UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

Estimación de factores de modificación del amortiguamiento en la norma NCh 433 Of. 1996 Mod. 2009 + DS61 2011 para el diseño sísmico de edificios

Memoria de Título presentada por

Astrid Estefanía Chirinos Laurente

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Cristian Emanuel Cruz Doggenweiler
Enero de 2024

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

Estimación de factores de modificación del amortiguamiento en la norma NCh 433 Of. 1996 Mod. 2009 + DS61 2011 para el diseño sísmico de edificios

AUTOR:

Astrid Estefanía Chirinos Laurente

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	Nombre	Firma
Prof. Guía	Cristian Cruz Doggenweiler	.....
Miembro 1 Comisión	Pablo Heresi Venegas	.....

Santiago, Chile, enero de 2024

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE MODIFICACIÓN DEL AMORTIGUAMIENTO EN LA NORMA NCH 433 OF. 1996 MOD. 2009 + DS61 2011 PARA EL DISEÑO SÍSMICO DE EDIFICIOS

Astrid, Cristian

Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

El propósito fundamental de este estudio consiste en proponer factores de modificación del amortiguamiento (DMF, por sus siglas en inglés) para ser implementados en la norma chilena NCh 433 Of. 1996 Mod. 2009 + DS61 2011 "Diseño sísmico de edificios". Este análisis se realiza mediante la aplicación de factores empíricos calculados a partir de una base de datos que incluye registros sísmicos provenientes de Chile. En cada escenario de diseño definida por la normativa NCh2745, se eligieron 100 conjuntos de registros sísmicos que fueran representativos a través de la forma espectral, y se calcularon los DMF mediante el método de Componente Aleatoria y RotD50. Se llevó a cabo una regresión no lineal multivariable sobre el total de los factores calculados, a partir de ello se propone una expresión para estimar los DMF en función del periodo y fracción de amortiguamiento para cada escenario de diseño, presentando la desviación estándar asociada a cada método y región de amortiguamiento. Se realiza una comparativa entre ambos métodos, donde no se encuentra una diferencia entre las medias para las regiones de análisis, cabe mencionar que pese a ello existen niveles de dispersión diferentes sin embargo la diferencia de esto último no es estadísticamente significativa. Por último, se realiza una comparativa de pseudo-espectros de aceleración para diferentes fracciones de amortiguamiento poniendo en evidencia que según el amortiguamiento la norma puede llevar a subestimar o sobreestimar demandas sísmicas.

Palabras claves: Factores de modificación del amortiguamiento, fracción de amortiguamiento, dispersión.

1 Introducción

La forma más común de especificar la demanda sísmica es mediante un espectro de pseudo-aceleración amortiguado al 5% (e.g., NCh 433 Of. 1996 Mod. 2009 + DS61 2011, ASCE 7-16). Sin embargo, ya sea por la incorporación de dispositivos de disipación de energía o características propias de la estructura, existen ocasiones en las cuales se requiere estimar ordenadas espectrales para fracciones de amortiguamiento distintas al 5%. Por ejemplo, Cruz y Miranda (2021) demostraron que la fracción de amortiguamiento del primer modo traslacional de edificios disminuye a medida que aumenta la altura de la estructura, concluyendo que edificios de más de 21 m de altura exhiben – en promedio – fracciones de amortiguamiento menores al 5%. En consecuencia, las ordenadas espectrales especificadas en la norma deberían ajustarse de acuerdo con la fracción de amortiguamiento esperada en la estructura mediante un factor de modificación del amortiguamiento.

