

## Evaluación de la Demanda Sísmica en Chile – Actualización NCh2369

M.Medalla (1), C. Urzúa (2), R. Astroza (3)(4)

(1) Ingeniero Civil, M. Eng., Ph.D(c), AMU Ingenieros, miguel.medalla@amuingenieros.com

(2) Ingeniero Civil, M. Sc., AMU Ingenieros, cristian.urzua@amuingenieros.com

(3) Ingeniero Civil, M.Sc, Ph.D., Universidad de los Andes, rastroza@miuandes.cl

(4) Ingeniero Civil, M.Sc, Ph.D., AMU Ingenieros, rodrigo.astroza@amuingenieros.com

### Resumen

En el contexto de la reciente publicación de la norma chilena de diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales, NCh2369:2023, se ha desarrollado una evaluación de la amenaza sísmica a escala nacional. Como resultado, se presenta una actualización de las demandas de diseño respecto de su versión predecesora NCh2369.Of2003. Las demandas espectrales han sido definidas de manera tal de lograr una mejor consistencia entre las demandas horizontales y verticales de diseño, las demandas de desplazamiento, los espectros objetivos para selección de registros sísmicos, así como también, establecer niveles de amenaza sísmica de referencia para comparar los resultados obtenidos en evaluaciones locales y específicas de amenaza sísmica para proyectos industriales.

*Palabras-Clave: NCh2369:2023, Amenaza Sísmica, Demandas de Diseño*

### Abstract

In the context of the recent publication of the Chilean standard for seismic design of industrial structures and facilities, NCh2369:2023, an assessment of the seismic hazard has been developed at a national scale. As a result, an update of the design demands regarding its predecessor version NCh2369.Of2003 is presented. Seismic demands have been defined in such a way as to achieve better consistency among design horizontal and vertical demands, displacement demands, target spectra for selection of ground motion records, as well as establishing a seismic hazard benchmark for comparison with results achieved in local and specific site seismic-hazard estimation in industrial projects.

*Keywords: NCh2369:2023, Seismic Hazard, Seismic Design Demands*

## 1 Introducción

En el contexto del proyecto de actualización de la norma chilena de diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales, NCh2369.Of2003 [1], se ha desarrollado una evaluación de la amenaza sísmica a escala nacional. El propósito de esta evaluación nace de la necesidad de contar con una definición de nuevas demandas espectrales que permitan, de manera consistente entre sí, definir demandas de diseño, demandas de desplazamiento, seleccionar registros sísmicos para intensidades adecuadamente definidas, así como también, establecer una base metodológica que permitiese estandarizar y eventualmente comparar los resultados obtenidos en evaluaciones locales de amenaza sísmica para proyectos industriales.

De acuerdo con lo anterior, la norma NCh2369:2023 [2] presenta una nueva definición de los espectros de diseño elásticos horizontales, espectros de diseño verticales, así como también, la definición de un espectro de referencia, que representa aproximadamente un espectro de amenaza uniforme de 475 años de periodo de retorno medio (PRM), el cual debe ser considerado como base de comparación para estudios de sitio. Adicionalmente, la normativa define un espectro que representa una amenaza uniforme de PRM = 975 años para propósitos de análisis basados en desempeño.

Se estima que los espectros propuestos corresponden a una definición razonable para fines de diseño general y adicionalmente permiten definir un set de requisitos normativos consistentes entre sí, en base a una definición moderna de la amenaza sísmica considerando metodologías de acuerdo con el estado del arte.

## 2 Evaluación de la Amenaza

En la estimación de la amenaza sísmica a nivel nacional, se evalúan métodos determinísticos y probabilísticos, a través de la consideración de definiciones recientes para la caracterización de la recurrencia y definición espacial de las fuentes [3], así como también, para la selección de los modelos de movimiento fuerte considerados (GMM) [4], [5]. El estudio considera a los eventos interplaca e intraplaca como generadores de amenaza, mientras que los eventos corticales, dada su singularidad y distribución no homogénea, no han sido consideradas en este estudio de tipo general.

El análisis considera la estimación de la amenaza sísmica en 39 sitios (Tabla 1), desde la Región de Arica y Parinacota en el norte de Chile hasta la Región de los Lagos en el sur. De acuerdo con la nueva clasificación de suelos definida en NCh2369:2023, se consideran 4 tipos de suelo de fundación para la evaluación de la amenaza (i.e., Suelos A, B, C y D). Los sitios se han definido de manera tal de contar en cada región con sitios ubicados en las distintas zonas sísmicas definidas por la normativa nacional actual (i.e., Zona Sísmica 1, 2 y 3).

Una vez realizadas las evaluaciones de la amenaza sísmica probabilística, la Fig. 1 muestra, para los distintos tipos de suelo considerados, los espectros de amenaza uniforme obtenidos para PRM de 475, 975 y 2475 años respectivamente en la Región Metropolitana (i.e., Zona Sísmica 2). Luego, considerando los espectros de amenaza uniforme definidos para los distintos sitios de interés, estos han sido agrupados de acuerdo con sus correspondientes tipos de suelo y zonas sísmicas para evaluar sus correspondientes distribuciones y variabilidad. La Fig.2. muestra los espectros obtenidos para PRM iguales 475 años en la Zona Sísmica 3.

Respecto de la evaluación de la amenaza sísmica determinística, se realizan evaluaciones basadas en eventos históricos y en base a modelos de desagregación de la amenaza probabilística.

