGA).

El proyecto Next Generation of Ground-Motion Attenuation Models (NGA) fue un programa de investigación multidisciplinario con el objetivo de desarrollar nuevas relaciones de predicción del movimiento del suelo para sismos superficiales en los Estados Unidos y en regiones con actividad tectónica similar. Este programa fue desarrollado en coordinación con el Pacific Earthquake Engineering Research center (PEER) y el U.S. Geological Survey y el Southern California Earthquake Center. El programa expandió y actualizó la base de datos de registros de movimiento del suelo, incluyendo registros de sismos internacionales. La investigación culminó en el 2008. (Power, y otros, 2008)

Se trabajó con 173 registros de señales y se obtuvieron 5 modelos de predicción del movimiento para sismos superficiales en zonas de fallas activas.

El programa integró 5 equipos de trabajo formados por expertos en el rubro. Cada equipo desarrolló sus propios modelos, pero siempre en constante interacción con los otros equipos. Los equipos de trabajo fueron encabezados por investigadores con vasta experiencia en uso de modelos del movimiento del suelo. Se presentaron resúmenes de los modelos en los siguientes papers:

- Abrahamson, N. A., and Silva, W. J., 2008. Summary of the Abrahamson & Silva NGA groundmotion relations, *Earthquake Spectra* 24, 67–97.
- Boore, D. M., and Atkinson, G. M., 2008. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s, *Earthquake Spectra* 24, 99–138.
- Chiou, B. S. J., and Youngs, R. R., 2008. Chiou-Youngs NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters, *Earthquake Spectra* 24, 173–215.
- Idriss, I. M., 2008. An NGA empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes, *Earthquake Spectra* 24, 217–242.

Los modelos desarrollados obtuvieron los componentes horizontales promedios de la aceleración pico máxima (PGA, peak ground acceleration), la velocidad pico máxima

(PGV, peak ground velocity) y un espectro de respuesta de aceleraciones pseudo absoluta para un amortiguamiento lineal del 5%.

2.3.1.3. Next Generation of Ground-Motion Attenuation Models NGA-West2

Más adelante, y siguiendo el trabajo realizado en el 2008, en el año 2014 se desarrolla el proyecto NGA-West2, el cual pertenece al NGA pero, en este caso, actualizando la base de datos del PEER. (Bozorgnia, y otros, 2014)

Utilizando estas nuevas ecuaciones de movimiento, se actualizan los mapas de peligro sísmico utilizados en las normas Minimum Design for Buildings and Other Structures (ASCE 7) y el International Building Code (IBC). (Kircher, Luco, & Whittaker, 2010)

Luego de culminado el proyecto Next Generation of Ground-Motion Attenuation Models (renombrado como NGA-West1) en el 2008, en donde se obtuvieron 5 modelos de predicciones del movimiento, se vio necesario empezar un nuevo proyecto dado que hubo investigaciones que no se llegaron a considerar y también ocurrieron grandes eventos sísmicos a nivel mundial, los cuales eran necesarios poder incluirlos en el análisis. De esta manera se pone en marcha el NGA-West2, el cual busca obtener modelos de predicción del movimiento para sismos superficiales. (Bozorgnia, y otros, 2014)

Este proyecto incluyó 21332 registros con magnitudes entre 3.0 y 7.9, y con distancias desde el punto de registro hacia el punto de ruptura entre 0.05 km a 1533 km. Se incluyeron también registros con velocidades de onda de corte mayores.

Otro aspecto importante que destacar fue la revisión y procesamiento de señales del NGA-West1 ampliando el ancho de banda utilizable para periodos largos. De esta manera se pudo ampliar considerablemente el número de registros.

Se presentaron resúmenes de los modelos en los siguientes papers:

- Abrahamson, N. A., Silva, W. J., and Kamai, R., 2013. Update of the AS08 Ground-Motion Prediction Equations Based on the NGA-West2 Data Set, PEER Report No. 2013/04, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 143 pp.
Abrahamson, N. A., Silva, W. J., and Kamai, R., 2014. Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions, *Earthquake Spectra* 30, 1025–1055.
- Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E., and Atkinson, G. A., 2013. NGA-West2 Equations for Predicting Response Spectral Accelerations for Shallow Crustal Earthquakes, PEER Report No. 2013/05, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 134 pp.
Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E., and Atkinson, G. A., 2014. NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes, *Earthquake Spectra* 30, 1057–1085.
- Campbell, K. W., and Bozorgnia, Y., 2013. NGA-West2 Campbell-Bozorgnia Ground Motion Model for the Horizontal Components of PGA, PGV, and 5%-Damped Elastic Pseudo-Acceleration Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s, PEER Report No. 2013/06, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 238 pp.
Campbell, K. W., and Bozorgnia, Y., 2014. NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra, *Earthquake Spectra* 30, 1087–1115.

- Chiou, B. S.-J., and Youngs, R. R., 2013. Update of the Chiou and Youngs NGA Ground Motion Model for Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra, PEER Report No. 2013/07, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 76 pp.
- Chiou, B. S.-J., and Youngs, R. R., 2014. Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra, Earthquake Spectra 30, 1117–1153.
- Idriss, I. M., 2013. NGA-West2 Model for Estimating Average Horizontal Values of Pseudo-Absolute Spectral Accelerations Generated by Crustal Earthquakes, PEER Report No. 2013/08, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 31 pp.
- Idriss, I. M., 2014. An NGA-West2 empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes, Earthquake Spectra 30, 1155–1177.

Para la aplicación de las 5 leyes de atenuación o GMPEs, se necesitan diversos datos sobre los sismos que se generan en las fallas, características del tipo de suelo, características de las fallas y geometría. Si bien cada ley de atenuación requiere como input diferentes parámetros, se mencionan los más resaltantes:

- Magnitud momento asociado a un periodo de retorno, dependiendo del valor de aceleración que se busca obtener
- Distancia Joyner-Boore: distancia más cercana a la proyección de la falla en la superficie
- Tipo de falla
- Ángulo de inclinación del plano de ruptura causado por la falla medido desde la horizontal
- Ancho del área de ruptura
- Profundidad hipocentral del terremoto medido desde el nivel del mar

2.4. Situación actual en el Perú

Actualmente, la Norma E.030-19 no considera los efectos de fuente cercana en su espectro de diseño sismorresistente. Los valores de aceleración pico del suelo indicados son obtenidos de un estudio de peligro sísmico del territorio nacional, pero considerando el peligro dentro de un área general de estudio. El valor de aceleración considera todas las fuentes sísmicas, ya sean de subducción (interface), corticales o intraplaca, para un área determinada.

Se tienen también estudios de la evaluación del peligro sísmico en el Perú. Dentro de los más relevantes y recientes, se tiene el estudio de Nuevas Fuentes Sismogénicas para la Evaluación del Peligro Sísmico y Generación de Espectros de Peligro Uniforme en el Perú (Gamarra & Aguilar, 2009). En este estudio se obtienen parámetros de las fuentes sismogénicas, incluyendo la magnitud mínima y máxima de cada fuente. El inconveniente surge al tener valores de magnitudes, pero asociadas a todas las fuentes que se encuentran en un área determinada. No tenemos información de magnitudes de sismos generados específicamente en fallas activas asociados a un periodo de retorno determinado. Esto genera complicaciones si queremos utilizar las leyes de atenuación para estimar las aceleraciones debido a los sismos en fallas.

Por otro lado, se tiene un estudio detallado sobre las fallas en el territorio nacional en una publicación nombrada Database and Map of Quaternary Faults and Folds in Perú and its Offshore Region. (Macharé, y otros, 2003) En esta publicación, se identifican, se ubican en un mapa y se describen brevemente todas las fallas en el Perú. Dentro de los datos incluidos en la publicación, se menciona el nombre de las fallas e información limitada de las características de esta. No se tiene información enfocada al estudio sísmológico de las fallas.

2.4.1. Sismos en el Perú

En el Perú, los sismos se pueden clasificar según su origen y su distribución espacial.

Clasificación según su origen: ver Figura 8 (Tavera, Evaluación del Peligro Sísmico Asociado a los Sismos y Efectos Secundarios en Perú, 2014)

- Sismos interplaca (interfase): son los sismos generados por el proceso de subducción y fricción de las placas de Nazca (oceánica y Sudamericana o continental). Se distinguen dos modos de interacción: sub-horizontal en las zonas norte y centro, y normal en la zona sur. Históricamente ha dado origen a eventos sísmicos con magnitudes mayores a 8.0 Mw.
- Sismos corticales: son los generados en las fallas geológicas distribuidas en la cordillera, las cuales son formadas debido al choque de las placas que generan fracturas y pliegues en la corteza terrestre. Por lo general, dan origen a eventos sísmicos con magnitudes menores a 6.5 Mw. Presentan profundidades intermedias entre 20 a 25 km.
- Sismos intraplaca: generados por las deformaciones internas de la placa de Nazca por debajo de la cordillera de los Andes. Dan origen a eventos sísmicos con magnitudes menores a 8.0 Mw. Presentan profundidades intermedias entre 61 a 300 km.

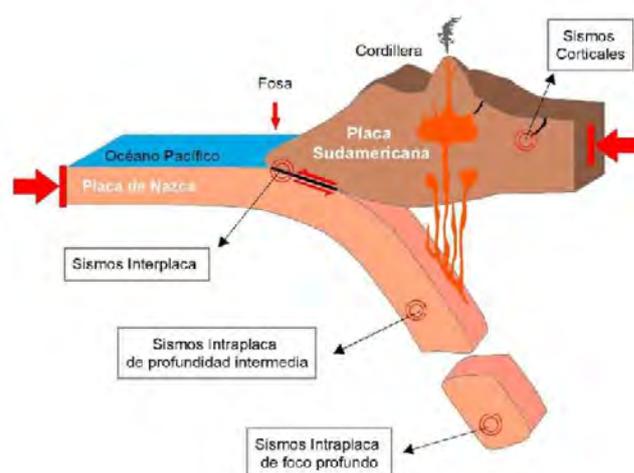


Figura 8 Diferentes tipos de sismo según su origen. (Tavera, Análisis y evaluación de los patrones de sismicidad y escenarios sísmicos en el borde occidental del Perú, 2020)

Clasificación según su distribución espacial (Bernal & Tavera, 2002):

- Foco superficial: con profundidades menores a 60 km, entre la línea de costa y la fosa peruano-chilena.

- Proceso de subducción entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana
- Interior del continente, formación y/o activación de sistema de fallas
- Foco intermedio: con profundidades entre 61 y 300 km. Presentes en todo el territorio, pero con mayor frecuencia al sur del Perú, al extremo norte de la región Pucallpa y al borde oriental de las regiones de San Martín y Amazonas.
- Foco profundo: con profundidades mayores a 500 km. Límite entre Perú y Brasil. Debido a la gran profundidad, no suelen ser percibidos en la superficie.

En el Perú, la primera fuente de origen de sismos es de interplaca, la segunda son las fallas geológicas (corticales) y la tercera es de interplaca. (Tavera, Re-evaluación del Peligro Sísmico Probabilístico para el Perú, 2014)

Bernal y Tavera (2002) generaron un mapa de sismos según su profundidad focal. En la Figura 9 se muestra la ubicación de diversos sismos generados a una profundidad menor a 60 km, considerados como sismos de foco superficial.

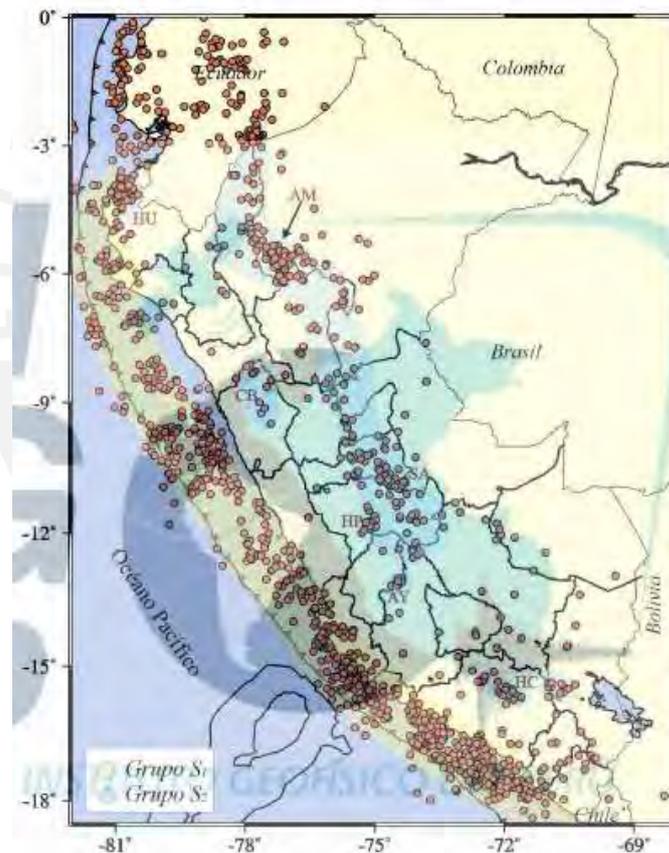


Figura 9 Distribución de sismos de foco superficial < 60 km (Bernal & Tavera, 2002)

Dentro de estos sismos, se pueden diferenciar dos grupos:

S1: localizados entre la fosa y la línea de costa (90% de la actividad sísmica en el Perú)

S2: al interior del continente, paralelos a la cordillera andina. Se distribuyen en los principales sistemas de fallas, que se originaron o reactivaron durante el

Cuaternario con magnitudes del orden de 6.0. Estos sismos al ser superficiales generaron mayor destrucción en áreas relativamente pequeñas (cercanas al epicentro). Estos sistemas se ubican de manera paralela a la Cordillera Andina, lo cual guarda relación con su origen ya que son parte del proceso de subducción y del pliegue del escudo brasileño bajo la cordillera.

2.4.2. Sistema de fallas activas en el Perú

La deformación de la corteza continental genera levantamientos en la Cordillera Andina, dando origen a diversos sistemas de fallas distribuidos en todo el territorio nacional. En general, estas fallas en la zona Subandina son de tipo inversas (fallas de Moyobamba, Satipo, Madre de Dios). En la zona de la alta Cordillera y el Altiplano son menores en número y se encuentran situados al pie de algunos nevados importantes (fallas de la Cordillera Blanca, Tambomachay y Huaytapallana) (Bernal & Tavera, 2002). Los principales sistemas de fallas que tenemos a nivel nacional se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 – Principales sistemas de fallas geológicas a nivel nacional

Código	Nombre
AM	Alto Mayo
CB	Cordillera Blanca
SA	Satipo
HU	Huaytapallana
MD	Madre de Dios
TA	Tambomachay

En la Figura 10 podemos observar un esquema sismotectónico donde se muestran los sistemas de fallas geológicas principales en el Perú. Las flechas en color rojo muestran la dirección de las deformaciones, mientras que las flechas en color negro muestran la dirección de convergencia de las placas de Nazca y la Sudamericana.