Aún cuando en la literatura existen múltiples estudios sobre los factores de modificación del amortiguamiento, en sus inicios ninguno de los análisis se centraba en áreas con características similares a las de la subducción chilena. Por ejemplo, Newmark y Hall (1982) indicaron que los factores de modificación del amortiguamiento son dependientes del periodo de vibración de la estructura, planteando tres ecuaciones para regiones espectrales sensibles a la aceleración, velocidad y desplazamiento constantes. Debido a que el espectro de pseudo-aceleración ya no se aproxima bien al espectro de aceleraciones para amortiguamientos muy grandes Lin y Chang (2003) proponen factores de amortiguamiento de acuerdo a la fuente de amortiguamiento, ya que, si el amortiguamiento proviene de la respuesta histerética del edificio, la fuerza de diseño debe ser la fuerza de inercia, y los factores de reducción del amortiguamiento deben basarse en las respuestas de aceleración. En cambio, si el amortiguamiento adicional proviene de dispositivos de disipación de energía, la fuerza de diseño debería ser la fuerza de restauración, y los factores de reducción del amortiguamiento deberían derivarse de las respuestas de desplazamiento. Lin y Chang (2004) analizaron los efectos del periodo de vibración, relación de amortiguamiento y tipo de suelo en los factores de modificación del amortiguamiento. Sus resultados muestran que los factores derivados del espectro de respuesta de aceleración son más sensibles a las condiciones del sitio que aquellos derivados del espectro de respuesta de desplazamiento, dando cuenta que los efectos del sitio simplemente aumentan a medida que se eleva el nivel de coeficientes de amortiguamiento. Sin embargo, se pueden despreciar los efectos del tipo de suelo en los factores de modificación del amortiguamiento si es que se permiten errores de hasta el 10% en la estimación de la demanda sísmica.

Años más tarde, Rezaeian et al. (2021) ampliaron el horizonte a zonas subductivas. En su investigación, presentaron modelos globales de los factores de modificación del amortiguamiento para sismos interplaca e intraplaca, utilizando la base de registros sísmicos NGA-Subduction. Mostraron que los factores de modificación del amortiguamiento son influenciados por la forma espectral y duración del terremoto. Sin embargo, para el diseño sísmico es difícil estimar este último dato, por lo que se decide utilizar la magnitud y distancia a la fuente como variables predictoras que indirectamente toman en cuenta el efecto de la duración. Miranda et al. (2020) estudiaron el efecto de la forma espectral sobre los DMF, empleando una base de eventos sísmicos ocurridos en Chile. Concluyen que la forma espectral, a través de la métrica *SaRatio*, es mejor predictor para el DMF que la magnitud o duración del terremoto, en especial para estructuras altamente amortiguadas. Dávalos et al. (2022) examinaron los factores de modificación del amortiguamiento en estructuras construidas sobre suelos blandos, concluyendo que estos factores son muy sensibles a los cambios en el periodo de vibración del sistema, ocurriendo la mayor sensibilidad para periodos cercanos al periodo predominante del sitio. Proponen una serie de expresiones para calcular los factores de modificación del amortiguamiento, en función del periodo normalizado de vibración (razón entre el periodo de la estructura y el periodo natural del suelo) y la relación de amortiguamiento. Finalmente, Prado (2023) evaluó las fórmulas para estimar los factores de modificación del amortiguamiento sobre la norma NCh 2745 Of. 2013, concluyendo que la estimación de la demanda sísmica para todos los escenarios de la norma mejora significativamente con las expresiones propuestas.

En resumen, pese a que en la literatura existen investigaciones sobre los factores de modificación del amortiguamiento, no existen trabajos que apunten a estimar de mejor manera la demanda sísmica de la norma NCh 433. En consecuencia, el objetivo de esta investigación es estimar factores de modificación del amortiguamiento consistentes con los espectros de diseño de la norma NCh 433 Of. 1996 Mod. 2009 + DS61 2011 calculados empíricamente a partir de una base de registros sísmicos chilenos. Se proponen ecuaciones desarrolladas a partir de análisis estadísticos que permiten calcular el factor de modificación del amortiguamiento para un rango de valores de amortiguamiento que varían desde el 1% hasta el 30%. Además, se examina cómo la fracción de amortiguamiento, el período fundamental de la estructura y el tipo de suelo afectan al factor de modificación del amortiguamiento.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Estimar factores de modificación del amortiguamiento consistentes con los espectros de diseño de la norma NCh 433 Of. 1996 Mod. 2009 + DS61 2011.