Tabla 1 – Sitios Considerados

<b>Región</b>	<b>Zona sísmica</b>	<b>Sitio de interés</b>
Arica y Parinacota	1	Parinacota
	2	Putre
	3	Arica
Tarapacá	1	Colchane
	2	Pica
	3	Iquique
Antofagasta	1	Toconao
	2	Calama
	3	Antofagasta
Atacama	1	Parque Nacional Nevado de Tres Cruces
	2	El Salvador
	3	Huasco
Coquimbo	1	N.A
	2	Junta del Toro
	3	Salamanca
Valparaíso	1	N.A
	2	Los Andes
	3	Valparaíso
Metropolitana	1	Lo Valdés
	2	Santiago
	3	Alhué o San Pedro
O'Higgins	1	Termas del flaco
	2	Machalí
	3	Santa Cruz
Maule	1	Cerro Azul
	2	Curicó
	3	Talca
Bío Bío	1	Termas de Chillán
	2	Los Ángeles
	3	Concepción
Araucanía	1	Pucón
	2	Temuco
	3	Purén
Los Ríos	1	Rupameica
	2	Paillaco
	3	Valdivia
Los Lagos	1	Chaitén
	2	Osorno
	3	Fresia

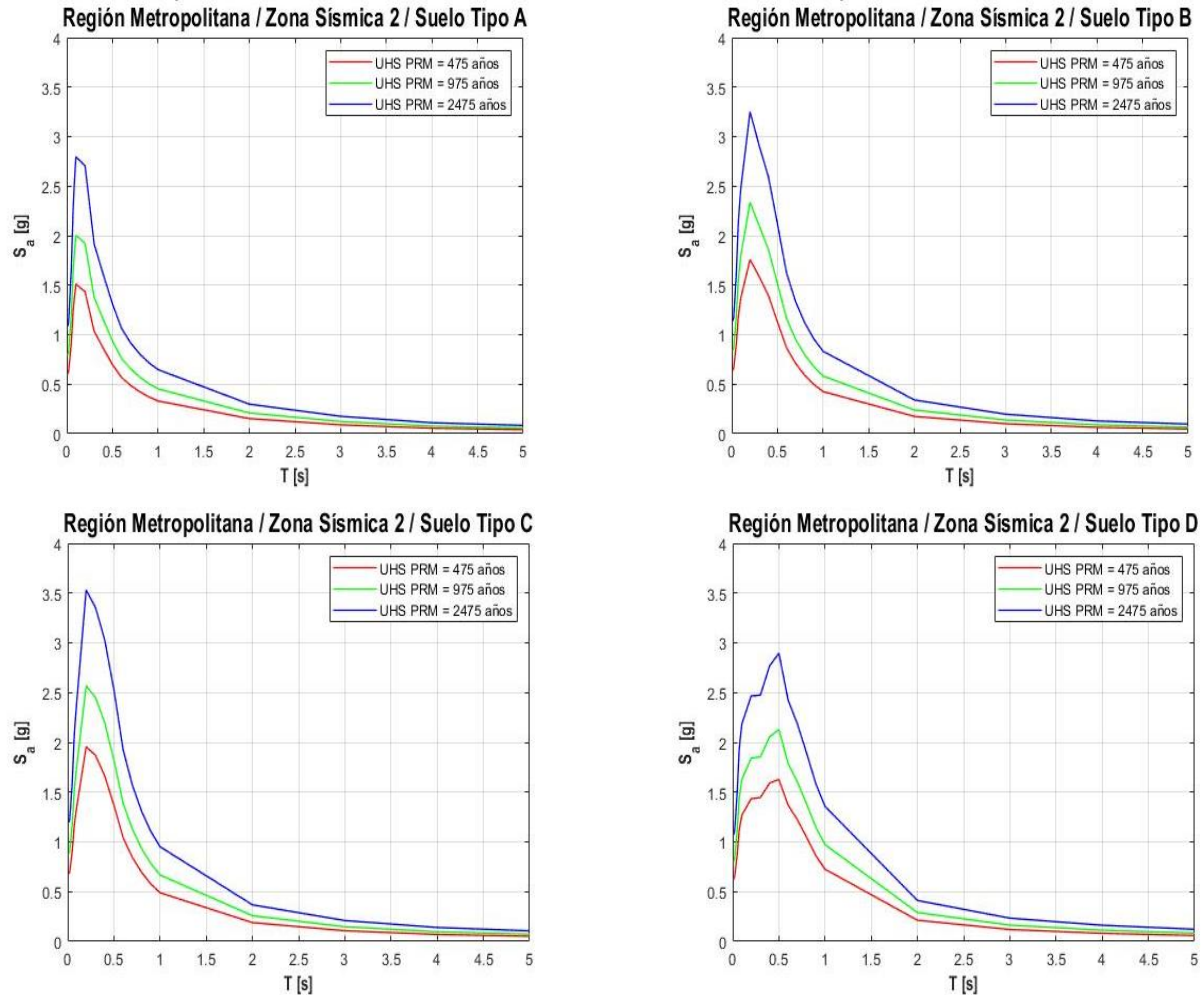


Fig. 1 – Espectros de Amenaza Uniforme, Región Metropolitana

Para propósitos de la evaluación de la demanda de diseño, se ha considerado intensidades con PRM iguales a 475 años, luego, se pudo observar que en ambos escenarios (i.e., definiciones en base eventos históricos y en base a modelos de desagregación) las definiciones acostumbradas o aceptadas para la definición de demandas de diseño en base a modelos determinísticos (i.e., percentil 84th divididos por un factor 1.5) fueron en general levemente superiores a las demandas obtenidas probabilísticamente para PRM de 475 años. Vale la pena mencionar, que espectros de respuesta obtenidos de manera determinística, en base a las magnitudes máximas declaradas en [3] para cada una de las fuentes, genera niveles de intensidad muy superiores a los obtenidos a través del enfoque probabilístico, así como también muy superiores a los considerados en la práctica de diseño estructural industrial, y por ende su uso, tal cual se establece en [6] para la definición de las demandas de diseño determinísticas no ha sido considerado en la definición de la demanda de diseño. Se destaca que tanto los análisis probabilísticos como los determinísticos han considerado arboles lógicos que asignan los mismos pesos a los distintos GMM considerados.