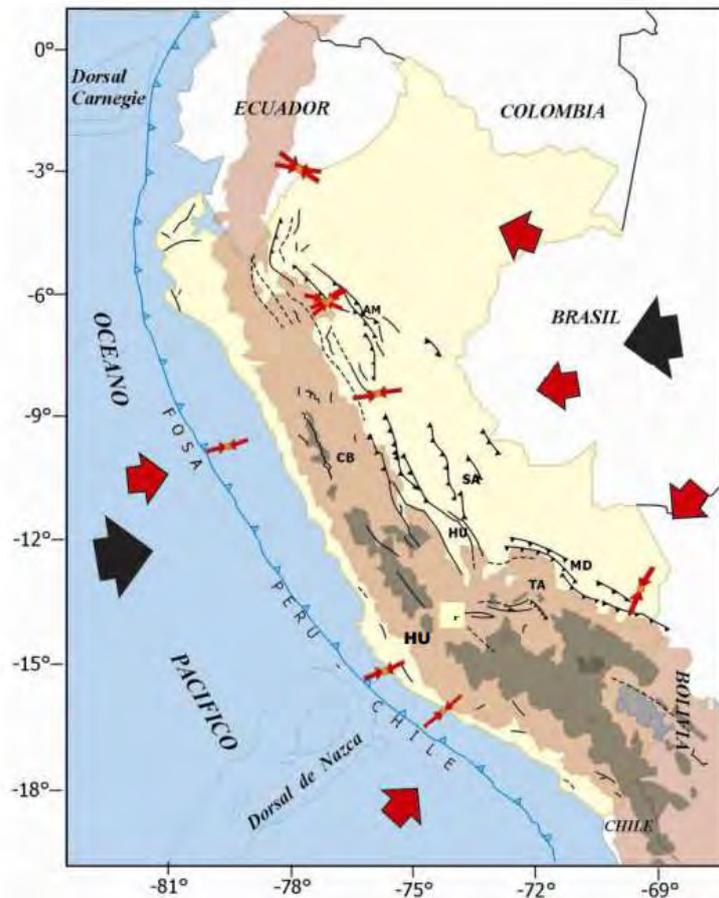


Figura 10 – Esquema sismotectónico de los principales sistemas de fallas geológicas en el Perú (Tavera, Evaluación del Peligro Sísmico Asociado a los Sismos y Efectos Secundarios en Perú, 2014)

Según se menciona en Bernal & Tavera (2002), los sistemas de fallas que se presentan en el territorio nacional son productos del proceso de deformación continua presente en la corteza continental. Se presentan en su mayoría de norte a sur, sobre la zona subandina al pie del borde oriental de la Cordillera Andina. El número de fallas sobre la Alta Cordillera y el Altiplano es menor. En general, la mayoría de fallas son de tipo inverso, lo cual evidencia el acortamiento de la corteza.

- Zona Costanera: en esta zona se ubican las fallas Huaypira (HP) (orientación NE-SW y E-W), Marcona (MA) (orientación NW-SE) y La Planchada (PL) (orientación NW-SE). Estas fallas tienen una longitud promedio de 90km y son del tipo normal.
- Cordillera Occidental: se encuentra la falla de la Cordillera Blanca (CB) la cual es una de fallas con mayor longitud en el mundo (200 km) y es del tipo normal. El ramal Norte tiene el nombre de falla de Quinchés. En esta zona también se ubica la falla Pampacolca (PC) con una extensión de 30km y del tipo normal, la falla de Ichupampa (IP) tiene una extensión de 220 km y del tipo normal, el sistema de fallas Huaytapallana (HU) con una extensión de 25 km y del tipo inverso y el sistema de fallas de Ayacucho (AY).
- Altiplano y en la Cordillera Oriental: se encuentra el sistema de fallas de Tambomachay (TM), el cual cruza la región sur del departamento de Cuzco. Este sistema está compuesto por un gran número de fallas de tipo normal,

dentro de las cuales las de mayor longitud son las fallas de Viscachani, Alto Vilcanota, Pomacanchi y Langui-Layo.

- Zona Subandina: se encuentran los sistemas de fallas inversas del Alto Mayo (AM), el sistema de fallas de Satipo–Amauta (SA) y el sistema de fallas de Madre de Dios (MD). Todos estos presentan extensiones entre 300 a 500 km.

En los sistemas de fallas mencionados anteriormente según Bernal & Tavera (2002), se han presentado eventos sísmicos de magnitudes elevadas que han originado reactivaciones en éstas. En la Zona Subandina se reactivó el sistema de fallas del Alto Mayo con los sismos de 1990 y 1991; en la Cordillera Oriental se reactivó la falla de Tambomachay con el sismo de 1986; en la Cordillera Occidental se reactivó la falla de Quichés con el sismo de 1946 y la falla de Huaytapallana se reactivó con dos sismos ocurridos en 1969 y en la Alta Cordillera se reactivó la falla de Ayacucho con los sismos ocurridos en 1981 y 1999.

2.4.3. Sismos históricos generados en fallas en el Perú

A continuación, se identifican los principales sismos originados en fallas activas a nivel nacional:

- Sobre la cordillera andina:
 - 1946 – Ancash (falla de Quiches) (Doser, 1987)
 - Magnitud 6.3-6.9. Falla normal. Profundidad 15-17 km
 - Las grandes pérdidas humanas y el gran daño generado por el sismo pueden deberse a la baja calidad de las construcciones, posible concentración de la energía del sismo por la topografía de la zona, poca profundidad del sismo.
 - 1969 – Huancayo (falla de Huaytapallana) (Dorbath, Dorbath, Cisternas, Deverchere, & Sebrier, 1990)
 - Magnitud 6.2. Falla inversa. Profundidad menor a 10 km
 - 1986 – Cusco (falla de Tambomachay) (Alva, 2021)
 - Magnitud 5.2. 20 km al noroeste de la ciudad de Cusco. Profundidad 50.9 km
- Zona Subandina:
 - 1990 – San Martín (fallas de Moyobamba y Rioja) (Tavera, Buforn, Bernal, & Antayhua, 2001)
 - Magnitud 6.0. Intensidad VII en escala de Mercalli Modificada. Profundidad 23 km
 - 1991 – San Martín (fallas de Moyobamba y Rioja) (Tavera, Buforn, Bernal, & Antayhua, 2001)
 - Magnitud 6.5. 18 km al oeste de la ciudad de Moyobamba. Profundidad 23 km

2.5. Selección de la metodología para incorporar los efectos de fuente cercana en los espectros peruanos

De la información revisada se definió una metodología implementando una norma de diseño base que sea similar, compatible y de fácil aplicación con la norma peruana actual, ya que se necesita un procedimiento sencillo que permita tomar decisiones de manera rápida para el diseño sismorresistente de estructuras. Esto debido a que no se cuenta con información específica de sismos generados en fallas geológicas como para

poder utilizar e implementar leyes de atenuación como lo hacen distintas normas internacionales.

De la información revisada, encontramos que la norma UBC-97 cumple con los puntos que hacen factible su compatibilización y aplicación en conjunto a la norma peruana sismorresistente actual. Entre esos puntos tenemos:

- El UBC-97 utiliza parámetros que modifican directamente la construcción del espectro de diseño
- El UBC-97 utiliza aceleraciones pico similares a las de la norma peruana por lo que se pueden utilizar equivalencias lineales
- El UBC-97 utiliza una clasificación del tipo de suelo según las velocidades de onda de corte lo cual facilita la compatibilización de parámetros para la construcción del espectro de diseño
- El espectro corresponde a aceleraciones con una probabilidad de excedencia del 10% en un tiempo de exposición de 50 años (periodo de retorno de 475 años)

Al observar que en varios puntos el UBC-97 utilizan parámetros similares a los de la norma peruana E.030-19 y que se pueden plantear equivalencias entre sí, concluimos que el UBC-97 es una norma base adecuada para incluir los efectos de fuente cercana en la norma peruana.

2.5.1. Espectro de diseño según UBC-97

El UBC-97 utiliza, para el análisis sísmico, un espectro de diseño utilizando los siguientes valores mostrados en la Figura 11.

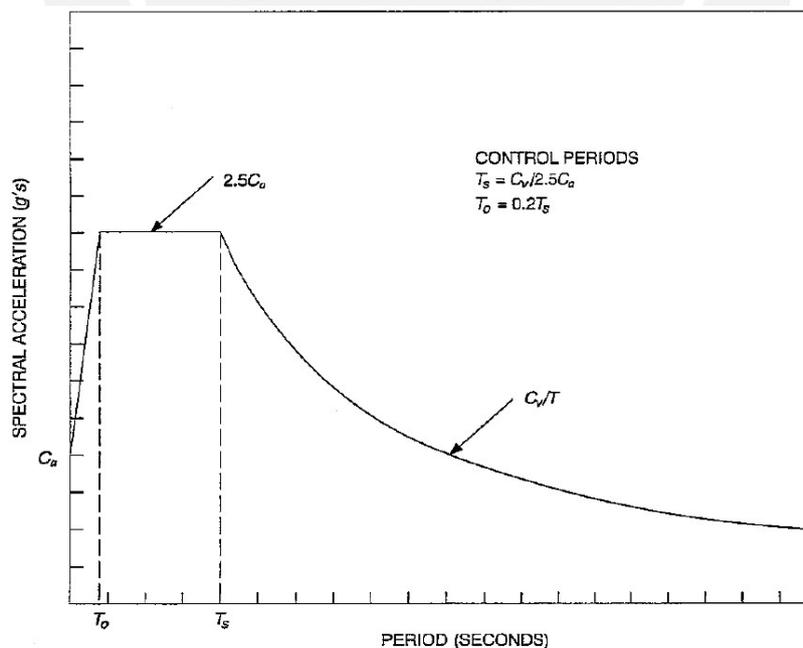


Figura 11 – Espectro de diseño de respuesta (UBC-97)

Donde:

- C_a : coeficiente sísmico, según tabla 16-Q (UBC-97)
- C_v : coeficiente sísmico, según tabla 16-R (UBC-97)
- $T_s = C_v/2.5C_a$: valor límite del periodo en función de C_a y C_v
- $T_o = 0.2T_s$: valor límite del periodo en función de T_s

Los valores de las tablas 16-Q y 16-R según el UBC-97 se muestran en la Tabla 2 y la Tabla 3.

Tabla 2 – Coeficiente Sísmico C_a (Tabla 16-Q, UBC-97)

TABLE 16-Q—SEISMIC COEFFICIENT C_a

SOIL PROFILE TYPE	SEISMIC ZONE FACTOR, Z				
	Z = 0.075	Z = 0.15	Z = 0.2	Z = 0.3	Z = 0.4
S_A	0.06	0.12	0.16	0.24	$0.32N_a$
S_B	0.08	0.15	0.20	0.30	$0.40N_a$
S_C	0.09	0.18	0.24	0.33	$0.40N_a$
S_D	0.12	0.22	0.28	0.36	$0.44N_a$
S_E	0.19	0.30	0.34	0.36	$0.36N_a$
S_F	See Footnote 1				

¹Site-specific geotechnical investigation and dynamic site response analysis shall be performed to determine seismic coefficients for Soil Profile Type S_F .

Tabla 3 – Coeficiente Sísmico C_v (Tabla 16-R, UBC-97)

TABLE 16-R—SEISMIC COEFFICIENT C_v

SOIL PROFILE TYPE	SEISMIC ZONE FACTOR, Z				
	Z = 0.075	Z = 0.15	Z = 0.2	Z = 0.3	Z = 0.4
S_A	0.06	0.12	0.16	0.24	$0.32N_v$
S_B	0.08	0.15	0.20	0.30	$0.40N_v$
S_C	0.13	0.25	0.32	0.45	$0.56N_v$
S_D	0.18	0.32	0.40	0.54	$0.64N_v$
S_E	0.26	0.50	0.64	0.84	$0.96N_v$
S_F	See Footnote 1				

¹Site-specific geotechnical investigation and dynamic site response analysis shall be performed to determine seismic coefficients for Soil Profile Type S_F .

Debido a que tenemos interés en estudiar cómo varía el espectro de diseño con los efectos de fuente cercana, nos enfocamos en los valores para la zona sísmica donde entran estas variables. Esto corresponde a la zona sísmica con $Z = 0.40$ de la Tabla 2 y la Tabla 3, en donde intervienen los factores N_a y N_v .

En las tablas Tabla 2 y Tabla 3 también se observan diferentes tipos de perfil de suelo. Estos perfiles se definen en la tabla 16-J del UBC-97. Las características de estos perfiles se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4 – Tipo de perfiles de suelo (UBC-97)

TABLE 16-J—SOIL PROFILE TYPES

SOIL PROFILE TYPE	SOIL PROFILE NAME/GENERIC DESCRIPTION	AVERAGE SOIL PROPERTIES FOR TOP 100 FEET (30 480 mm) OF SOIL PROFILE		
		Shear Wave Velocity, v_s , feet/second (m/s)	Standard Penetration Test, N (or N_{60} for cohesionless soil layers) (blows/foot)	Undrained Shear Strength, s_u , psf (kPa)
S_A	Hard Rock	> 5,000 (1,500)	—	—
S_B	Rock	2,500 to 5,000 (760 to 1,500)		
S_C	Very Dense Soil and Soft Rock	1,200 to 2,500 (360 to 760)	> 50	> 2,000 (100)
S_D	Stiff Soil Profile	600 to 1,200 (180 to 360)	15 to 50	1,000 to 2,000 (50 to 100)
S_E^1	Soft Soil Profile	< 600 (180)	< 15	< 1,000 (50)
S_F	Soil Requiring Site-specific Evaluation. See Section 1629.3.1.			

¹Soil Profile Type S_E also includes any soil profile with more than 10 feet (3048 mm) of soft clay defined as a soil with a plasticity index, $PI > 20$, $w_{mc} \geq 40$ percent and $s_u < 500$ psf (24 kPa). The Plasticity Index, PI , and the moisture content, w_{mc} , shall be determined in accordance with approved national standards.

Los valores de N_a y N_v utilizados en las tablas Tabla 2 y Tabla 3 hacen referencia a los efectos de fuente cercana al encontrarse a distancias de hasta 15 km de la falla. Se obtienen de las tablas 16-S y 16-T del UBC-97, respectivamente. Los valores de las tablas se muestran en la Tabla 5 y en la Tabla 6:

Tabla 5 – Factor de fuente cercana N_a (Tabla 16-S, UBC-97)

TABLE 16-S—NEAR-SOURCE FACTOR N_a^1

SEISMIC SOURCE TYPE	CLOSEST DISTANCE TO KNOWN SEISMIC SOURCE ^{2,3}		
	≤ 2 km	5 km	≥ 10 km
A	1.5	1.2	1.0
B	1.3	1.0	1.0
C	1.0	1.0	1.0

Tabla 6 – Factor de fuente cercana N_v (Tabla 16-T, UBC-97)

TABLE 16-T—NEAR-SOURCE FACTOR N_v^1

SEISMIC SOURCE TYPE	CLOSEST DISTANCE TO KNOWN SEISMIC SOURCE ^{2,3}			
	≤ 2 km	5 km	10 km	≥ 15 km
A	2.0	1.6	1.2	1.0
B	1.6	1.2	1.0	1.0
C	1.0	1.0	1.0	1.0

Para definir los valores de N_a y N_v en las tablas mostradas anteriormente, se necesita identificar el tipo de fuente sísmica. El UBC-97 clasifica los tipos de fuente según lo mostrado en la Tabla 7.