2.2 Objetivos específicos

1. Obtener factores de modificación del amortiguamiento empíricos en base a registros sísmicos seleccionados de acuerdo con los escenarios de diseño de la norma NCh 433.
2. Proponer fórmulas que permitan estimar el factor de modificación del amortiguamiento, a partir del periodo, fracción de amortiguamiento objetivo, y tipo de suelo, para el contexto del diseño de la norma NCh 433.
3. Comparar la demanda sísmica dada por la normativa actual con la demanda ajustada por los factores de modificación resultantes.

3 Marco Teórico

3.1 Factores de modificación del amortiguamiento

Un sistema de un grado de libertad con amortiguamiento viscoso sometido a una aceleración de suelo $\ddot{u}_g$, tiene la siguiente ecuación de movimiento:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

Donde m, c y k corresponden a la masa, coeficiente de amortiguamiento y rigidez del sistema, respectivamente; $u(t), \dot{u}(t)\ y\ \ddot{u}(t)$ equivale al desplazamiento relativo, velocidad relativa y aceleración relativa del sistema, respectivamente; y t corresponde al tiempo.

El espectro de desplazamientos, S_d, se define como la respuesta máxima a un sistema de un grado de libertad.

$$S_d(T, \xi) = \max\left[u(T, \xi)\right] \quad (2)$$

El pseudoespectro de aceleraciones, PS_a, se define como:

$$PS_a(T, \xi) = \omega_n^2 \cdot S_d(T, \xi) \quad (3)$$

Donde ω_n es la frecuencia circular natural de vibración.

Un factor de modificación de amortiguamiento se establece como el cuociente entre el desplazamiento máximo alcanzado por un sistema de un grado de libertad (SDOF) de periodo T y coeficiente de amortiguamiento ξ, y el máximo desplazamiento para un sistema idéntico con el mismo periodo T, pero con un coeficiente de amortiguamiento $\xi = 5\%$, tal como se muestra en la Ecuación (4):

$$DMF(T,\xi) = \frac{S_d(T,\xi)}{S_d(T,\xi = 5\%)} \quad (4)$$

Por último, al combinar las Ecuaciones (3) y (4) se deriva una nueva expresión para los factores de modificación del amortiguamiento en función del pseudoespectro de aceleraciones:

$$DMF(T,\xi) = \frac{PS_a(T,\xi)}{PS_a(T,\xi = 5\%)} \quad (5)$$

4 Antecedentes

4.1 Norma NCh 433 Of. 1996 Mod. 2009 + DS61 2011

Esta normativa establece los requisitos mínimos que deben cumplirse para el diseño sísmico de edificios, además de proporcionar recomendaciones para evaluar los posibles daños causados por movimientos sísmicos. La norma divide el territorio nacional en tres zonas sísmicas, de acuerdo a su cercanía a bordes de placa, y define 6 tipos de suelo en función de su velocidad de propagación de ondas de corte. Posteriormente, se clasifican los edificios en función de su importancia, uso y riesgo de falla.

En cuanto a los escenarios de diseño de la norma, la investigación se centra en los edificios o estructuras destinadas a la habitación privada o al uso público. Si estos se ubican en tipos de suelo A, B, C o D –según DS61 2011– se deben diseñar considerando la demanda sísmica según los espectros de pseudo-aceleración (PS_a) amortiguados al 5% indicados en el acápite 6.3.5 de la norma. A modo de ejemplo, la Figura 1 muestra estos espectros para la zona sísmica 1.