De acuerdo con los resultados indicados, se ha definido a la demanda sísmica de diseño, como los espectros medios obtenidos luego de los análisis probabilísticos para cada Zona Sísmica. La Fig. 3 muestra los espectros asociados al nivel de diseño obtenidos para cada zona sísmica.

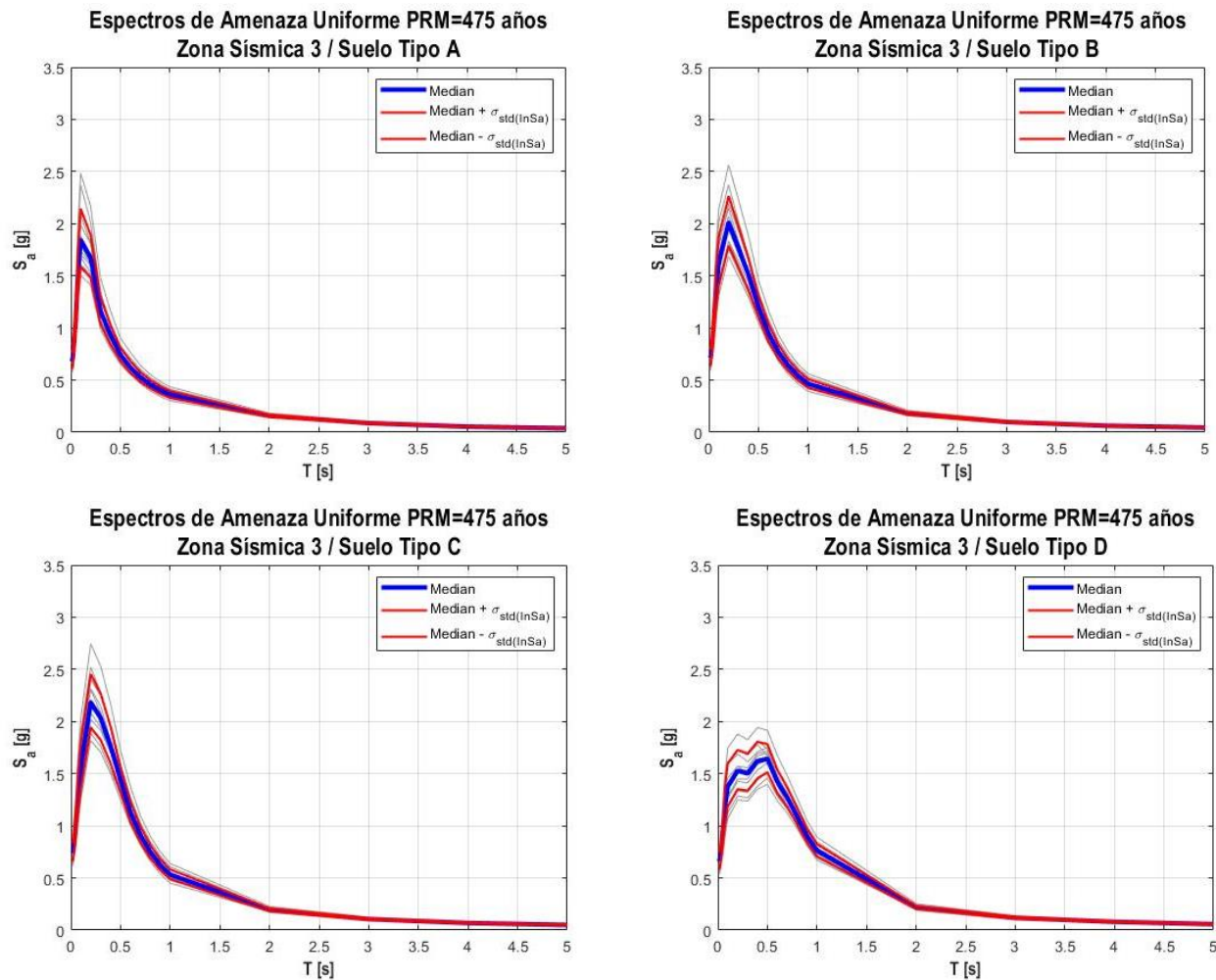


Fig. 2 – Espectros de Amenaza Uniforme PRM=475 años para Zona Sísmica 3.

### 3 Comparación con Espectros de Diseño Elásticos Normativos

Con el propósito de evaluar el nivel de intensidad obtenido en la evaluación general de la amenaza sísmica, así como también, para comparar con las definiciones de demanda elástica presentes en las normativas de diseño sísmico nacionales para Zona Sísmica 3, se presenta la Fig. 4. Se ha considerado la definición elástica de NCh2369.Of2003, una definición de la demanda elástica que modifica el coeficiente sísmico máximo de NCh2369.Of2003 (i.e., denominador  $(R+1)$  se modifica por  $R$ ), además de las definiciones elásticas de las normas NCh2745 [7] y NCh433 [8] con su correspondiente decreto supremo (DS61) [9]. Es necesario comentar que, para desarrollar una comparación consistente, tanto el espectro de diseño habitacional (NCh433) como el de diseño industrial han sido amplificados por un factor de mayoración igual a 1.4, reconociendo que ellos se definen como espectros de “servicio” y no de diseño último. Del análisis de la Fig. 4 es posible comentar lo siguiente:

- El límite de corte máximo de NCh2369.Of2003, no permite representar la demanda elástica esperada en zona de periodos mediano a cortos, estableciendo niveles de intensidad muy inferiores a los estimados en el presente estudio.