Tabla 7 – Tipo de fuente sísmica (Tabla 16-U, UBC-97)

TABLE 16-U—SEISMIC SOURCE TYPE¹

SEISMIC SOURCE TYPE	SEISMIC SOURCE DESCRIPTION	SEISMIC SOURCE DEFINITION ²	
		Maximum Moment Magnitude, M	Slip Rate, SR (mm/year)
A	Faults that are capable of producing large magnitude events and that have a high rate of seismic activity	$M \geq 7.0$	$SR \geq 5$
B	All faults other than Types A and C	$M \geq 7.0$ $M < 7.0$ $M \geq 6.5$	$SR < 5$ $SR > 2$ $SR < 2$
C	Faults that are not capable of producing large magnitude earthquakes and that have a relatively low rate of seismic activity	$M < 6.5$	$SR \leq 2$

Para generar el espectro de diseño según el UBC-97 fue necesario compatibilizar los parámetros (factores de zona sísmica y los tipos de perfil del suelo) con los equivalentes a los usados en la norma peruana E.030-19. Este espectro fue comparado con el espectro actual obtenido con la norma E.030-19. Teniendo ambos espectros, se analizó y se obtuvieron factores de amplificación del espectro de la norma E.030-19 para llegar al espectro generado con las fórmulas del UBC-97.

SEGUNDA PARTE: METODOLOGÍA Y RESULTADOS

CAPÍTULO 3.- Desarrollo de la metodología para incluir los efectos de fuente cercana en los espectros peruanos

Para calcular el espectro de diseño que incluya los efectos de fuente cercana (Espectro FC) será necesario compatibilizar los parámetros utilizados en la norma UBC-97 para ser utilizados con los de nuestra norma actual.

Para obtener el Espectro FC propuesto incluyendo los efectos de fuente cercana se siguió el siguiente procedimiento:

- Compatibilización de los valores de las tablas del UBC-97 utilizadas para calcular C_a y C_v . Para ello, se calcularon equivalencias respecto a los factores de zona Z y los perfiles de suelo.
- Algunos perfiles de suelo de la norma E.030-19 corresponden a 2 perfiles de suelo distintos en el UBC-97. Para estos casos, se calcularon los factores C_a y C_v correspondientes para cada perfil del suelo según el UBC-97 y se utilizó el promedio de estos valores según el perfil del suelo de la norma E.030-19 que corresponda.
- Se separó el espectro de diseño en zonas según los periodos guía del UBC-97 T_0 y T_s , y los periodos de la norma E.030-19 T_P y T_L , ya que para cada sector se utilizan diferentes fórmulas.
- Se calcularon las relaciones entre las fórmulas obtenidas para el Espectro FC y las fórmulas actuales de la norma E.030-19 para cada zona entre periodos.
- Estas relaciones son los factores propuestos a ser utilizados en conjunto con las aceleraciones calculadas en la norma E.030-19 para considerar los efectos de fuente cercana

3.1. Compatibilización de parámetros para el cálculo del Espectro FC

Como se mencionó anteriormente, es necesario compatibilizar los valores de factores de zona sísmica y tipos de perfil del suelo para el cálculo del Espectro FC utilizando el UBC-97 y la norma peruana E.030-19.

3.1.1. Zona sísmica

Respecto a los factores de zona sísmica, la norma E.030-19 presenta 4 zonas sísmicas, las cuales se muestran en la Figura 12 y la Tabla 8.



Figura 12 – Zonas sísmicas (Figura N°1, E.030-2019)

Tabla 8 – Factores de zona (Tabla N°1, E.030-2019)

Tabla N° 1 FACTORES DE ZONA "Z"	
ZONA	Z
4	0,45
3	0,35
2	0,25
1	0,10

El UBC-97 presenta 5 zonas sísmicas de las cuales, solo la zona con $Z=0.40$ tiene parámetros para incluir los efectos de fuente cercana. Es por ello, que los valores de coeficiente sísmico para esta zona $Z=0.40$ del UBC-97, se escalarán para las zonas sísmicas de la norma E.030-19. Para escalar los factores, se dividirán los factores dados en la columna para $Z=0.40$ de la Tabla 2 y la Tabla 3 entre el valor de 0.40 y se multiplicarán por el Z correspondiente a cada zona de la norma E.030-19. No se considerará la zona 1 de la E.030-19 ya que en esta zona no se tienen fallas geológicas. Los valores se muestran en la Tabla 9 y la Tabla 10.

Tabla 9 – Coeficiente sísmico C_a ajustado a la norma E.030-2019

Tipo del perfil del suelo	Coeficiente sísmico C_a			
	Z = 0.4 g	Z = 0.45 g	Z = 0.35 g	Z = 0.25 g
S _A	0.32 Na	0.36 Na	0.28 Na	0.20 Na
S _B	0.40 Na	0.45 Na	0.35 Na	0.25 Na
S _C	0.40 Na	0.45 Na	0.35 Na	0.25 Na
S _D	0.44 Na	0.50 Na	0.39 Na	0.28 Na
S _E	0.36 Na	0.41 Na	0.32 Na	0.23 Na
S _F	-			

Tabla 10 – Coeficiente sísmico C_v ajustado a la norma E.030-2019

Tipo del perfil del suelo	Coeficiente sísmico C_v			
	Z = 0.4 g	Z = 0.45 g	Z = 0.35 g	Z = 0.25 g
S _A	0.32 Nv	0.36 Nv	0.28 Nv	0.20 Nv
S _B	0.40 Nv	0.45 Nv	0.35 Nv	0.25 Nv
S _C	0.56 Nv	0.63 Nv	0.49 Nv	0.35 Nv
S _D	0.64 Nv	0.72 Nv	0.56 Nv	0.40 Nv
S _E	0.96 Nv	1.08 Nv	0.84 Nv	0.60 Nv
S _F	-			

3.1.2. Perfil del suelo

Se ajustaron los valores del tipo de perfil del suelo ya que los valores de la norma E.030-19 clasifica el tipo de suelo en 5 perfiles distintos mientras que el UBC-97 los clasifica en 4 perfiles. Los perfiles de la norma E.030-19 se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11 – Clasificación de los perfiles de suelo (Tabla N°2, E.030-2019)

Tabla N° 2 CLASIFICACIÓN DE LOS PERFILES DE SUELO			
Perfil	V_s	\bar{N}_{60}	\bar{s}_w
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		

Se realiza una comparación entre los perfiles del suelo definidos en el UBC-97 y la norma E.030-19. Se compatibilizaron los perfiles de suelo según los valores de velocidades de onda de corte en los primeros 30 m (V_{s30}). Los valores se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12 – Comparación de perfiles de suelo del UBC-97 y la norma E.030-2019

Vs30 (m/s)	E.030-19	UBC-97
> 1500	S0	SA
760 < 1500	S1	SB
500 a 760		SC
360 a 500	S2	SC
180 a 360		SD
< 180	S3	SE

Como se observa en la Tabla 12, en algunos casos se tiene un tipo de suelo en la norma E.030-19 con las características de dos tipos distintos de perfiles de suelo según el UBC-97. Para estos casos, se trabajará con un valor promedio, de manera que obtengamos un solo valor para cada perfil de suelo de la norma E.030-19. De esta manera, en la Tabla 13 obtenemos los valores de Ca y Cv según el perfil del suelo y factor de zona de la norma E.030-19.

Tabla 13 – Valores de Ca y Cv para los tipos de suelo según la norma E.030-2019

E.030-19	Vs30 (m/s)	Ca			Cv		
		Z = 0.45 g	Z = 0.35 g	Z = 0.25 g	Z = 0.45 g	Z = 0.35 g	Z = 0.25 g
S0	> 1500	0.36 Na	0.28 Na	0.20 Na	0.36 Nv	0.28 Nv	0.20 Nv
S1	760 < 1500	0.45 Na	0.35 Na	0.25 Na	0.45 Nv	0.35 Nv	0.25 Nv
	500 a 760	0.45 Na	0.35 Na	0.25 Na	0.63 Nv	0.49 Nv	0.35 Nv
S2	360 a 500	0.45 Na	0.35 Na	0.25 Na	0.63 Nv	0.49 Nv	0.35 Nv
	180 a 360	0.50 Na	0.39 Na	0.28 Na	0.72 Nv	0.56 Nv	0.40 Nv
S3	< 180	0.41 Na	0.32 Na	0.23 Na	1.08 Nv	0.84 Nv	0.60 Nv

Los valores finales se muestran en la Tabla 14 y Tabla 15.

Tabla 14 – Valores finales de Ca para la norma E.030-2019

	Ca		
	Z = 0.45 g	Z = 0.35 g	Z = 0.25 g
S0	0.36 Na	0.28 Na	0.20 Na
S1	0.45 Na	0.35 Na	0.25 Na
S2	0.47 Na	0.37 Na	0.26 Na
S3	0.41 Na	0.32 Na	0.23 Na

Tabla 15 – Valores finales de Cv para la norma E.030-2019

	Cv		
	Z = 0.45 g	Z = 0.35 g	Z = 0.25 g
S0	0.36 Nv	0.28 Nv	0.20 Nv
S1	0.54 Nv	0.42 Nv	0.3 Nv
S2	0.68 Nv	0.53 Nv	0.38 Nv
S3	1.08 Nv	0.84 Nv	0.60 Nv

3.2. Cálculo de factores de fuente cercana

Para definir una metodología de aplicación en la norma E.030-19, se calculan factores que consideren los efectos de fuente cercana mediante la relación entre el Espectro FC y la norma E.030-19.

En el Espectro FC los periodos se separan en 3 zonas mostradas en la Figura 13. Las 3 zonas corresponden en los rangos entre los valores de periodos T_0 y T_s .

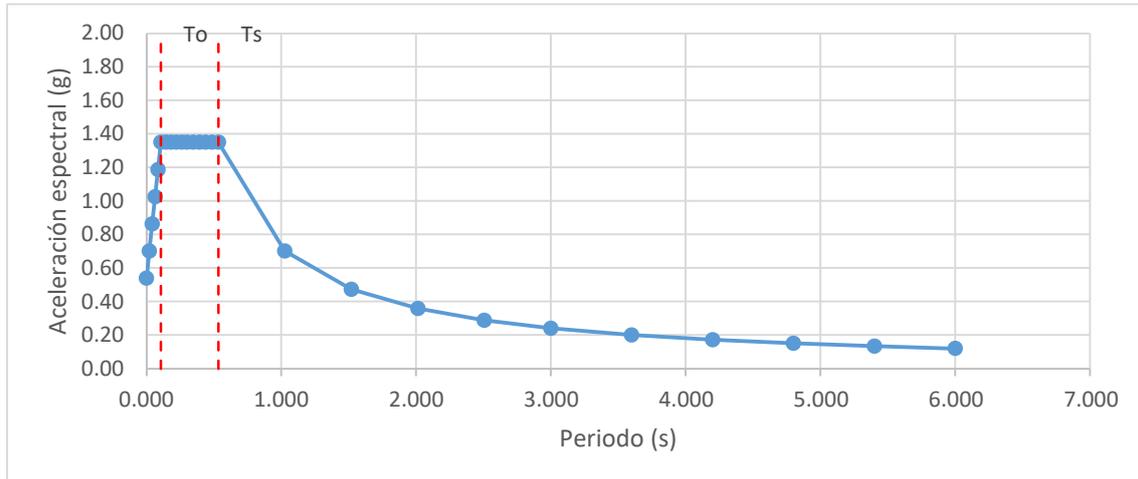


Figura 13 – Ejemplo de espectros de aceleraciones del Espectro FC

En la norma E.030-19 la construcción del espectro de diseño se separa también en 3 zonas mostradas en la Figura 14. Las 3 zonas corresponden en los rangos entre los valores de periodos T_P y T_L .

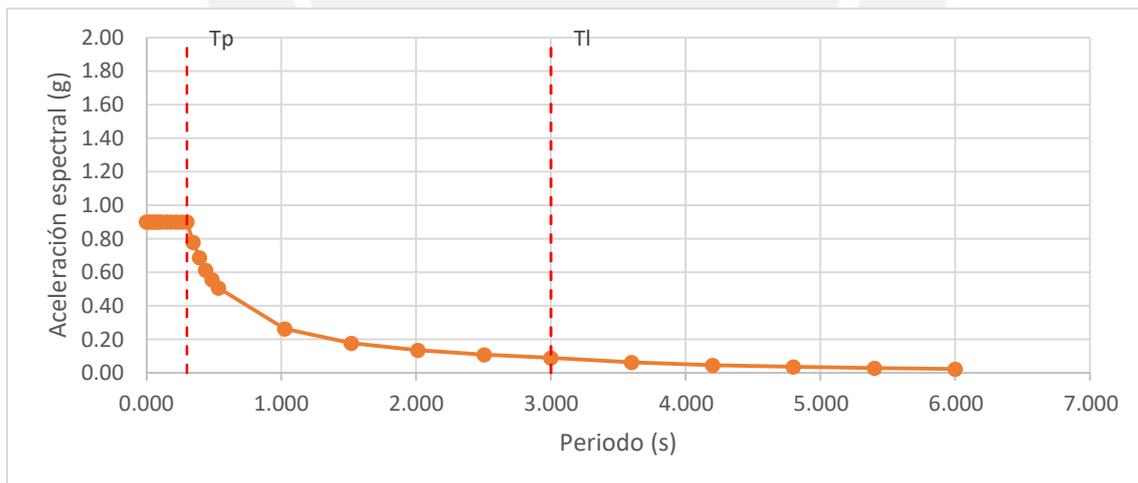


Figura 14 – Ejemplo de espectros de aceleraciones según norma peruana E.030-2019

Al compatibilizar los espectros, se mantendrá la plataforma de aceleraciones de la norma E.030-19 para periodos menores a T_P , es decir, no se considerará la zona variable menor a T_0 .

Por ello, tendremos 4 zonas para la construcción del nuevo Espectro FC. Las regiones se muestran en la Figura 15.