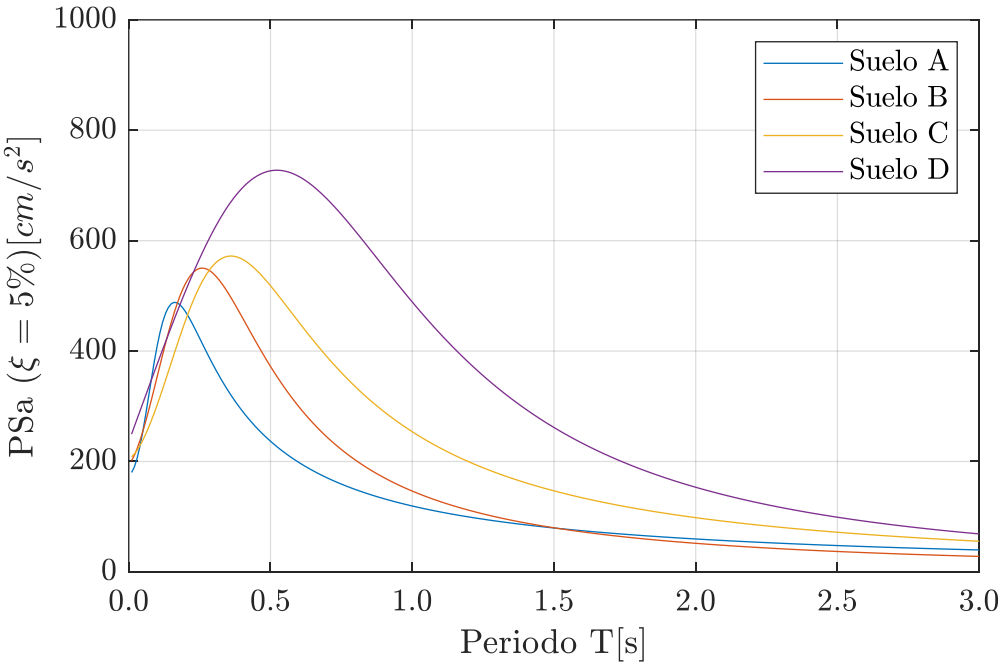


Figura 1: Espectros de diseño para 4 tipos de suelo a un amortiguamiento ξ=5%, zona sísmica 1, indicados por la norma NCh433 (MINVU,2011).

De manera empírica, Cruz y Miranda (2021) mostraron que los edificios en California presentan fracciones de amortiguamiento menores al 5% cuando su altura es superior a 21 metros. En consecuencia, si se desea tomar en cuenta estos resultados para el diseño sísmico de edificios Chilenos,

es necesario modificar la normativa incorporando espectros para distintas fracciones de amortiguamiento, o bien, mediante la incorporación de factores de modificación del amortiguamiento.

5 Metodología

En el presente estudio, se empleó la base de datos de registros sísmicos chilenos recopilada por Prado (2023), que integra información de dos conjuntos de datos proporcionados por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile y el Centro Sismológico Nacional. La investigación se centró en la evaluación de factores de modificación del amortiguamiento (DMF) mediante dos métodos de corrección de orientación. Se seleccionaron registros sísmicos y se calcularon los DMF para distintas fracciones de amortiguamiento y períodos, abarcando un amplio rango de condiciones sísmicas. Posteriormente, se compararon las medias de ambos métodos utilizando un análisis estadístico y se evaluaron las dispersiones asociadas a algunas fracciones de amortiguamiento. Además, se aplicó la forma funcional propuesta por Prado (2023), calibrando coeficientes y determinando desviaciones estándar por región de amortiguamiento. La comparación de regresiones y la presentación de una comparativa de demandas sísmicas para diversas fracciones de amortiguamiento se realizaron con el objetivo de proporcionar consideraciones útiles para la aplicación de estos métodos en el marco de la Norma NCh433.

5.1 Eliminación de Efectos de Orientación

En cada estación de monitoreo sísmico se registran las vibraciones en dos direcciones horizontales ortogonales, que no necesariamente coinciden con la dirección del terremoto. Se desea evitar que los posibles efectos debidos a la orientación del instrumento afecten a los factores de modificación del amortiguamiento calculados. Para lograr esto, se estudiaron dos opciones para obtener un único espectro de pseudo-aceleraciones para cada estación: (1) tomar una de las direcciones horizontales de manera aleatoria o bien; (2) rotar los registros y emplear RotD50 como medida de intensidad (Boore, 2010). RotD50 es una medida de intensidad que corresponde al percentil 50 (i.e., la mediana) de la ordenada espectral para un periodo dado, al rotar los registros en todas las direcciones posibles.