- Para las tres zonas sísmicas definidas en las normas nacionales y los suelos de uso industrial comunes (i.e., A, B y C) los espectros últimos de NCh433+DS61 representan razonablemente bien los niveles de demanda esperada en periodos intermedios y largos. La similitud entre los espectros de NCh433+DS61 y los espectros de demanda de diseño estimados es muy superior a las que se observa con los espectros elásticos definidos en NCh2745 y NCh2369.Of2003.
- Si bien el nivel de amplitud del espectro modificado de NCh2369.Of2003 presenta una amplitud equivalente a lo definido por NCh433+DS61, su definición con propósitos de diseño no permite cuantificar de buena manera los niveles de intensidad definidos para estructuras rígidas (i.e., el espectro para un periodo igual 0 segundos no es equivalente a una máxima aceleración o aceleración efectiva del suelo).
- En zonas de periodos cortos es posible apreciar que los espectros elásticos de diseño de los códigos nacionales son menores a los definidos en los espectros de amenaza, esto es particularmente importante en zonas controladas por terremotos intraplaca (las que difieren de la zonificación sísmica de los códigos chilenos).

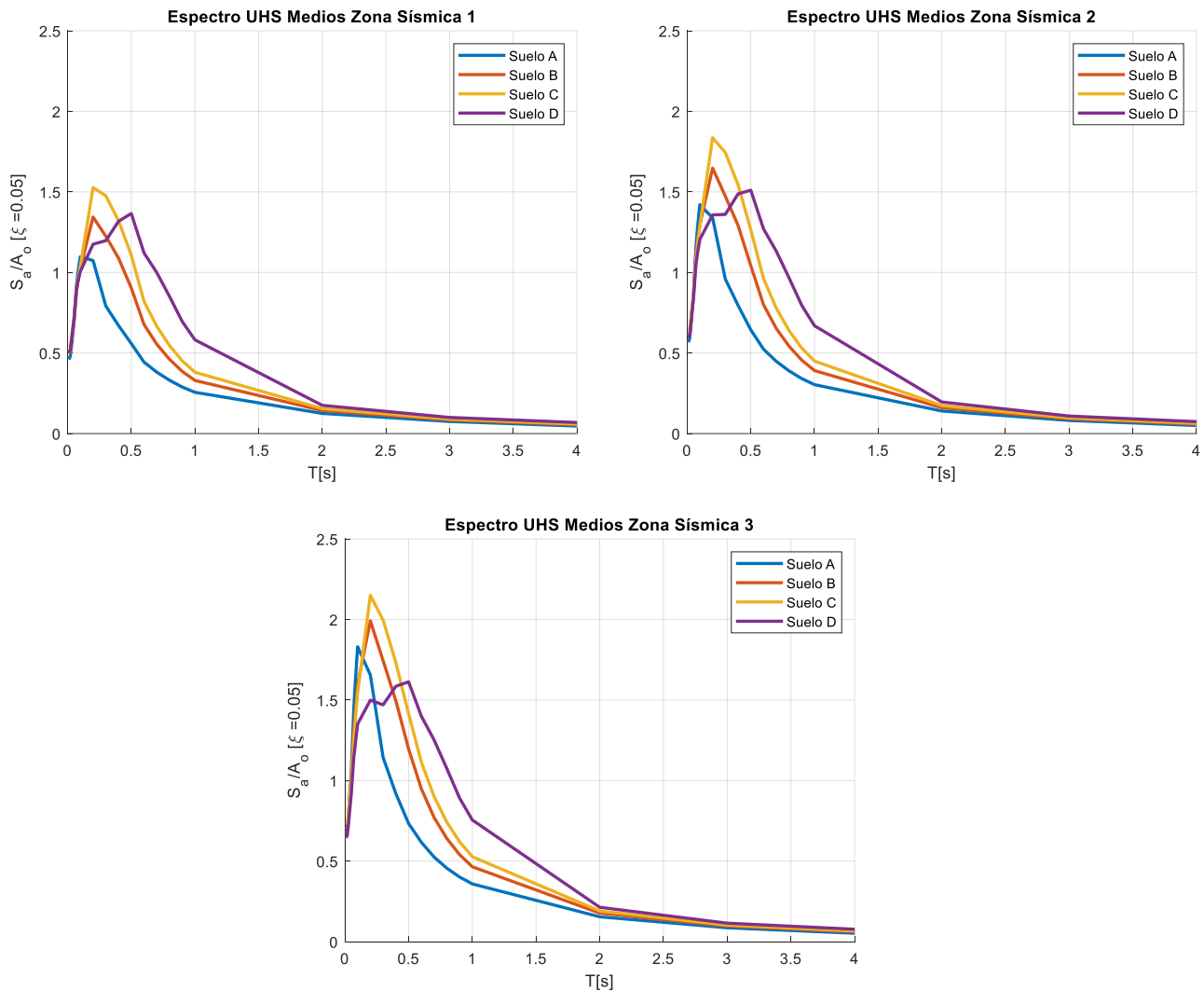


Fig. 3 – Espectros Nivel de Diseño para cada Zona Sísmica y Tipo de Suelo

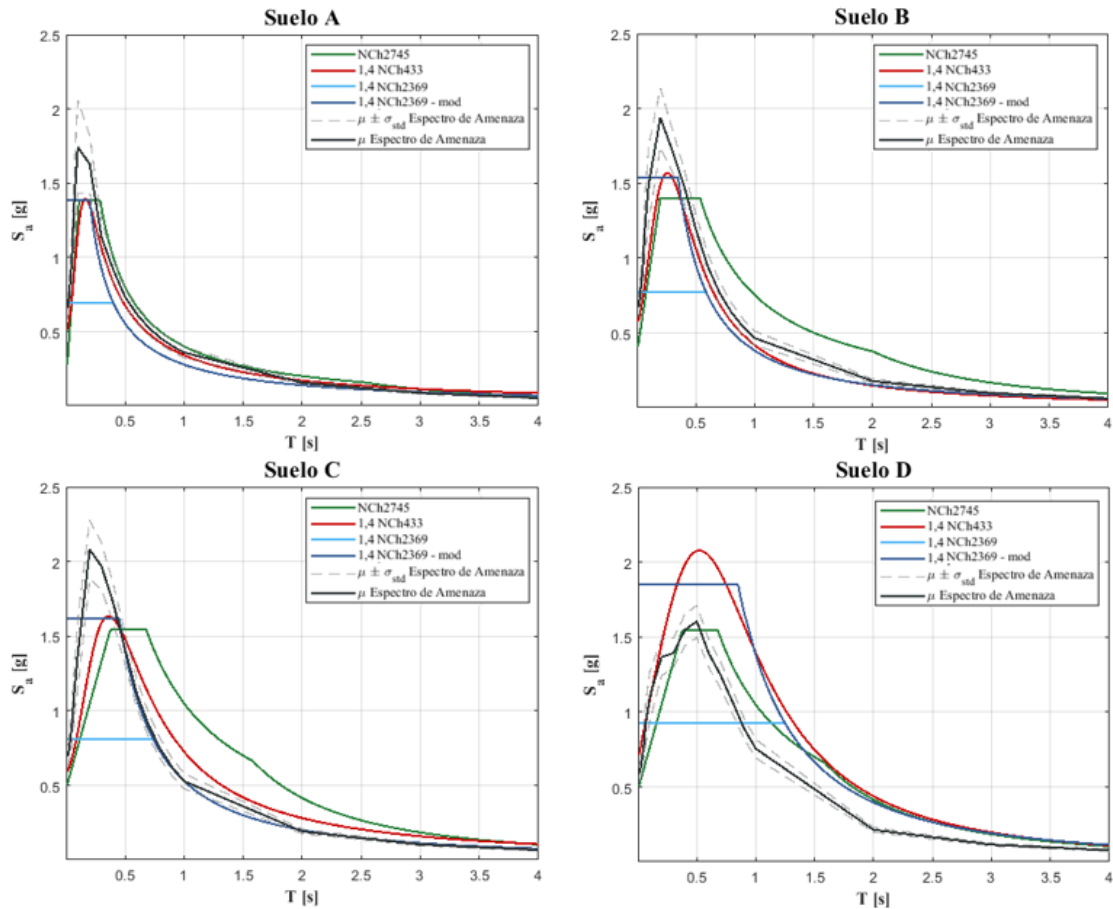


Fig. 4 – Comparación Espectros de Amenaza con Espectros Elásticos Normativos a Nivel último Zona Sísmica 3.

#### 4 Espectro de Referencia

En base a los antecedentes anteriores, y entendiéndose que corresponde a una definición general aproximada, el comité INN para la actualización de la norma NCh2369 decide adoptar al espectro de NCh433+DS61 amplificado por un 40% como el espectro de referencia de la NCh2369:2023. Se estima que dicho nivel de intensidad representa razonablemente bien una intensidad promedio con una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años (i.e., PRM=475 años).