- R1: zona de periodos cortos, para periodos menores a T_p (E.030-19)
- R2: zona de periodos mayores a T_p (E.030-19) y menores que T_s (Espectro FC)
- R3: zona para periodos mayores a T_s (Espectro FC) y menores a T_L (E.030-19)
- R4: zona de periodos largos, para periodos mayores a T_L (E.030-19)

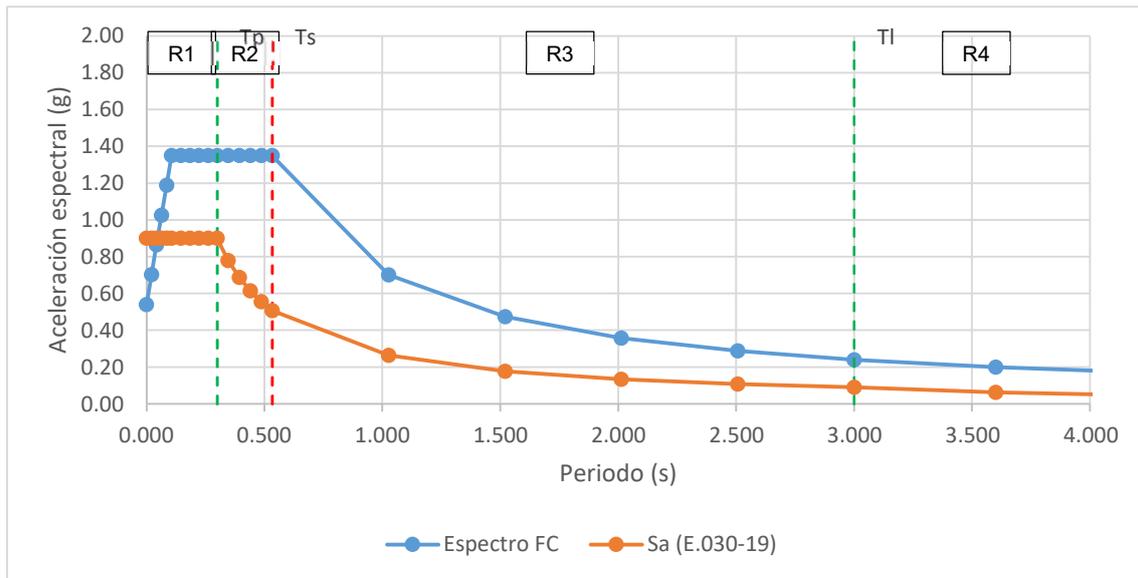


Figura 15 – Espectros de aceleraciones según Espectro FC y norma E.030-19

Para facilitar el cálculo, separamos el valor C_a como la siguiente expresión:

$$C_a = F_{a'} \cdot Z \cdot N_a$$

$$F_{a'} = \frac{C_a}{Z \cdot N_a}$$

Donde:

- Z : factor de zona sísmica
- N_a : factor para el Espectro FC
- $F_{a'}$: coeficiente propuesto

Para facilitar el cálculo, separamos el valor C_v como la siguiente expresión:

$$C_v = F_{v'} \cdot Z \cdot N_v$$

$$F_{v'} = \frac{C_v}{Z \cdot N_v}$$

Donde:

- Z: factor de zona sísmica
- Nv: factor para el Espectro FC
- Fv': coeficiente propuesto

R1: $T < T_p$

Espectro FC:

$$2.5 \cdot Ca$$

E.030-19:

$$2.5 \cdot Z \cdot S$$

Relación entre el Espectro FC y E.030-19:

$$\frac{2.5 \cdot Fa' \cdot Z \cdot Na}{2.5 \cdot Z \cdot S} = \left[\frac{Fa'}{S} \right] Na$$

R2: $T_p < T < T_s$

Se utiliza una variación lineal entre los valores de la zona 1 y la zona 3.

R3: $T_s < T < T_L$

Espectro FC:

$$Cv/T$$

E.030-19:

$$2.5 \cdot \frac{T_p}{T} \cdot Z \cdot S$$

Relación entre el Espectro FC y E.030-19:

$$\frac{\frac{Fv' \cdot Z \cdot Nv}{T}}{2.5 \cdot \frac{T_p}{T} \cdot Z \cdot S} = \left[\frac{Fv'}{2.5 \cdot S \cdot T_p} \right] Nv$$

R4: $T_L < T$

Espectro FC:

$$Cv/T$$

E.030-19:

$$2.5 \cdot \frac{T_p T_L}{T^2} \cdot Z \cdot S$$

Relación entre el Espectro FC y E.030-19:

$$\frac{\frac{Fv' \cdot Z \cdot Nv}{T}}{2.5 \cdot \frac{T_p T_L}{T^2} \cdot Z \cdot S} = \left[\frac{Fv'}{2.5 \cdot S \cdot T_p} \right] \left[\frac{T}{T_L} \right] Nv$$

Donde:

- $T_S = Fv' / (Fa' \cdot 2.5)$

Para facilidad en la visualización y comparación, se presentan las ecuaciones obtenidas para cada zona en la Tabla 16.

Tabla 16 – Resumen de ecuaciones obtenidas para cada región

Región	Espectro FC	E.030-19	Factor para incluir cercanía a la falla Relación Espectro FC / E.030-19
R1 $T < T_p$	$2.5 \cdot Ca$	$2.5 \cdot Z \cdot S$	$\left[\frac{Fa'}{S} \right] Na$
R2 $T_p < T < T_s$	Variación lineal entre zona 1 y 3		$\frac{[Fa'/S]Na - [Fv'/2.5 \cdot S \cdot T_p]Nv}{T_p - T_s} \cdot T$
R3 $T_s < T < T_L$	Cv/T	$2.5 \cdot \frac{T_p}{T} \cdot Z \cdot S$	$\left[\frac{Fv'}{2.5 \cdot S \cdot T_p} \right] Nv$
R4 $T_L < T$	Cv/T	$2.5 \cdot \frac{T_p T_L}{T^2} \cdot Z \cdot S$	$\left[\frac{Fv'}{2.5 \cdot S \cdot T_p} \right] \left[\frac{T}{T_L} \right] Nv$

En la Figura 15 se presenta una gráfica con un ejemplo de espectros de aceleraciones y sus zonas. La gráfica en azul corresponde al Espectro FC utilizando los parámetros compatibilizados de la norma E.030-19. La gráfica en naranja representa al espectro de diseño actual de la norma E.030-19.

Para simplificar el cálculo, definimos las siguientes variables:

$$F_A = Fa' / S$$

$$F_V = Fv' / 2.5 \cdot S \cdot T_p$$

$$F_S = Fv' / (Fa' \cdot 2.5)$$

Aplicando las variables anteriores en las ecuaciones de la Tabla 16, se obtienen las fórmulas mostradas en la Tabla 17.

Tabla 17 – Resumen de ecuaciones simplificadas

Región	Factor para incluir cercanía a la falla Relación Espectro FC / E.030-19
R1 $T < T_p$	$F_A Na$
R2 $T_p < T < T_s$	$\frac{[F_A Na - F_V Nv]}{T_p - T_s} \cdot T$
R3 $T_s < T < T_L$	$F_V Nv$
R4 $T_L < T$	$F_V [T/T_L] Nv$

Donde:

- $T_S = F_S \cdot N_v / N_a$

Los valores de F_A , F_V y F_S dependen del factor de zona y del tipo de suelo.

Para facilidad del usuario, utilizando como datos los valores de C_a en la Tabla 14 y las fórmulas mencionadas anteriormente, se calcula el coeficiente F_a' en la Tabla 18.

Tabla 18 – Coeficiente F_a'

	$F_a' = \frac{C_a}{Z \cdot N_a}$		
	Zona 4 Z=0.45g	Zona 3 Z=0.35g	Zona 2 Z=0.25g
S0	0.8	0.8	0.8
S1	1.0	1.0	1.0
S2	1.1	1.1	1.1
S3	0.9	0.9	0.9

Con los datos de la Tabla 18 y las fórmulas mencionadas anteriormente, se calcula el coeficiente F_A en la Tabla 19.

Tabla 19 – Coeficiente F_A

	$F_A = F_a'/S$		
	Zona 4 Z=0.45g	Zona 3 Z=0.35g	Zona 2 Z=0.25g
S0	1.00	1.00	1.00
S1	1.00	1.00	1.00
S2	1.00	0.91	0.88
S3	0.82	0.75	0.64

De manera similar, se calcula el coeficiente F_V en la Tabla 20 utilizando como datos los valores de C_v en la Tabla 15 y las fórmulas mencionadas anteriormente.

Tabla 20 – Coeficiente F_v'

	$F_v' = \frac{C_v}{Z \cdot N_v}$		
	Zona 4 Z=0.45g	Zona 3 Z=0.35g	Zona 2 Z=0.25g
S0	0.8	0.8	0.8
S1	1.2	1.2	1.2
S2	1.5	1.5	1.5
S3	2.4	2.4	2.4

Con los datos de la Tabla 20 y las fórmulas mencionadas anteriormente, se calcula el coeficiente F_V en la Tabla 21.

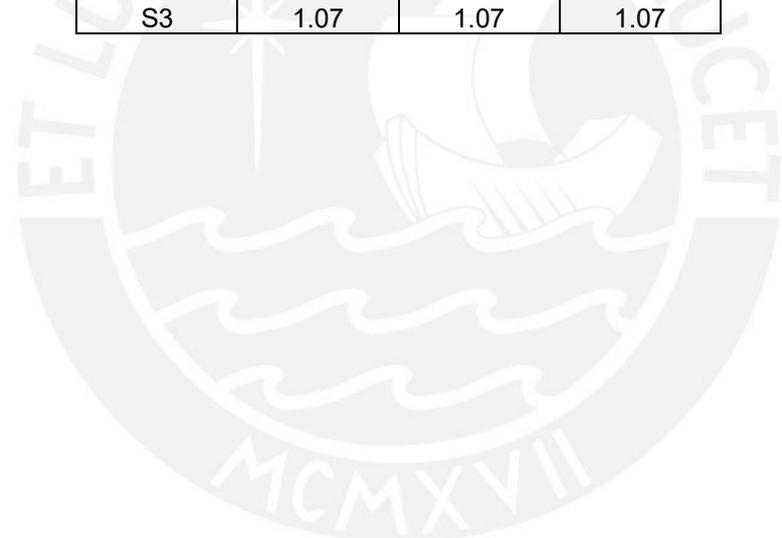
Tabla 21 – Coeficiente F_v

	$F_v = F_v' / (2.5 S T_p)$		
	Zona 4 Z=0.45g	Zona 3 Z=0.35g	Zona 2 Z=0.25g
S0	1.33	1.33	1.33
S1	1.20	1.20	1.20
S2	0.95	0.87	0.83
S3	0.87	0.80	0.69

Finalmente, se calcula el coeficiente F_s en la Tabla 22 utilizando los valores de F_a' y F_v' de la Tabla 18 y la Tabla 20 respectivamente.

Tabla 22 – Coeficiente F_s

	$F_s = F_v' / (F_a' 2.5)$		
	Zona 4 Z=0.45g	Zona 3 Z=0.35g	Zona 2 Z=0.25g
S0	0.40	0.40	0.40
S1	0.48	0.48	0.48
S2	0.57	0.57	0.57
S3	1.07	1.07	1.07



3.3. Rango de aplicabilidad de fórmulas propuestas

Las fórmulas propuestas dependen de distintas variables como la zona de parámetro Z donde se encuentra situado el punto de análisis, la distancia a la falla y los tipos de falla donde se generan los sismos. Se revisó el rango de aplicabilidad de estas fórmulas considerando la realidad del territorio peruano, para lo cual se tomó en cuenta lo siguiente:

- De la revisión de información de registros de sismos históricos generados en fallas se observó que no se tiene evidencia de sismos ocurridos con magnitudes mayores a 7.0, por lo que el tipo de fuente sísmica A es descartado del rango de aplicabilidad.
- No se tienen fallas geológicas activas en la zona $Z=0.10g$ de la norma E.030-19, por lo que no se analiza esta condición
- Los factores aplicables deben ser mayores o iguales a 1. En caso de obtener factores menores a 1, nos indica que estamos frente a un escenario en donde la aceleración obtenida con el espectro de la norma E.030-19 es mayor al calculado considerando los efectos de fuente cercana.
- A medida que la distancia a la falla aumenta, los efectos de fuente cercana se atenúan. Las fórmulas consideran distancias hasta de 15 km desde la falla.
- Las fallas tienen diferentes magnitudes máximas registradas históricamente, por lo cual el factor de tipo de fuente varía e influye en los factores calculados.

Aplicando las fórmula mostradas en la Tabla 17 y los datos de la Tabla 19, Tabla 21 y Tabla 22, se calcularon los factores para ser aplicados junto al espectros de diseño de la norma peruana E.030-19.

Se calcularon todas las combinaciones para los espectros considerando los siguientes parámetros:

- Tipos de fuente B y C según las características mostradas en la Tabla 7. No se considera el tipo de fuente A ya que no se tiene registro de sismos generados en fallas con magnitudes mayores a 7.0.
- Zonas sísmicas $Z=0.45$, $Z=0.35$ y $Z=0.25$ según la norma E.030-19 mostradas en la Tabla 8. No se considera la zona sísmica $Z=0.10$ ya que en esta zona no se tienen fallas activas identificadas.
- Perfil de suelo S0, S1, S2 y S3 según la norma E.030-19 mostradas en la Tabla 11.Tabla 8
- Distancias a la falla de ≤ 2 km, 5 km, 10 km y >15 km según lo mostrado en la Tabla 5Tabla 2 y la Tabla 6.

En la Figura 16 se muestra, a manera de ejemplo, los factores calculados correspondientes a la zona 4 con $Z=0.45$, tipo de suelo S_0 , tipo de fuente B y a una distancia de 5 km. Se puede observar que en las regiones R1 y R3 los factores son constantes, mientras que para las regiones R2 y R4 los valores toman una distribución lineal. De manera específica, la región R2 es una distribución lineal entre los valores del R1 y el R3, mientras que la región R4 toma valores cada vez mayores.

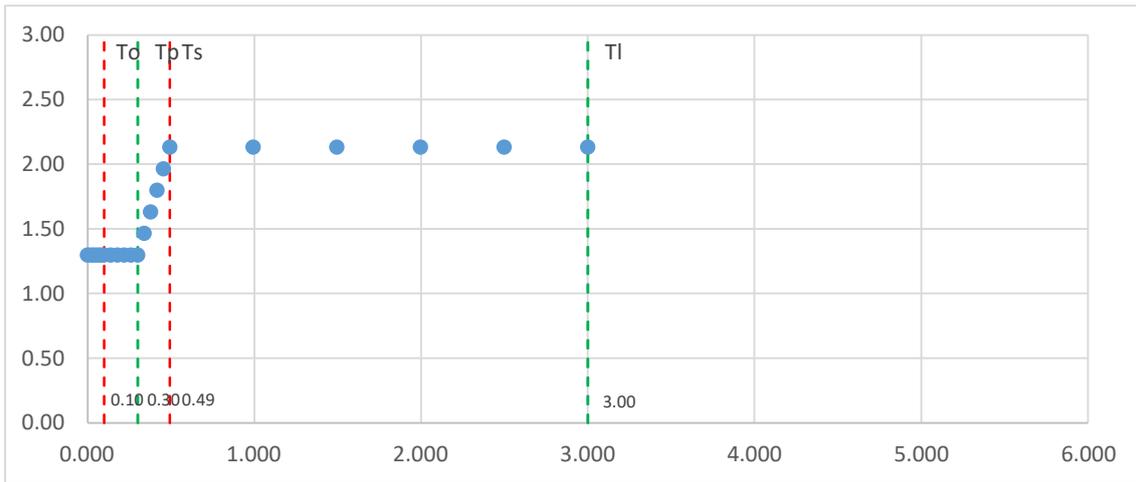


Figura 16 – Factores calculados vs Periodo

Para definir el rango de aplicabilidad, se analizarán los valores constantes obtenidos en las regiones R1 y R3, ya que sabemos que los valores en la zona R2 se encuentran definidos entre los valores de R1 y R3, y los valores de la zona R4 corresponden a valores de periodos muy altos que por lo general no son aplicables a las construcciones en el Perú.