La Figura 2 muestra los espectros de pseudo-aceleración de cada componente horizontal del registro sísmico de la estación Chacalluta, del terremoto M_w 8.2 de Iquique 2014. La componente horizontal 1 corresponde a la componente Este-Oeste y la componente horizontal 2 corresponde a la componente Norte-Sur. La figura también muestra el espectro de RotD50 para esta estación. Se observa que el espectro de RotD50 se encuentra entremedio de los espectros obtenidos para los registros de las dos componentes horizontales.

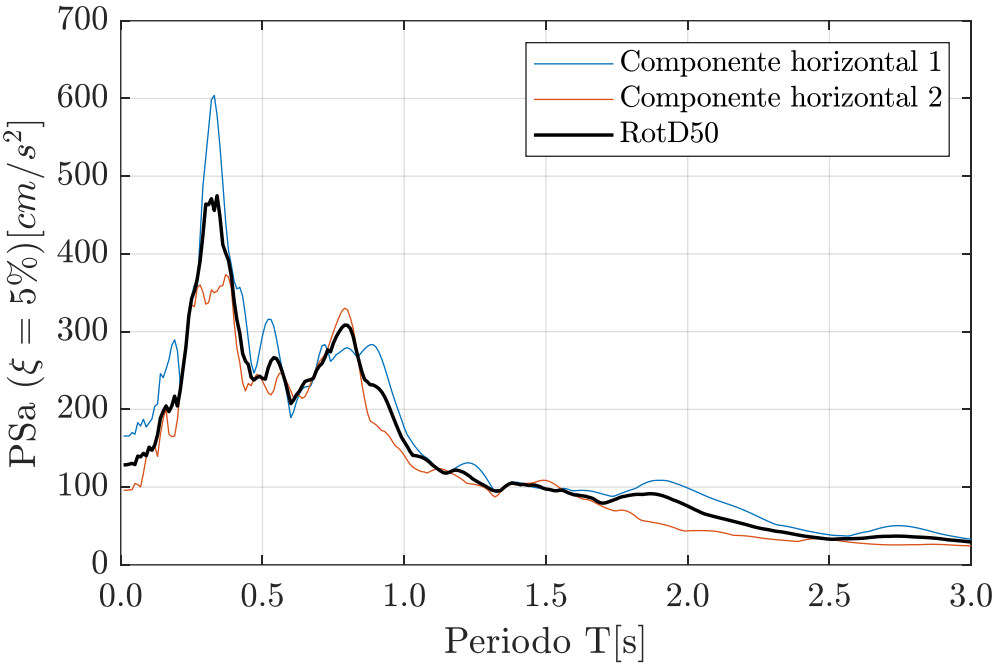


Figura 2: Espectro de pseudo-aceleración de las dos componentes horizontales ortogonales de la estación Chacalluta; terremoto M_w 8.2 de Iquique 2014; y RotD50.

5.2 Criterio de selección de registros

La selección de un conjunto de registros sísmicos va más allá de simplemente corregir los efectos de orientación del acelerómetro; se requiere un criterio adicional para identificar aquellos registros que sean verdaderamente representativos para la investigación en cuestión. El criterio se basó en la forma espectral, dado que, conforme a la investigación de Miranda et al. (2020), la influencia de la forma espectral resulta importante en el cálculo de los DMF. El objetivo es encontrar registros sísmicos cuyos espectros de respuesta sísmicas se asemejen lo mejor posible a los espectros de diseño de la norma NCh433 mostrados en la Figura 1.