A diferencia de la definición espectral definida en la norma sísmica NCh2369.Of2003, este espectro de referencia se estima adecuado para los siguientes propósitos:

- Base para la definición del espectro de diseño horizontal.
- Base para la definición del espectro de diseño vertical.
- Estimación de deformaciones elásticas.
- Espectro objetivo para la selección de registros sísmicos.

Finalmente, el espectro de referencia se define como:

$$S_{aH}(T_H) = 1.4SA_0 \left( \frac{1 + 4.5 \left( \frac{T_H}{T_0} \right)^p}{1 + \left( \frac{T_H}{T_0} \right)^3} \right) \quad (1)$$

Donde,

$A_0$  : Aceleración efectiva máxima (del suelo) definida en normativa según la zonificación sísmica.

$S, T_0, p$ : Parámetros relativos al tipo de suelo de fundación.

$T_H$  : Período de vibración del modo horizontal considerado.

La Fig. 5 muestra los espectros de referencia para cada tipo de suelo, normalizados a la aceleración efectiva máxima del suelo  $A_0$ .

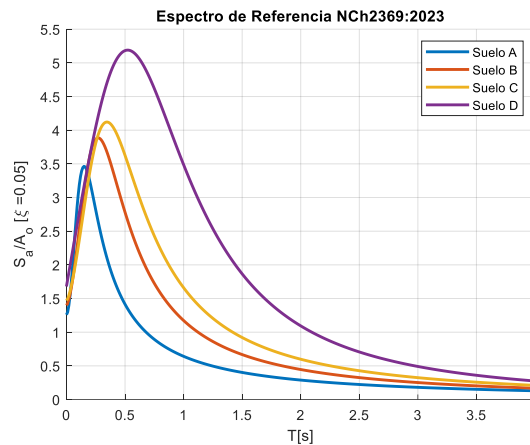


Fig. 5 – Espectros de Referencia NCh2369:2023.

Respecto del espectro de referencia vertical se han considerado los hallazgos de [10]. Esto es, modificar el espectro de referencia horizontal con dos ajustes. El primero, dice relación con reconocer que las máximas demandas espectrales verticales son aproximadamente 0.7 veces las demandas espectrales horizontales (a nivel medio). El segundo, es que la máxima respuesta espectral vertical, en promedio se desplaza hacia períodos más rígidos a razón de un factor igual a 1.7 el máximo espectral horizontal.