Para todas las combinaciones de parámetros y regiones definidas anteriormente, se obtuvieron los factores de amplificación mostrados en la Tabla 23, Tabla 24, Tabla 25 y Tabla 26.

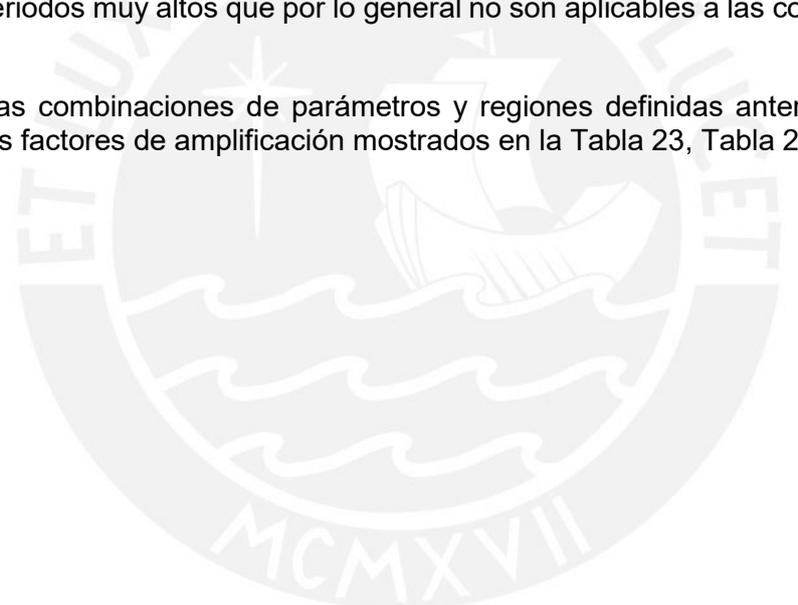


Tabla 23 – Factor de amplificación – Distancia ≤ 2 km

Distancia	≤ 2 km							
Zona	Zona 4 (Z=0.45g)							
Tipo fuente	B				C			
Tipo suelo	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3
R1	1.30	1.30	1.30	1.06	1.00	1.00	1.00	0.82
R3	2.13	1.92	1.52	1.40	1.33	1.20	1.00	0.87
Zona	Zona 3 (Z=0.35g)							
Tipo fuente	B				C			
Tipo suelo	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3
R1	1.30	1.30	1.19	0.98	1.00	1.00	0.91	0.75
R3	2.13	1.92	1.39	1.28	1.33	1.20	0.91	0.80
Zona	Zona 2 (Z=0.25g)							
Tipo fuente	B				C			
Tipo suelo	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3
R1	1.30	1.30	1.14	0.84	1.00	1.00	0.88	0.64
R3	2.13	1.92	1.33	1.10	1.33	1.20	0.88	0.69

Tabla 24 – Factor de amplificación – Distancia de 5 km

Distancia	5 km							
Zona	Zona 4 (Z=0.45g)							
Tipo fuente	B				C			
Tipo suelo	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3
R1	1.00	1.00	1.00	0.82	1.00	1.00	1.00	0.82
R3	1.60	1.44	1.14	1.05	1.33	1.20	1.00	0.87
Zona	Zona 3 (Z=0.35g)							
Tipo fuente	B				C			
Tipo suelo	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3
R1	1.00	1.00	0.91	0.75	1.00	1.00	0.91	0.75
R3	1.60	1.44	1.04	0.96	1.33	1.20	0.91	0.80
Zona	Zona 2 (Z=0.25g)							
Tipo fuente	B				C			
Tipo suelo	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3
R1	1.00	1.00	0.88	0.64	1.00	1.00	0.88	0.64
R3	1.60	1.44	1.00	0.82	1.33	1.20	0.88	0.69

Tabla 25 – Factor de amplificación – Distancia de 10 km

Distancia	10 km							
Zona	Zona 4 (Z=0.45g)							
Tipo fuente	B				C			
Tipo suelo	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3
R1	1.00	1.00	1.00	0.82	1.00	1.00	1.00	0.82
R3	1.33	1.20	1.00	0.87	1.33	1.20	1.00	0.87
Zona	Zona 3 (Z=0.35g)							
Tipo fuente	B				C			
Tipo suelo	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3
R1	1.00	1.00	0.91	0.75	1.00	1.00	0.91	0.75
R3	1.33	1.20	0.91	0.80	1.33	1.20	0.91	0.80
Zona	Zona 2 (Z=0.25g)							
Tipo fuente	B				C			
Tipo suelo	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3
R1	1.00	1.00	0.88	0.64	1.00	1.00	0.88	0.64
R3	1.33	1.20	0.88	0.69	1.33	1.20	0.88	0.69

Tabla 26 – Factor de amplificación – Distancia > 15 km

Distancia	> 15 km							
Zona	Zona 4 (Z=0.45g)							
Tipo fuente	B				C			
Tipo suelo	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3
R1	1.00	1.00	1.00	0.82	1.00	1.00	1.00	0.82
R3	1.33	1.20	1.00	0.87	1.33	1.20	1.00	0.87
Zona	Zona 3 (Z=0.35g)							
Tipo fuente	B				C			
Tipo suelo	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3
R1	1.00	1.00	0.91	0.75	1.00	1.00	0.91	0.75
R3	1.33	1.20	0.91	0.80	1.33	1.20	0.91	0.80
Zona	Zona 2 (Z=0.25g)							
Tipo fuente	B				C			
Tipo suelo	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3
R1	1.00	1.00	0.88	0.64	1.00	1.00	0.88	0.64
R3	1.33	1.20	0.88	0.69	1.33	1.20	0.88	0.69