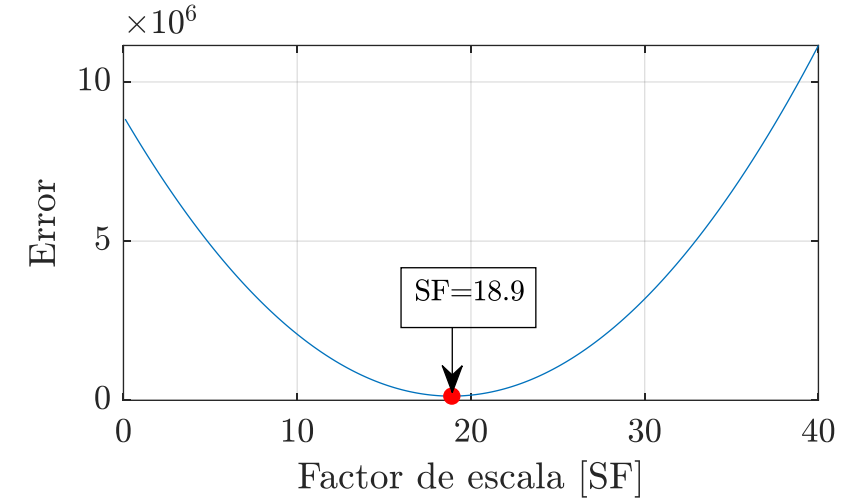
El proceso implica la determinación del espectro de pseudo-aceleración de un registro sísmico mediante la aplicación de uno de los métodos de corrección de efectos de orientación. Posteriormente, se busca minimizar las discrepancias con el espectro de diseño establecido por la normativa, utilizando factores de escala, designados como *SF*. Estos factores abarcan un intervalo comprendido entre 0.01 y 40, con incrementos de 0.01, con el fin de identificar el valor óptimo de *SF* que reduzca la magnitud de la siguiente expresión:

$$Error(SF) = \sum_{i=1}^{4000} [PS_a(i)_{Objetivo} - PS_a(i)_{Método\ seleccionado} \cdot SF]^2 \qquad (6)$$

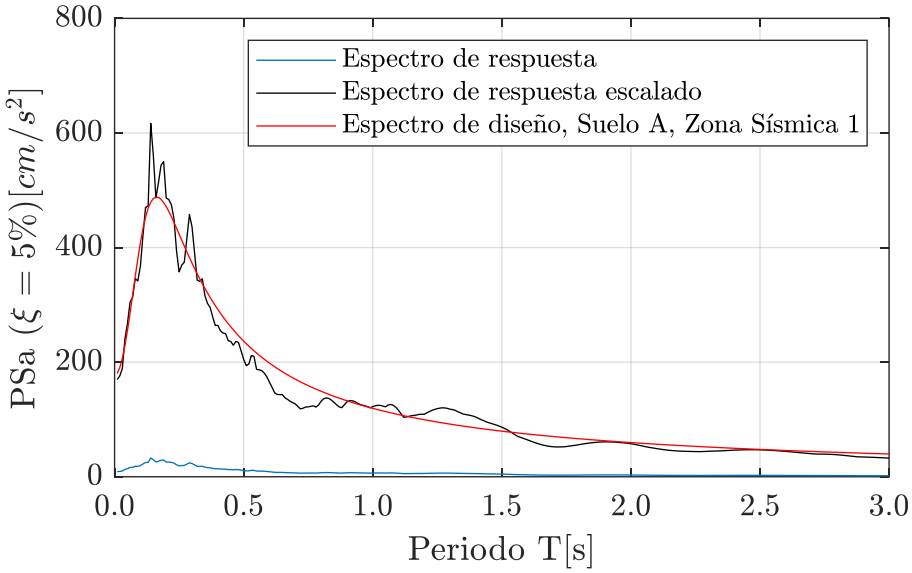
La Ecuación (6) se define como el error cuadrático entre el pseudo-espectro objetivo, es decir, el espectro de diseño de la norma, y el pseudo-espectro calculado a partir de la base de datos, considerando la aplicación de un factor de escala. Esta formulación establece una medida precisa de la discrepancia entre el espectro de referencia y el obtenido mediante la adaptación de los registros sísmicos, facilitando así la selección de un conjunto reducido de registros sísmicos.