Luego, el espectro de referencia vertical queda dado por:

$$S_{aV}(T_V) = SA_0 \left( \frac{1 + 4.5 \left( 1.7 \frac{T_V}{T_0} \right)^p}{1 + \left( 1.7 \frac{T_V}{T_0} \right)^3} \right) \quad (1)$$

Donde,

$T_V$  : Período de vibración del modo vertical considerado.

## 5 Espectro de Diseño Horizontal y Vertical

Con el propósito de mantener la tradición y el estado de la práctica, tanto industrial como habitacional, la norma NCh2369:2023 define el espectro de diseño horizontal y vertical como espectros de “servicio” o espectros “ASD” (i.e., consistentes con una formulación por resistencias admisibles). Sin embargo, dada la definición más trazable y conforme al estado del arte, los espectros de diseño provienen del espectro de referencia antes indicado.



De acuerdo con lo anterior, los espectros de referencia son modificados por un factor igual a 0.7 (para llevarlo a nivel ASD), además de incorporar parámetros de diseño, como los son, el factor de modificación de respuesta R y la razón de amortiguamiento  $\xi$ .

Luego los espectros de diseño elástico horizontal y vertical se definen como:

$$S_a(T_H) = 0.7 \frac{IS_{aH}(T_H)}{R} \left( \frac{0.05}{\xi} \right)^{0.4} \tag{2}$$

$$S_a(T_V) = 0.7 \frac{IS_{aV}(T_V)}{R_V} \left( \frac{0.05}{\xi_V} \right)^{0.4} \tag{3}$$

Donde,

$R_V$  : Factor de modificación de la respuesta vertical igual a 2.0  
(salvo que se demuestre un valor distinto con métodos reconocidos)

$\xi_V$  : Razón de amortiguamiento crítico igual a 0.03  
(salvo que se demuestre un valor distinto con métodos reconocidos)

La Fig. 6 muestra los espectros elásticos de diseño vertical y horizontal para los distintos tipos de suelo, normalizados a la aceleración efectiva máxima del suelo  $A_0$ .

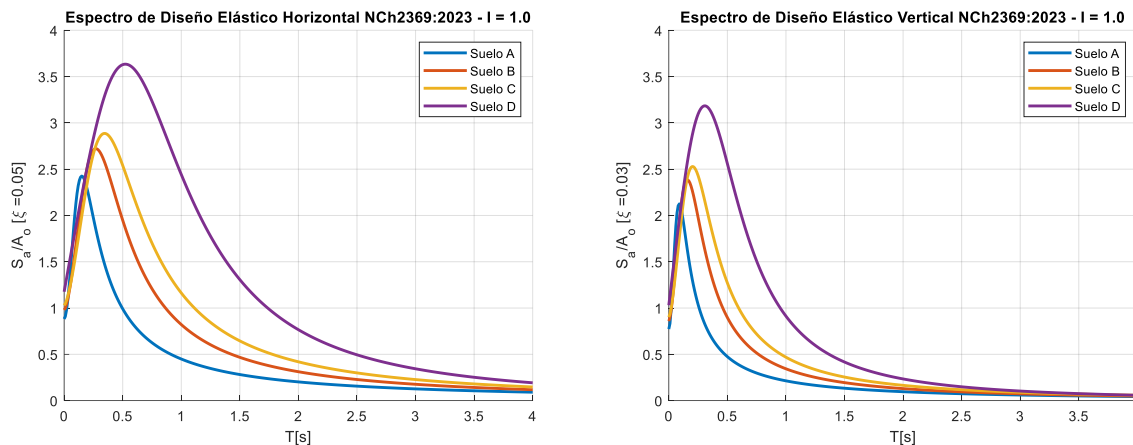


Fig. 6 – Espectros de Diseño Elásticos Horizontales (Izquierda) y Verticales (Derecha).

## 6 Relación Demandas Horizontales NCh2369:2023 versus NCh2369.Of2003

Ya definidas las demandas de diseño, la Fig. 7 presenta los espectros de diseño horizontal para factores de modificación de respuesta R=1, 3 y 5 (factores más usados en la práctica de diseño estructural industrial). En todos los casos se ha considerado una razón de amortiguamiento  $\xi = 0.05$ .

Luego, la Fig. 8 presenta la relación, para los distintos tipos de suelos, entre las demandas de diseño horizontal definidas por NCh2369:2023 y NCh2369.Of2003 para factores de modificación de respuesta R=1.0, 3.0 y 5.