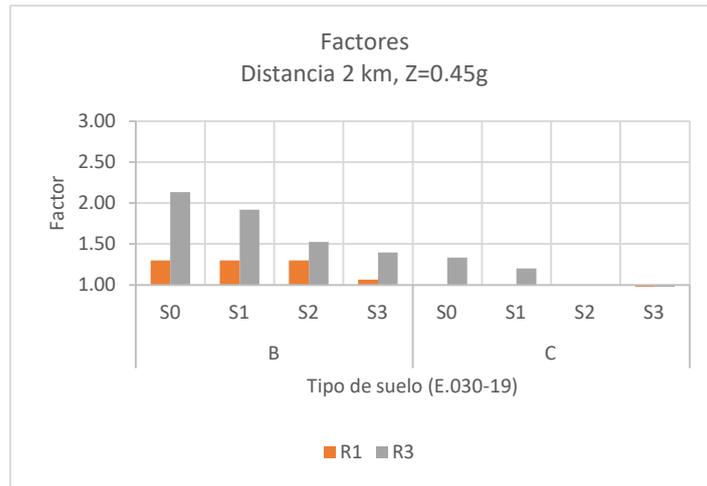


Figura 17 – Factores para una distancia ≤ 2 km y $Z=0.45g$

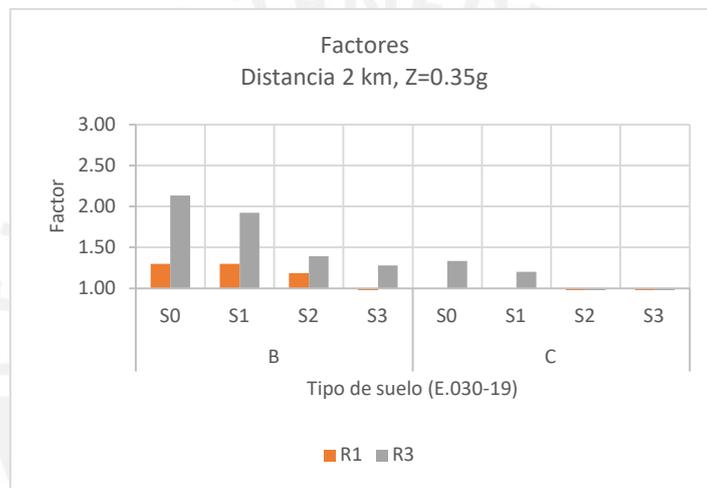


Figura 18 – Factores para una distancia ≤ 2 km y $Z=0.35g$

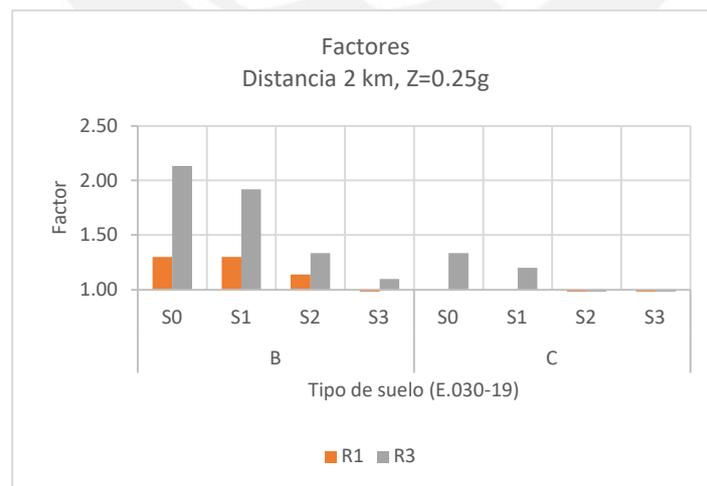


Figura 19 – Factores para una distancia ≤ 2 km y $Z=0.25g$

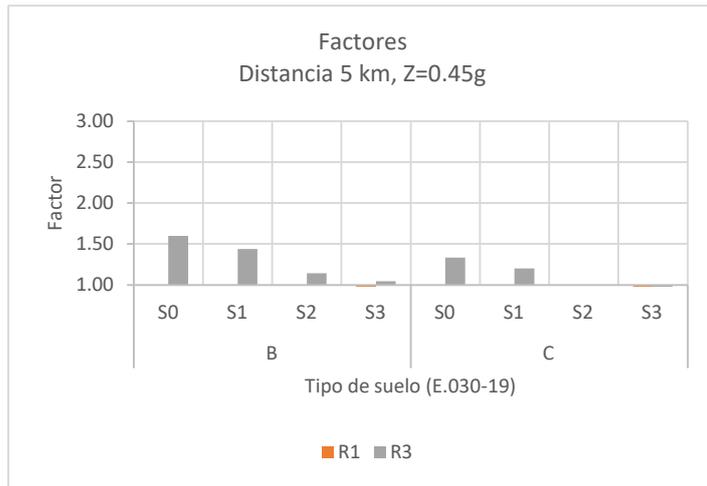


Figura 20 – Factores para una distancia de 5 km y Z=0.45g

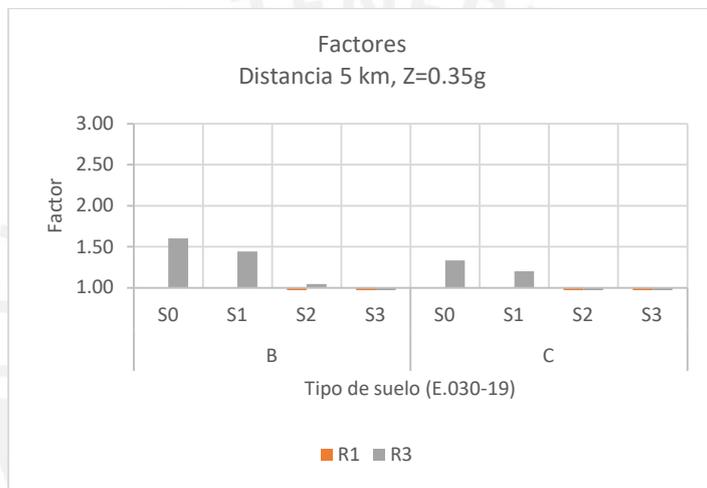


Figura 21 – Factores para una distancia de 5 km y Z=0.35g

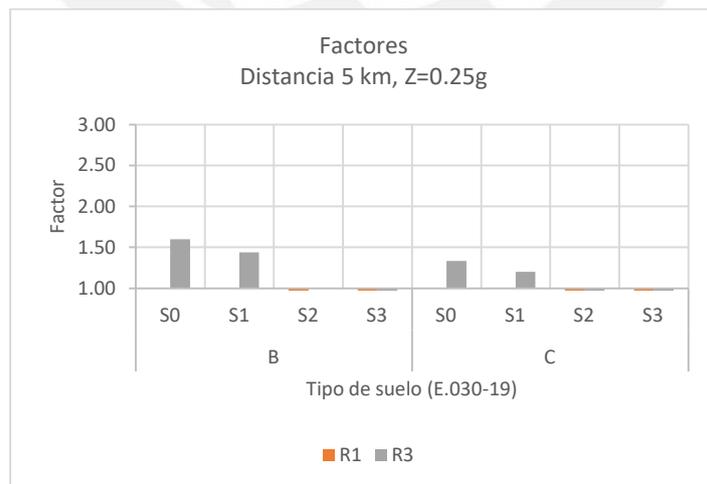


Figura 22 – Factores para una distancia de 5 km y Z=0.25g

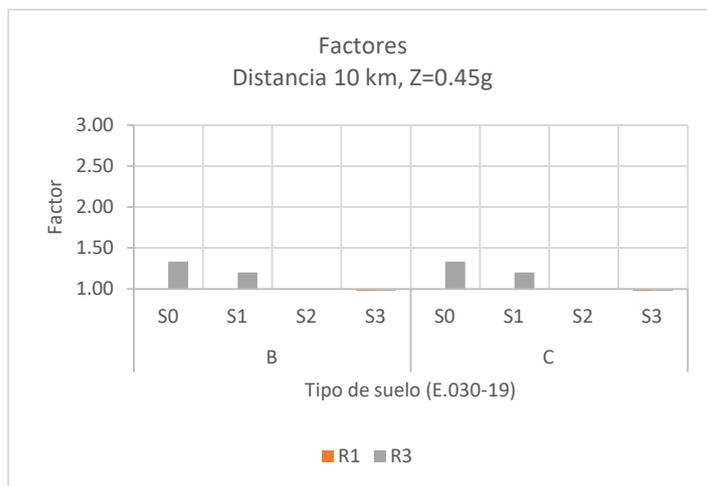


Figura 23 – Factores para una distancia de 10 km y $Z=0.45g$

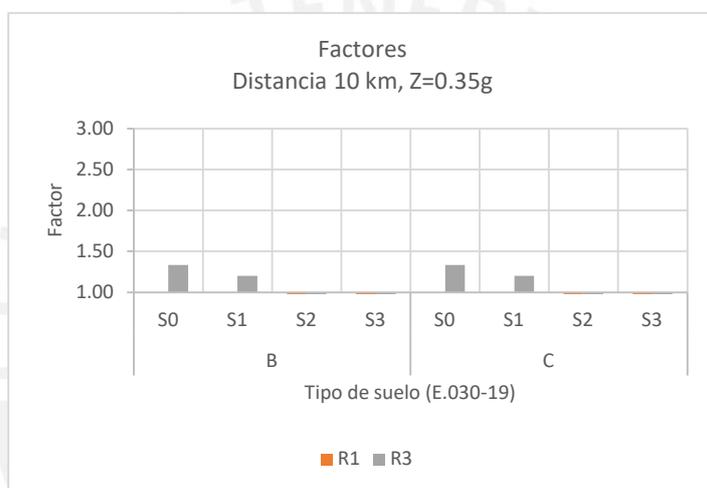


Figura 24 – Factores para una distancia de 10 km y $Z=0.35g$

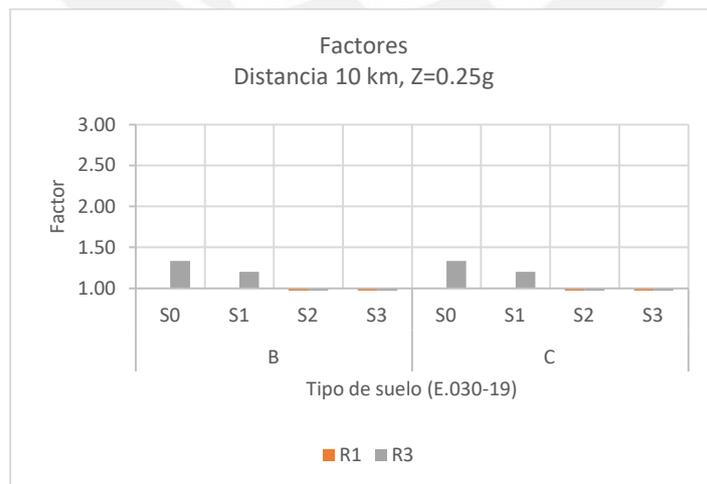


Figura 25 – Factores para una distancia de 10 km y $Z=0.25g$

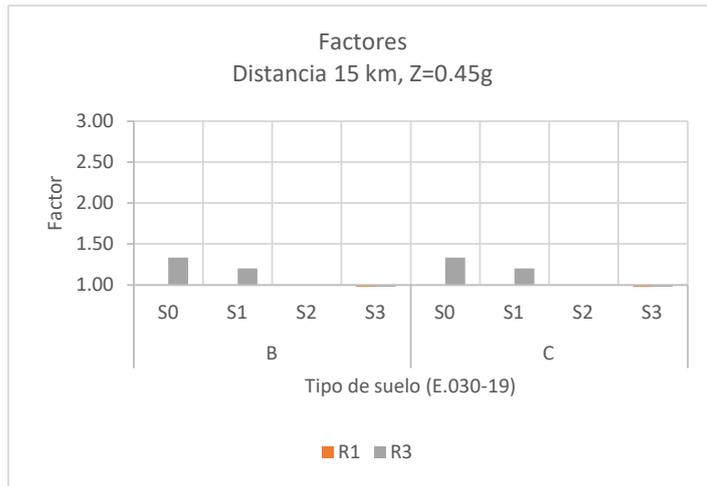


Figura 26 – Factores para una distancia > 15 km y Z=0.45g

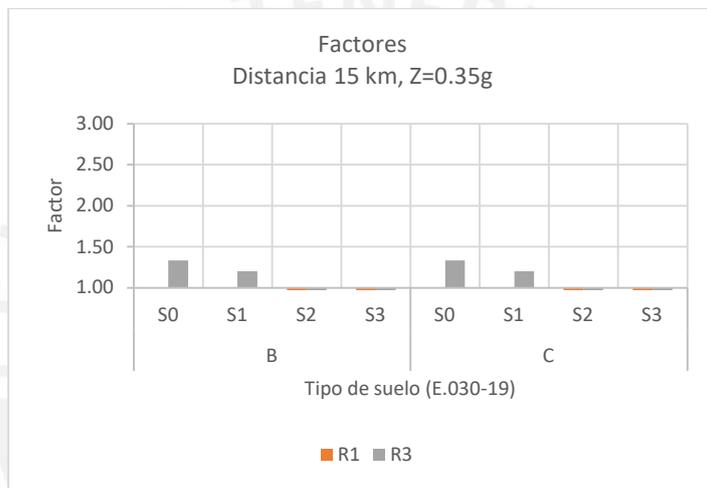


Figura 27 – Factores para una distancia > 15 km y Z=0.35g

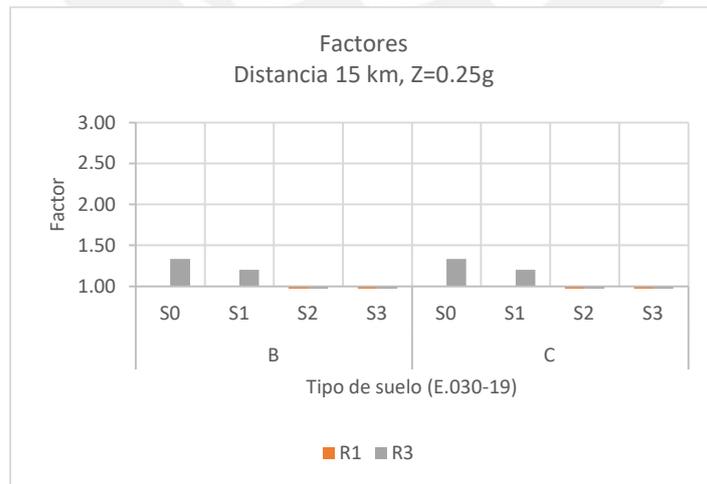


Figura 28 – Factores para una distancia > 15 km y Z=0.25g

3.3.1. Discusión de resultados

De la Tabla 23 correspondiente a una distancia de 2 km se observa que para las zonas 2, 3, 4 y tipo de fuente B, casi todos los factores obtenidos son mayores a 1, lo que nos indica que, para estos casos, los efectos de fuente cercana modifican la aceleración propuesta en la norma E.030-19. Para el tipo de fuente C y zonas 2, 3 y 4, se obtienen factores mayores a 1 para los tipos de suelo S0 y S1 en la zona de periodos largos.

De la Tabla 24 correspondiente a una distancia de 5 km se observa que para el tipo de fuente B se obtienen valores mayores a 1 en la zona de periodos largos. Específicamente, para la zona 4 se obtienen factores mayores a 1 en todos los tipos de suelo, para la zona 3 en los tipos S0, S1 y S2, y para la zona 2 para los tipos S0 y S1. Para el tipo de fuente C y zonas 2, 3 y 4, se obtienen factores mayores a 1 para los tipos de suelo S0 y S1 en la zona de periodos largos.

La Tabla 25 y la Tabla 26 correspondientes a distancias de 10 y 15 km respectivamente presentan los mismos factores, ya que los factores N_a y N_v son iguales a 1 para ambos casos en los tipos de fuente B y C. Sólo varía el valor de $N_v = 1.20$ para el tipo de fuente A, pero no consideramos este tipo de fuente dentro del rango de aplicación de la norma E.030-19. En estas tablas se obtienen factores mayores a 1 en la zona de periodos largos para las zonas 2, 3 y 4 en los tipos de suelo S0 y S1.

De manera general, se obtiene que los factores mayores a 1 se obtienen en su mayoría en la zona de periodos largos. Por lo tanto, es importante tomar en cuenta estos efectos en edificios altos o en edificaciones con amortiguadores o disipadores.

Se nota una tendencia en la disminución de los factores dependiendo del tipo de suelo, a medida que la rigidez y resistencia del suelo bajan también baja el factor de efecto de fuente cercana.

3.3.2. Ejemplo de cálculo utilizando las ecuaciones propuestas

Se realiza un cálculo a modo de ejemplo de aplicación de las fórmulas propuestas en el capítulo 3.2.

Datos asumidos:

- Sismo con epicentro a 2 km de la falla Altomayo cerca de la ciudad de Moquegua
- Zona sísmica 3 según la norma peruana E.030-19
- Se asume un tipo de suelo S2
- Edificio de viviendas de 4 pisos (12 m de altura aproximadamente)
- Históricamente, se observó que la falla geológica Altomayo es capaz de presentar sismos de magnitud mayor a 6.0

Con los datos mencionados anteriormente se hizo una comparación entre el espectro obtenido según la norma peruana E.030-19 y el espectro que se obtiene al aplicar las fórmulas propuestas en este trabajo.

Parámetros de la norma peruana E.030-19:

- Zona sísmica 3
 - o $Z = 0.35 g$
- Perfil del suelo S1
 - o $S = 1.00$
 - o $T_p = 0.40 s$
 - o $T_L = 2.5 s$
- Edificio de 4 pisos de 12 m de altura aproximadamente
 - o Se asume un periodo de la estructura según el inciso 28.4.1. de la norma peruana E.030-19

$$T = \frac{h_a}{C_T}$$

Donde:

- $h_a = 12 m$
- $C_T = 45$ (edificios de pórticos de concreto armado con muros en las cajas de ascensores y escaleras)

$$T = \frac{h_a}{C_T} = 0.27 s$$

Con el periodo se calcula el factor de amplificación sísmica C

$$T = 0.27s < T_p = 0.40s$$

$$C = 2.50$$

La aceleración espectral ZSC según la norma peruana E.030-19 calculada es la siguiente:

$$S_a = ZCS = 0.35 \times 2.50 \times 1.00 = 0.875g$$

Cálculo con ecuaciones propuestas

- Tipo de fuente
 - o B (Tabla 7)
- Zona sísmica 3
 - o $Z = 0.35 g$

- Perfil del suelo S1
 - $S = 1.00$
 - $T_p = 0.40 \text{ s}$
 - $T_L = 2.5 \text{ s}$
- Distancia a la falla
 - 2 km (Tabla 3)
- Edificio de 4 pisos de 12 m de altura aproximadamente
 - $T = 0.27 \text{ s}$

Con los datos S2 y $Z=0.35g$, calculamos:

Tabla 27 – Ejemplo de aplicación – Coeficiente F_A

	$F_A = Fa'/S$		
	Zona 4 $Z=0.45g$	Zona 3 $Z=0.35g$	Zona 2 $Z=0.25g$
S0	1.00	1.00	1.00
S1	1.00	1.00	1.00
S2	1.00	0.91	0.88
S3	0.82	0.75	0.64

Tabla 28 – Ejemplo de aplicación – Coeficiente F_v

	$F_v = Fv'/(2.5 S T_p)$		
	Zona 4 $Z=0.45g$	Zona 3 $Z=0.35g$	Zona 2 $Z=0.25g$
S0	1.33	1.33	1.33
S1	1.20	1.20	1.20
S2	0.95	0.87	0.83
S3	0.87	0.80	0.69

Tabla 29 – Ejemplo de aplicación – Coeficiente F_s

	$F_s = Fv'/(Fa' 2.5)$		
	Zona 4 $Z=0.45g$	Zona 3 $Z=0.35g$	Zona 2 $Z=0.25g$
S0	0.40	0.40	0.40
S1	0.48	0.48	0.48
S2	0.57	0.57	0.57
S3	1.07	1.07	1.07

$F_A = 1.00$

$$F_V = 1.20$$

$$F_S = 0.48$$

Con estos valores obtenidos para F_A , F_V y F_S , y según la zona de periodos en donde nos encontremos, calculamos la aceleración de diseño propuesta considerando los efectos de fuente cercana.

Tabla 30 – Ejemplo de aplicación - Resumen de ecuaciones simplificadas

R1 $T < T_p$	$F_A N a$
R2 $T_p < T < T_s$	$\frac{[F_A N a - F_V N v]}{T_p - T_s} \cdot T$
R3 $T_s < T < T_L$	$F_V N v$
R4 $T_L < T$	$F_V [T/T_L] N v$

Considerando que el periodo de la estructura es $T = 0.27$ s, nos encontramos en la zona 1 donde $T < T_p$.

Tabla 31 – Ejemplo de aplicación - Factor de fuente cercana N_a (Tabla 16-S, UBC-97)

Tipo de fuente sísmica	Distancia más cercana a la fuente sísmica		
	≤ 2 km	5 km	≥ 10 km
B	1.3	1.0	1.0
C	1.0	1.0	1.0

Tenemos que:

$$F_F = F_A N_A$$

$$F_F = 1.00 \cdot 1.30 = 1.30$$

Finalmente, multiplicando el factor de amplificación por la aceleración según la norma peruana E.030-19, obtenemos el valor de aceleración propuesto para el diseño considerando los efectos de fuente cercana:

$$S_A = F_F S_{A_{E.0.30}} = 1.30 \cdot 0.875g = 1.14g$$

Observamos que específicamente para este caso, se está subestimando el valor de la aceleración en un 30%.

En los Anexos 1 y 2 se presentan ejemplos de cálculo comparativo entre el espectro de la norma peruana y el Espectro FC calculado con los factores calculados en este trabajo.

CAPÍTULO 4.- Propuesta para el cálculo de factores que considere los efectos de fuente cercana en la norma E.030-19

A continuación, se muestra la propuesta para el cálculo de los factores para incluir los efectos de fuente cercana en el espectro de diseño de la norma E.030-19.

En la Tabla 32 se muestran las fórmulas para el cálculo de los factores de fuente cercana respecto al periodo.

Tabla 32 – Factor de fuente cercana (FC)

Región	Factor de fuente cercana (FC)
R1 $T < T_p$	$F_A N a$
R2 $T_p < T < T_s$	$\frac{[F_A N a - F_v N v]}{T_p - T_s} \cdot T$
R3 $T_s < T < T_L$	$F_v N v$
R4 $T_L < T$	$F_v [T/T_L] N v$

Donde:

- $T_s = F_s \cdot N v / N a$
- F_A : coeficiente para el cálculo
- F_v : coeficiente para el cálculo
- F_s : coeficiente para el cálculo del periodo

Los coeficientes F_A , F_v y F_s para ser utilizados en la Tabla 32 dependen del factor de zona y del tipo de suelo según lo define la norma E.030-19. Se calculan según la Tabla 33, Tabla 34 y Tabla 35.

Tabla 33 – Coeficiente F_A

	F_A		
	Zona 4 $Z=0.45g$	Zona 3 $Z=0.35g$	Zona 2 $Z=0.25g$
S0	1.00	1.00	1.00
S1	1.00	1.00	1.00
S2	1.00	0.91	0.88
S3	0.82	0.75	0.64

Tabla 34 – Coeficiente F_v

	F_v		
	Zona 4 Z=0.45g	Zona 3 Z=0.35g	Zona 2 Z=0.25g
S0	1.33	1.33	1.33
S1	1.20	1.20	1.20
S2	0.95	0.87	0.83
S3	0.87	0.80	0.69

Tabla 35 – Coeficiente F_s

	F_s		
	Zona 4 Z=0.45g	Zona 3 Z=0.35g	Zona 2 Z=0.25g
S0	0.40	0.40	0.40
S1	0.48	0.48	0.48
S2	0.57	0.57	0.57
S3	1.07	1.07	1.07

Los valores de N_a y N_v dependen de la distancia a la falla y el tipo de fuente sísmica. Se calculan según la Tabla 36, Tabla 37 y Tabla 38.