En la Figura 3, se ilustra el empleo de la expresión en dos segmentos. Inicialmente, la Figura 3a presenta la variación de los valores de error al escalar un espectro derivado de un registro y compararlo con un espectro de la norma. Es relevante destacar que el marcador de punto rojo señala el punto de mínimo error, correspondiente al factor de escala óptimo para dicho registro. En la Figura 3b, se destaca la

similitud visual entre el espectro de un registro (escalado y no escalado) y el espectro de diseño del Suelo A (Zona Sísmica 1) según la norma NCh433. Este análisis gráfico permite identificar con claridad las similitudes y disparidades entre los espectros escalados y los espectros de la norma, proporcionando una representación visual precisa de la eficacia del ajuste.



(a)



(b)

Figura 3: Procedimiento para el ajuste de un registro al espectro de diseño de la norma. (a) Factor de escala óptimo; (b) Ajuste al espectro objetivo.

En la investigación de Prado (2023) se establece una cantidad de registros sísmicos ideal en función del coeficiente de variación en la cantidad de registros, determinando que el número óptimo de registros sísmicos a emplear es de 100 dada la robustez estadística y alta confiabilidad en los factores de modificación del amortiguamiento calculados para concluir. En consecuencia, en este trabajo también se emplean 100 registros.

El proceso mencionado se aplicó de manera uniforme a todos los registros incluidos en la base de datos, abordando cada escenario de diseño correspondiente a la Zona Sísmica 1. Como resultado de este análisis, se llevó a cabo la clasificación de los registros en función de su tipo de suelo, considerando el error asociado como criterio de categorización. Este enfoque permitió discernir y agrupar los registros

según su adaptabilidad a los distintos tipos de suelos presentes en la base de datos, proporcionando así una visión detallada y específica de las características de los registros sísmicos bajo diferentes condiciones de suelo.

5.3 Procedimiento

Una vez realizada la selección de los registros sísmicos, se calculan los factores de modificación del amortiguamiento (DMF) empíricos para ambos métodos de eliminación de efectos de orientación considerando valores de fracciones de amortiguamiento (ξ) en el rango de {1%, 2%, 3%, 4%, 7%, 10%, 15%, 20%, 25%, y 30%}, y evaluándolos para períodos que abarcan desde 0.01 hasta 3 segundos, con una partición de 0.01.

Posteriormente, se compararon las medias de ambos grupos utilizando una herramienta estadística conocida como test Anova, donde la hipótesis de que *los grupos son estadísticamente iguales* se acepta cuando los resultados del test superan el nivel de significancia del 5%. Además, se realiza un análisis de las dispersiones que existen para algunas fracciones de amortiguamientos.

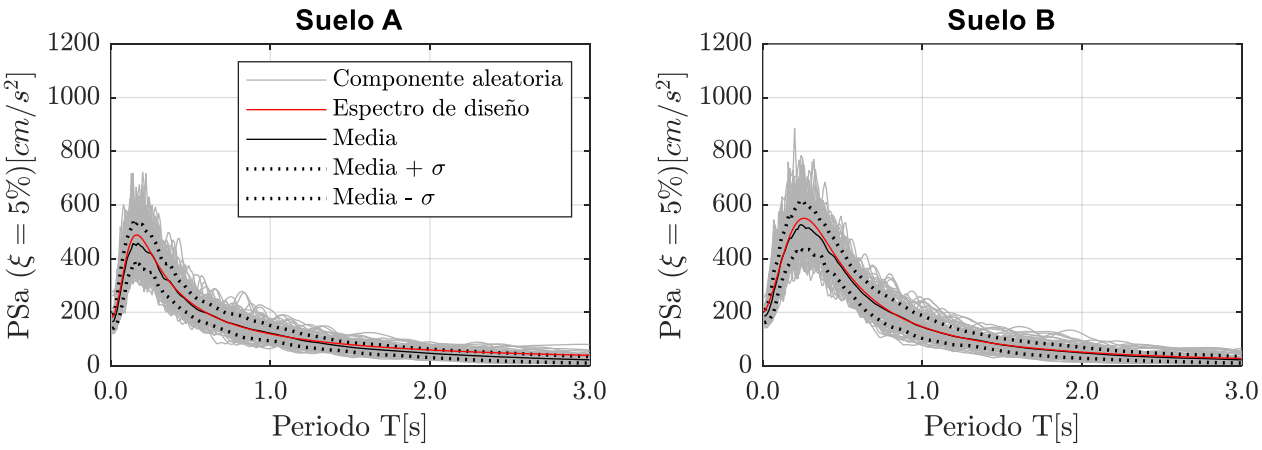
Luego, se aplicó una forma funcional propuesta por Prado (2023), en virtud de su semejanza con la investigación y su fundamento en el estudio de Lin y Chang (2004). Se calibraron los coeficientes de la Ecuación (7) para cada método de eliminación de efectos de orientación, y se determinaron las desviaciones estándar para cada región de amortiguamiento.