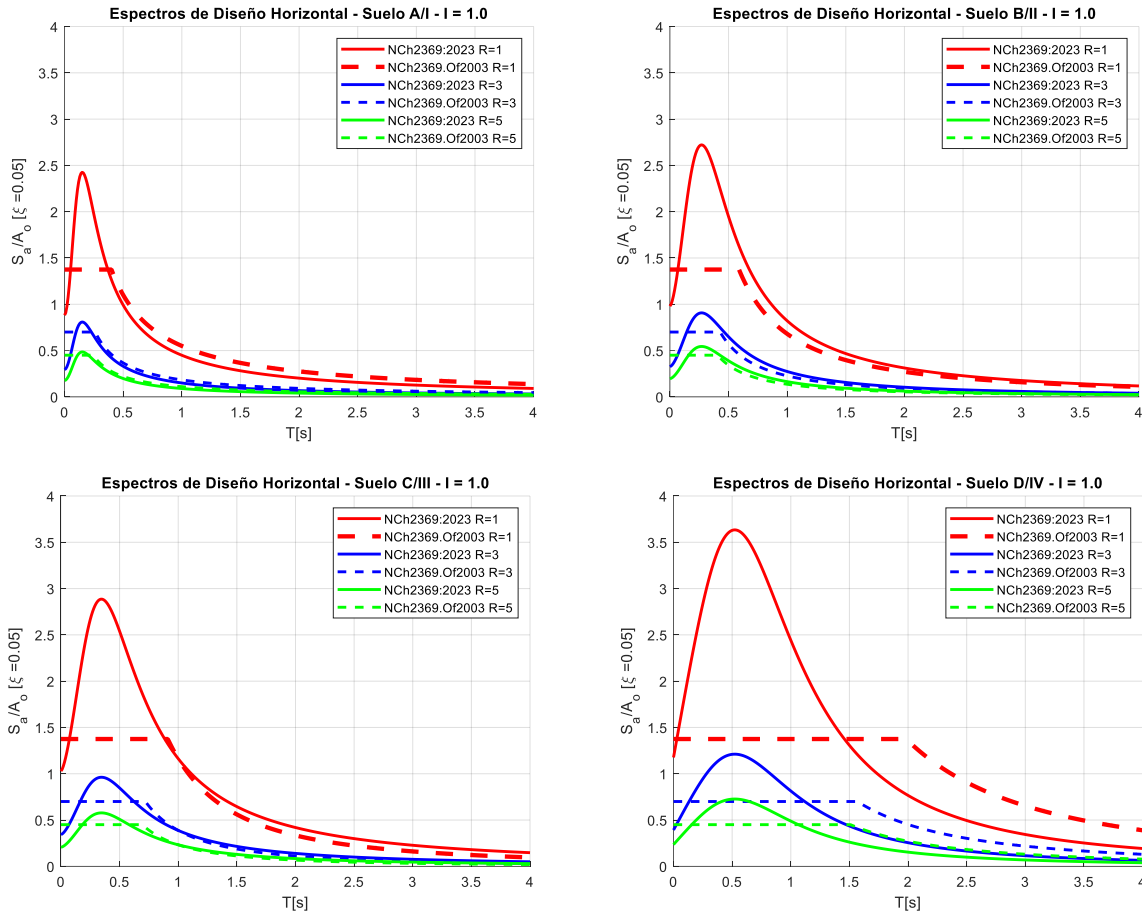


Fig. 7 – Espectros de Diseño Horizontales NCh2369:2023 y NCh2369.Of2003.

Es posible observar que en zonas de periodos cortos (menores a 0.20 seg. aproximadamente) la norma NCh2369:2023 presenta niveles de demanda menores a los definidos por su predecesor NCh2369.Of2003. Para evitar esta situación NCh2369:2023 ha definido coeficientes sísmicos mínimos de periodo corto, los que tiene por objetivo establecer niveles de corte basal similares a los mínimos considerados históricamente.

En presencia de rocas o suelos muy firmes (i.e., A/I y B/II) es posible observar que los niveles de demanda espectral de NCh2369:2023 son prácticamente equivalentes a los de definidos en NCh2369.Of2003, salvo en demandas elásticas ( $R=1$ ) para el diseño de estructuras rígidas ( $T_H$  menores a  $0.4 \sim 0.5$  segundos y mayores a  $0.1$  segundo aproximadamente) en donde se puede observar razones máximas entre 1.8 a 2.0 veces la demanda de NCh2369.Of2003.

En presencia de suelos densos (i.e., C/III) es posible observar que los niveles de demanda espectral de NCh2369:2023 son en promedio 30% más altos aproximadamente para factores de modificación de respuesta típicos (i.e.,  $R=3$  y  $R=5$ ). Estos valores aumentan, en estructuras rígidas, en la medida que se desea desarrollar una respuesta elástica para los niveles demanda de diseño.

En presencia de suelos medianamente densos (i.e., D/IV) es posible observar que los niveles de demanda espectral de NCh2369:2023 son mayores aproximadamente en un 30% en estructuras con periodos de vibración entre 0.25 y 1.0 segundo. Para estructuras más flexibles las demandas espectrales son menores en el contexto de la norma NCh2369:2023. Estas conclusiones son válidas para sistemas que consideren factores de modificación de respuesta típicos (i.e.,  $R=3$  y  $R=5$ ). Estos valores aumentan

mucho en presencia de sistema que se diseñan para responder de manera elástica frente a los niveles de intensidad de diseño.