Tabla 36 – Coeficiente de fuente cercana N_a

Tipo de fuente sísmica	Distancia más cercana a la fuente sísmica		
	$\leq 2\text{km}$	5 km	$\geq 10\text{ km}$
B	1.3	1.0	1.0
C	1.0	1.0	1.0

Tabla 37 – Coeficiente de fuente cercana N_v

Tipo de fuente sísmica	Distancia más cercana a la fuente sísmica			
	$\leq 2\text{km}$	5 km	10 km	$\geq 15\text{ km}$
B	1.6	1.2	1.0	1.0
C	1.0	1.0	1.0	1.0

Para definir los valores de N_a y N_v en las tablas mostradas anteriormente, se necesita identificar el tipo de fuente sísmica la cual se define según la Tabla 38.

Tabla 38 – Tipo de fuente sísmica

Tipo de fuente sísmica	Descripción de la fuente sísmica	Definición de la fuente sísmica
		Momento magnitud máximo, M
B	Todas las fallas que no son del tipo C	$M < 7.0$ $M \geq 6.5$
C	Fallas que no son capaces de producir eventos de magnitudes grandes y con bajo ratio de actividad sísmica	$M < 6.5$

Respecto al sismo vertical, la metodología del UBC-97 no especifica un procedimiento para la configuración de un espectro de diseño del sismo vertical. Por ello, se recomienda mantener lo indicado en la norma peruana E.030-19 en el inciso 29.2.2.



CAPÍTULO 5.- Conclusiones y Recomendaciones

- En el Perú no se cuenta con registros de aceleración respecto a la actividad de fallas y su efecto en las zonas cercanas. Debido a esta carencia, tampoco existe investigación respecto a la atenuación de los efectos de fuente cercana en los sistemas de fallas de nuestro país.
- La norma peruana de diseño sismorresistente vigente (E.030-19) no incluye los efectos de fuente cercana en el espectro de diseño.
- A nivel internacional, algunas normas (ASCE 7, IBC) incorporan mapas de peligro sísmico que incluyen ya los efectos de fuente cercana mediante leyes de atenuación específicas para diferentes tipos de fallas.
- Una metodología para incorporar los efectos de fuente cercana en el espectro de diseño es la desarrollada por el Uniform Building Code en “Structural Engineering Design Provisions” de 1997. Esta metodología es la que mejor se adecúa para incorporar los efectos de fuente cercana en la norma peruana debido a que utiliza coeficientes que modifican directamente la construcción del espectro de diseño y no dependen del cálculo con leyes de atenuación.
- Los factores de amplificación del espectro obtenidos en este trabajo dependen de la distancia a la falla, la magnitud de los sismos generados en la falla, el factor de zona Z y el tipo de suelo.
- Se encontró que para la zona sísmica 4 y a una distancia de 2 km los factores llegan a valores entre 1.3 y 1.1 para la región de periodos cortos del espectro en perfiles de suelo S0 a S3; para la zona de periodos largos, los factores varían entre 2.1 y 1.4 para estos mismos perfiles de suelo. Para la zona sísmica 2, se encontró que los factores de amplificación en periodos cortos tendrían prácticamente el mismo rango que para la zona 4 pero solo para los perfiles S0 a S2, mientras que para periodos largos los factores serían de 2.1 a 1.1 para perfiles S0 a S3.
- En el país existen ciudades cercanas a fallas geológicas, para las cuales deberían emplearse espectros de diseño que incorporen los efectos de fuente cercana como los desarrollados en este trabajo.
- Fue posible definir una metodología para incluir los efectos de fuente cercana en el espectro de diseño empleando como base los espectros de la norma peruana E.030-19 y los factores de modificación desarrollados en este trabajo.
- Sería recomendable que el Estado desarrolle un estudio extenso de las principales fallas existentes en nuestro territorio con el fin de caracterizar las demandas sísmicas sobre las obras civiles. Este plan debería incluir registros de aceleraciones y datos como la magnitud esperada asociada a periodos de retorno, el tipo de falla, el deslizamiento de la falla por año, el buzamiento y el ancho de la falla, el tipo de suelo en donde se encuentra la falla, entre otros. Esta información es importante para poder actualizar la metodología y poder aplicar leyes de atenuación como lo hacen en las normas internacionales.

REFERENCIAS

- Alva, J. (2021). Sismicidad y Registros Sísmicos en Cusco.
- Applied Technology Council. (1996). Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. California, EEUU: Seismic Safety Commission.
- Bernal, I., & Tavera, H. (2002). Geodinámica, Sismicidad y Energía Sísmica en Perú. Lima.
- Bertero, V., Anderson, C., & Masani, M. (1999). Impulse earthquake ground motions: a historical and critical review. *J. C. Anderson, V. V. Bertero and R. Bertero. Performance improvement of long period buildings structures subjected to severe pulse-type ground motions, Appendix A, 215-219.* PEER.
- Bolt, B. (2003). Earthquakes. *5th Edition.*
- Bolt, B., & Abrahamson, N. (2003). Estimation of strong seismic ground motions. *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part B, IASPEI.*
- Bozorgnia, Y., Abrahamson, N., Al Atik, L., Ancheta, T., Atkinson, G., Baker, J., . . . Hanks. (2014). NGA-West2 Research Project. *Earthquake Spectra, Volume 30.*
- British Standards Institution. (2004). Eurocode 8: Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures. British Standards Institution.
- Dorbath, C., Dorbath, L., Cisternas, A., Deverchere, J., & Sebrier, M. (1990). Seismicity of the Huancayo Basin (central Peru) and the Huaytapallana Fault. *Journal of South American Earth Sciences, Vol 3, 21-29.*
- Doser, D. (1987). The Ancash, Peru, Earthquake of 1946 November 10: Evidence for low-angle normal faulting in the high Andes of northern Peru. *Geophys.J.R.astr.Soc, 57-71.*
- Frau, C. D., & Saragoni, G. R. (2012). Terremotos Tipo Pulso y Efectos de Directividad de la Ruptura.
- Gamarra, C., & Aguilar, Z. (2009). Nuevas Fuentes Sismogénicas para la Evaluación del Peligro Sísmico y Generación de Espectros de Peligro Uniforme en el Perú.
- García Fernández Baca, B., & Benavente Escobar, C. (2020). Existencia de Fallas Geológicas Activas en el Distrito de Ilo. *Opinión Técnica N°008-2020.*
- Grimaz, S., & Malisan, P. (2014). Near field domain effects and their consideration in the international and Italian seismic codes. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, 717-738.*
- INGEMMET. (2017). Estudio Paleosismológico del Sector Noroeste de la Falla Geológica Activa Tambomachay. *Informe Técnico.* Perú.
- International Conference of Building Officials. (1997). Uniform Building Code. *Structural Engineering Design Provisions.* EEUU.

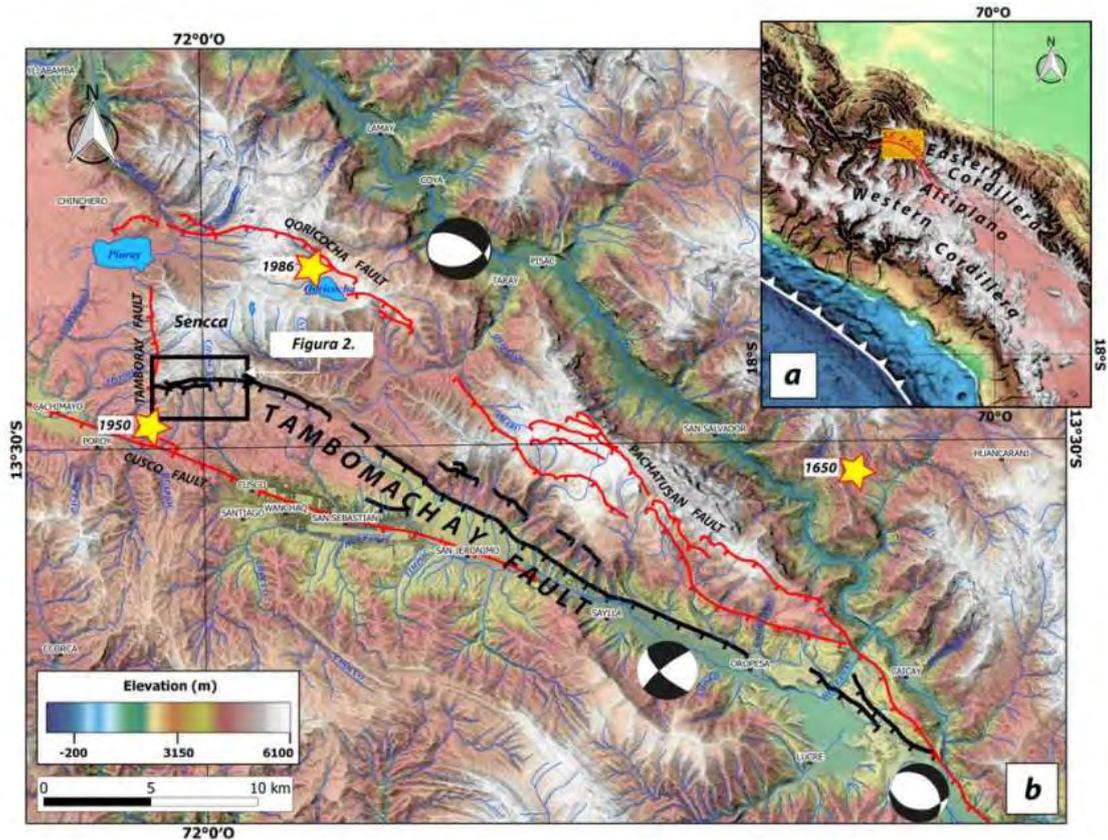
- Kircher, C., Luco, N., & Whittaker, A. (2010). Project 07 - Reassessment of Seismic Design Procedures. *2010 Structures Congress*, (pág. 9).
- Luco, N. (2019). Seismic Design and Hazard Maps: Before and After. *Structure Magazine*.
- Macharé, J., Fenton, C., Machette, M., Lavenue, A., Costa, C., & Dart, R. (2003). Database and Map of Quaternary Faults and Folds in Perú and its Offshore Region. U.S. Geological Survey.
- Ministerio de Vivienda, C. y. (2019). Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente. *Resolución Ministerial N°043-2019-VIVIENDA*. Lima, Perú: Diario Oficial El Peruano.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Construction, P. (2010). Code for Seismic Design of Buildings. China.
- National Institute of Standards and Technology. (1994). *1994 Northridge Earthquake*.
- New Zealand Standards. (2004). Structural Design Actions - Part 5: Earthquake Actions. Nueva Zelanda.
- Power, M., Chiou, B., Abrahamson, N., Bozorgnia, Y., Shantz, T., & Roblee, C. (Febrero de 2008). An Overview of the NGA Project. *Earthquake Spectra, Volumen 24*.
- Risk Management Solutions, Inc. (2005). 1995 Kobe Earthquake 10-years Retrospective.
- Rosenblueth, E., & Prince, J. (1965). El temblor de San Salvador, 3 de Mayo, 1965: Ingeniería Sísmica. *Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*, 3(2)(33-60).
- Tavera, H. (2014). Evaluación del Peligro Sísmico Asociado a los Sismos y Efectos Secundarios en Perú. Lima, Perú.
- Tavera, H. (2014). Re-evaluación del Peligro Sísmico Probabilístico para el Perú.
- Tavera, H. (2020). Análisis y evaluación de los patrones de sismicidad y escenarios sísmicos en el borde occidental del Perú. Lima, Perú.
- Tavera, H., Buforn, E., Bernal, I., & Antayhua, Y. (2001). Análisis de los Procesos de Ruptura de los Sismos ocurridos en 1990 y 1991 en el Valle del Alto Mayo (Moyobamba-Perú). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú v.91*, 55-68.

ANEXOS

Anexo 1: Ejemplo de cálculo de espectro considerando un sismo en la falla Tambomachay

Se realizan cálculos a modo de ejemplo de aplicación de las fórmulas propuestas en el capítulo 3.2. Se asume un terremoto a 2 km de la falla Tambomachay

Datos asumidos:



Mapa topográfico (INGEMET (2017)). Estudio Paleosismológico del sector noroeste de la falla geológica activa Tambomachay)

- Sismo con epicentro a 2 km en la falla Tambomachay cerca de la ciudad de Cusco
- Zona sísmica 2 según la norma peruana E.030-19
- Se asume un tipo de suelo S2
- Históricamente, se generaron terremotos de magnitud entre 6.5 a 6.9 (INGEMET (2017))

Con los datos mencionados anteriormente se hizo una comparación entre el espectro obtenido según la norma peruana E.030-19 y el espectro que se obtiene al aplicar las fórmulas propuestas en este trabajo.

Parámetros de la norma peruana E.030-19:

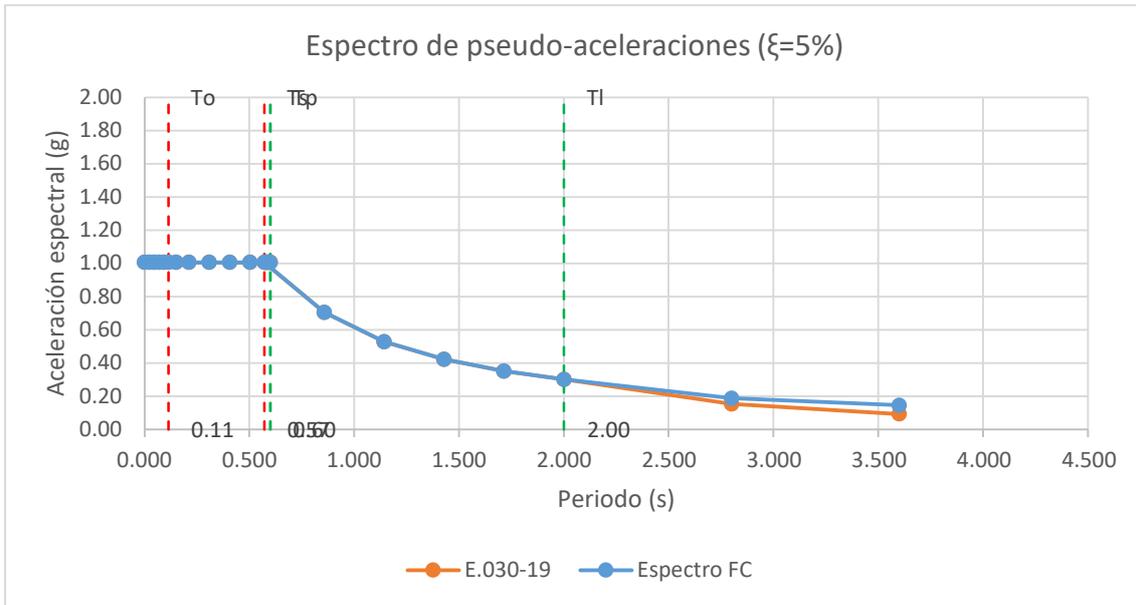
- Zona sísmica 2
 - $Z = 0.25 \text{ g}$
- Perfil del suelo S2
 - $S = 1.20$
 - $T_p = 0.60 \text{ s}$
 - $T_L = 2.0 \text{ s}$

Cálculo con ecuaciones propuestas

- Tipo de fuente
 - B (Tabla 7)
- Zona sísmica 2
 - $Z = 0.25 \text{ g}$
- Perfil del suelo S2
 - $S = 1.20$
 - $T_p = 0.60 \text{ s}$
 - $T_L = 2.0 \text{ s}$
- Distancia a la falla
 - 2 km (Tabla 3)

Con los datos se calculan los espectros de la norma E.030-19 y el obtenido multiplicando ese mismo espectro por los factores calculados en este trabajo (Espectro FC).