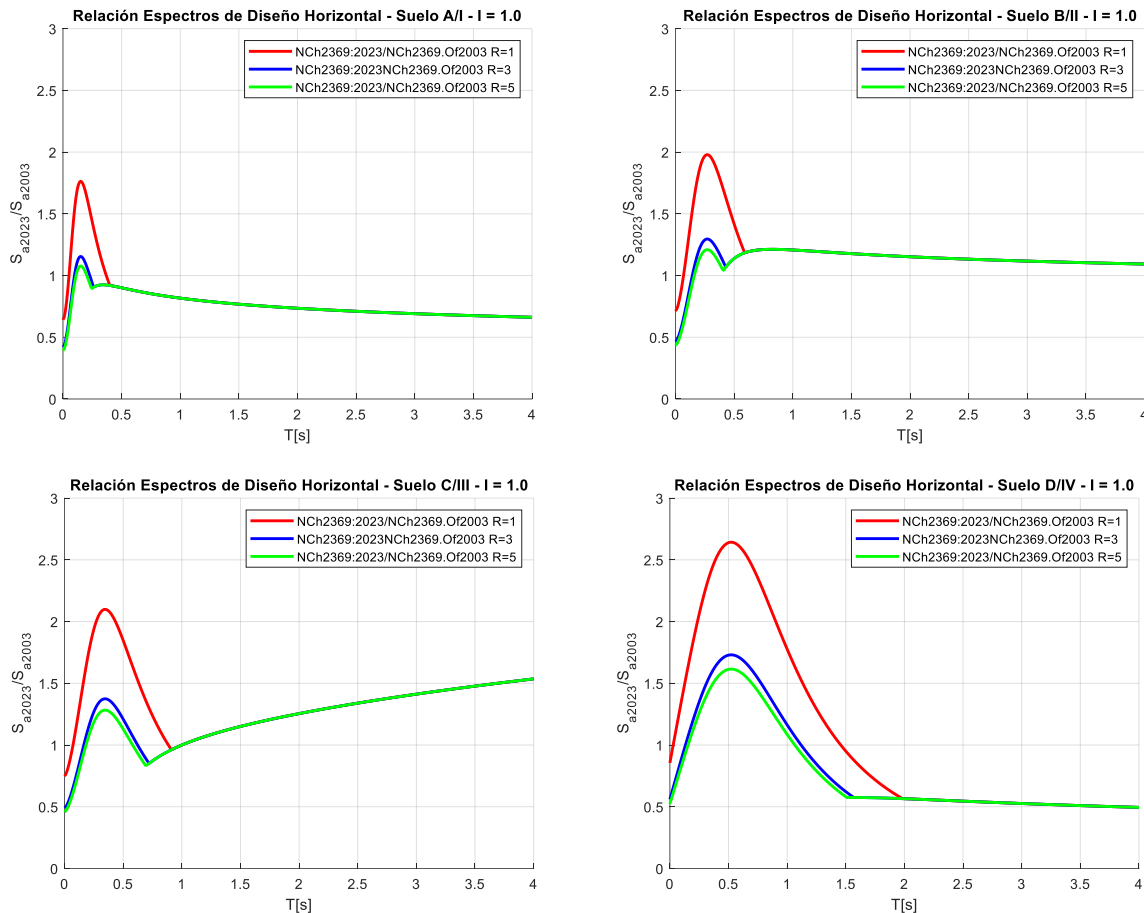


Fig. 8 – Relación Demandas Espectrales de Diseño Horizontales NCh2369:2023/NCh2369.Of2003.

## 7 Comentarios

Como resultado del estudio de la evaluación de la amenaza sísmica se logra observar:

- La demanda elástica de diseño definida en la normativa NCh2369.Of2003 presenta deficiencias para representar la amenaza sísmica nacional (subestimación importante). Esta diferencia se concentra particularmente en la zona de periodos cortos dado los coeficientes máximos definidos en dicha normativa.
- La distribución espacial de la amenaza sísmica uniforme difiere ostensiblemente de la zonificación propuesta en la normativa NCh2369 (tanto en su versión 2003 como la versión 2023).
- La sismicidad intraplaca genera una amenaza sísmica muy superior, en zona de periodos cortos, a la definida en la normativa nacional (particularmente en la franja central de la zona norte del país).
- Las demandas elásticas de NCh433-DS61 amplificadas en un 40% representan razonablemente, a nivel medio, demandas espectrales elásticas consistentes con niveles de intensidad con 10% de probabilidad de excedencia en 50 años.

Respecto de los espectros de diseño de NCh2369:2023:

- Representan de mejor manera los niveles medios de amenaza sísmica estimados para niveles de intensidad con 10% de probabilidad de excedencia en 50 años en el territorio nacional.
- Su formulación establece requisitos consistentes entre las demandas sísmicas horizontales y verticales, las demandas de desplazamiento y espectros objetivos para la selección de registros sísmicos.
- Los niveles de demanda sísmica elástica ( $R=1$ ), en estructuras semi-rígidas, son muy superiores a los definidos en la norma NCh2369.Of2003. Sin embargo, los niveles de demanda para propósitos de diseño estándar (i.e.,  $R=3$  y  $R=5$ ) establece niveles de demanda comparables, con aumentos razonables de acuerdo con la sismicidad registrada en los últimos grandes terremotos registrados en Chile.
- Si bien, se estima que las nuevas demandas son razonablemente adecuadas para representar demandas espectrales elásticas consistentes con niveles de intensidad con 10% de probabilidad de excedencia en 50 años desde una perspectiva general y estándar, se debe entender que estas definiciones se definen como mínimos razonables, y que en proyectos relevantes, o en sitios que presentan singularidades, es recomendable realizar estudios de amenaza sísmica que consideren de manera específica características locales del sitio (e.g., sismicidad intraplaca y cortical, formas espectrales en presencia de suelos muy blandos, efectos topográficos, etc.).

## 8 Referencias

- [1] INN, 2003. Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales, NCh2369. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.
- [2] INN, 2023. Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales, NCh2369. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.
- [3] Poulos, A., Monsalve, M., Zamora, N., de la Llera, J.C. (2019). "An Updated Recurrence Model for Chilean Subduction Seismicity and Statistical Validation of Its Poisson Nature." *Bulletin of the Seismological Society of America* 109 (1), 66-74.
- [4] Montalva, G.A., Bastías, N., Rodríguez-Marek, A. (2017). "Ground-motion prediction equation for the Chilean subduction zone." *Bulletin of the Seismological Society of America* 107 (2), 901-911.
- [5] Idini, B., Rojas, F., Ruiz, S., Pastén, C. (2017). "Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone." *Bulletin of Earthquake Engineering* 15 (5), 1853-1880.
- [6] ASCE. 2016. *Minimum design loads for buildings and other structures*. ASCE 7-16. Reston, VA: ASCE.
- [7] INN, 2013. Diseño Sísmico de Edificios con Aislación Sísmica, NCh2745. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.
- [8] INN, 2009. Diseño Sísmico de Edificios, NCh433 Mod. 2009. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.
- [9] MINVU, 2011. Aprueba Reglamento que fija el Diseño Sísmico de Edificios, Decreto Supremo 61. Ministerios de Vivienda y Urbanismo
- [10] RBA, 2017. Relación entre los espectros de respuesta horizontal y vertical de registros sísmicos chilenos y propuesta espectro sismo vertical de diseño.