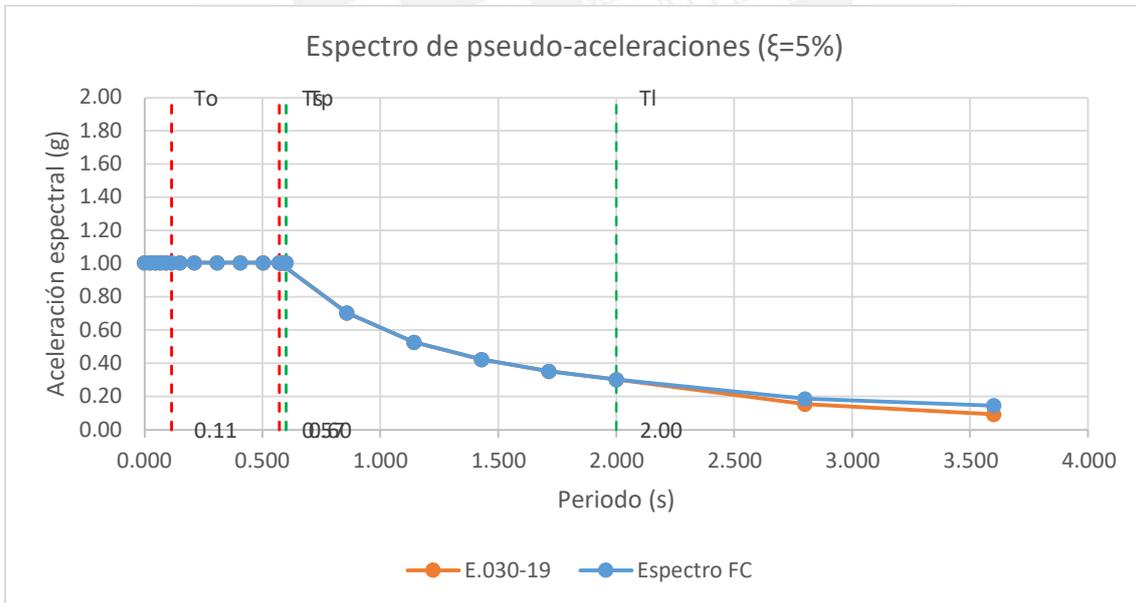
Comparación de espectros Norma E.030-19 y Espectro FC - 2 km



Se obtiene que, para una distancia de 2 km desde la fuente, el espectro obtenido con los factores de efectos de fuente cercana es mayor al calculado solo con la norma E.030-19. A esta distancia se observa que los efectos de fuente cercana tienen influencia en el espectro de diseño.

Si la distancia a la fuente aumenta a 5 km, se obtienen los siguientes espectros:

Comparación de espectros Norma E.030-19 y Espectro FC - 5 km

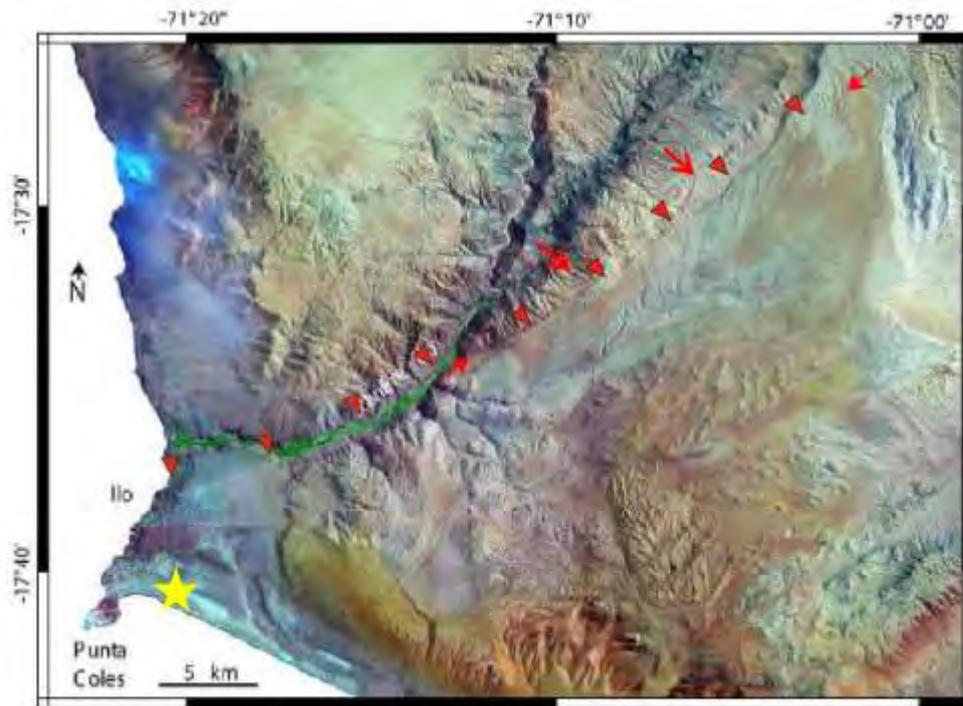


Para una distancia de 5 km los efectos de fuente cercana se disipan en la zona de periodos cortos pero siguen influyendo, aunque en menor medida, en la zona de periodos largos.

Anexo 2: Ejemplo de cálculo de espectro considerando un sismo en la falla Chololo

Se realizan cálculos a modo de ejemplo de aplicación de las fórmulas propuestas en el capítulo 3.2. Se asume un terremoto a 2 km de la falla de Chololo, en la ciudad de Ilo.

Datos asumidos:



Mapa topográfico (INGEMET (2020). Existencia de fallas geológicas activas en el distrito de Ilo)

- Sismo con epicentro a 2 km en la falla Chololo en el distrito de Ilo
- Zona sísmica 4 según la norma peruana E.030-19
- Se asume un tipo de suelo S2
- De generarse una ruptura en la falla, se podría generar sismo de magnitudes mayores a 6.5. (INGEMET (2020))

Con los datos mencionados anteriormente se hizo una comparación entre el espectro obtenido según la norma peruana E.030-19 y el espectro que se obtiene al aplicar las fórmulas propuestas en este trabajo.

Parámetros de la norma peruana E.030-19:

- Zona sísmica 4
 - o $Z = 0.45 g$
- Perfil del suelo S2

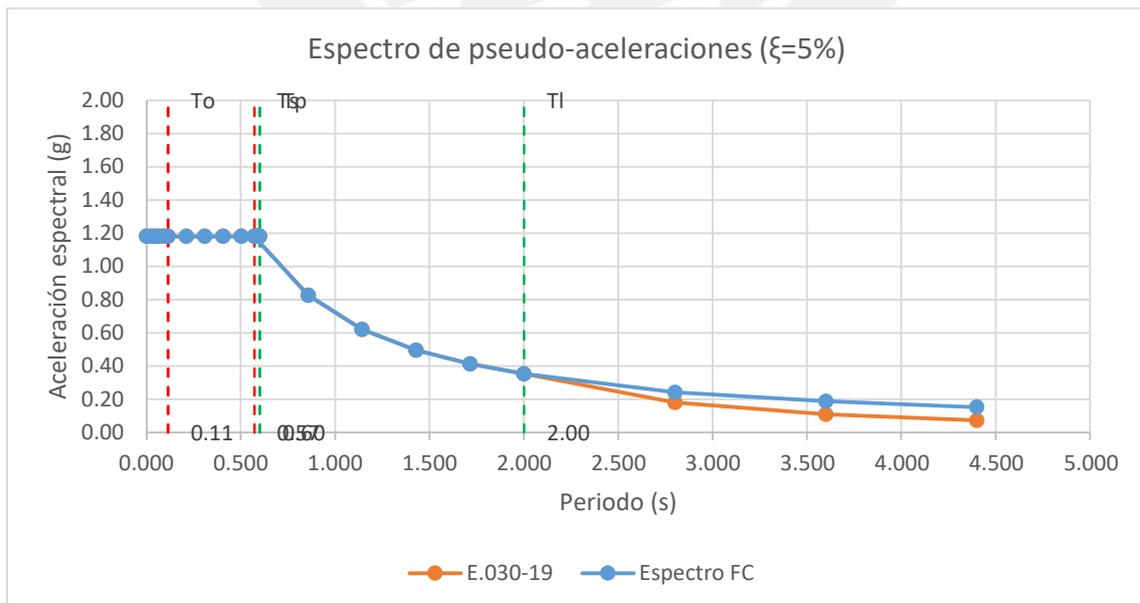
- $S = 1.20$
- $T_P = 0.60 \text{ s}$
- $T_L = 2.0 \text{ s}$

Cálculo con ecuaciones propuestas

- Tipo de fuente
 - B (Tabla 7)
- Zona sísmica 4
 - $Z = 0.45 \text{ g}$
- Perfil del suelo S2
 - $S = 1.20$
 - $T_P = 0.60 \text{ s}$
 - $T_L = 2.0 \text{ s}$
- Distancia a la falla
 - 2 km (Tabla 3)

Con los datos se calculan los espectros de la norma E.030-19 y el obtenido multiplicando ese mismo espectro por los factores calculados en este trabajo (Espectro FC).

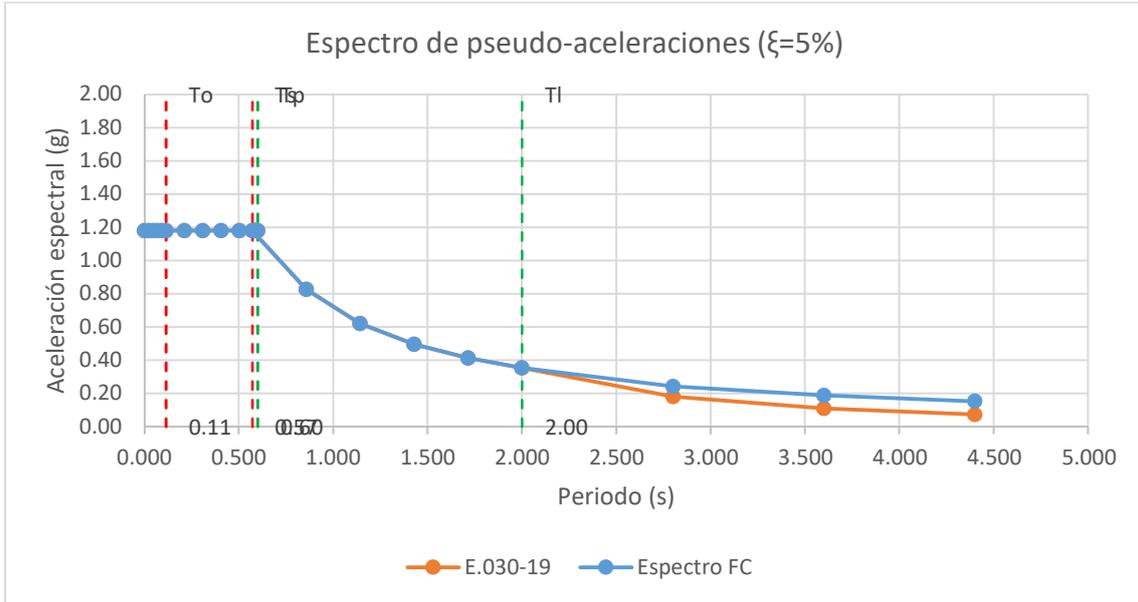
Comparación de espectros Norma E.030-19 y Espectro FC - 2 km



Se obtiene que, para una distancia de 2 km desde la fuente, el espectro obtenido con los factores de efectos de fuente cercana es mayor al calculado solo con la norma E.030-19. A esta distancia se observa que los efectos de fuente cercana tienen influencia en el espectro de diseño.

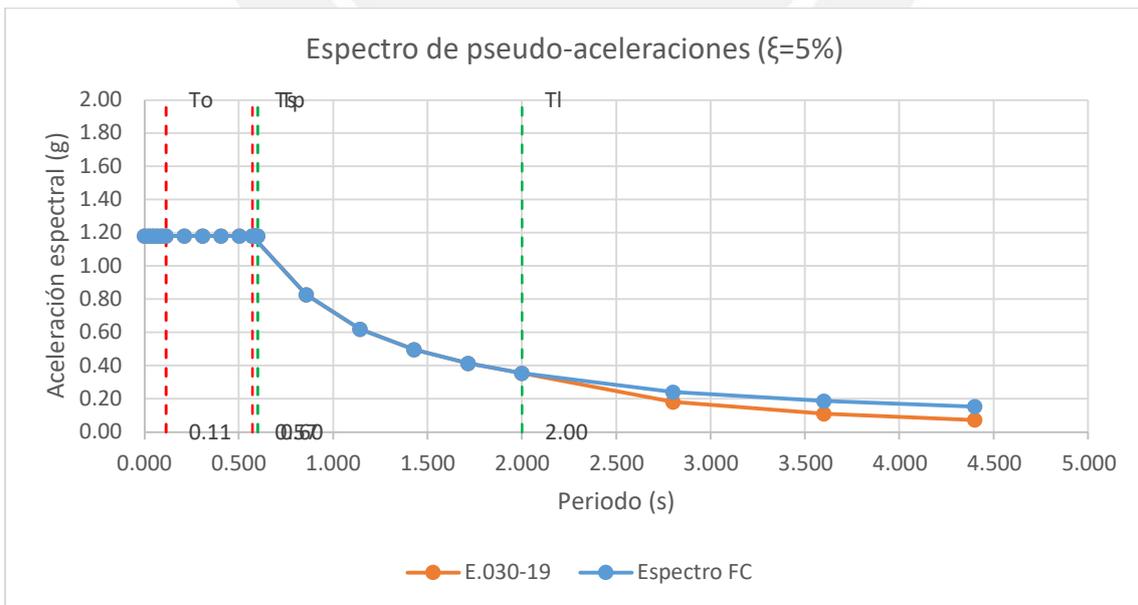
Si la distancia a la fuente aumenta a 5 km, se obtienen los siguientes espectros:

Comparación de espectros Norma E.030-19 y Espectro FC - 5 km



Se obtiene que, para una distancia de 5 km desde la fuente, el espectro obtenido con los factores de efectos de fuente cercana sigue siendo mayor al calculado solo con la norma E.030-19 en la zona de periodos intermedios y largos.

Si la distancia a la fuente aumenta a 10 km, se obtienen los siguientes espectros:



Para una distancia de 10 km los efectos de fuente cercana se disipan en la zona de periodos cortos, pero siguen influyendo, aunque en menor medida, en la zona de periodos largos.