Con el propósito de establecer consideraciones al emplear cada método de eliminación de efectos de orientación, se procedió a comparar ambas regresiones. Finalmente, se procedió a ilustrar una comparativa de demandas sísmicas para diversas fracciones de amortiguamiento, con la intención de integrar eficazmente los resultados en el marco de la Norma NCh433.

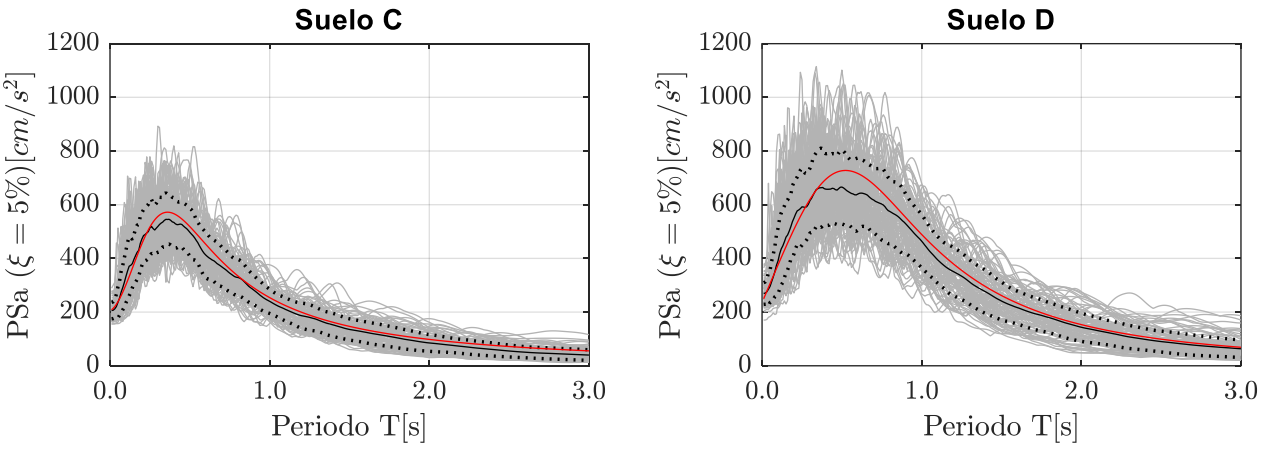
6 Resultados

6.1 Registros seleccionados

En la Figura 4 y Figura 5, se presentan los mejores 100 registros para cada tipo de suelo descrito en la norma NCh433 bajo el método de componente aleatoria y *RotD50*. Se aprecia que a medida que las condiciones del suelo empeoran, el grado de ajuste de la media de los datos al espectro objetivo se vuelve menos preciso, para ambos métodos. Esto se debe a que los espectros de la norma para suelos blandos no se adecuan a los espectros empíricos calculados a partir de la base de datos. Por ende, los mejores ajustes son para los suelos A y B.



(a) (b)



(c) (d)

Figura 4: Mejores 100 registros, para el método de componente aleatoria, que se ajustan al espectro objetivo de cada tipo de suelo para la zona sísmica 1, (a) Suelo A; (b) Suelo B; (c) Suelo C; (d) Suelo D.

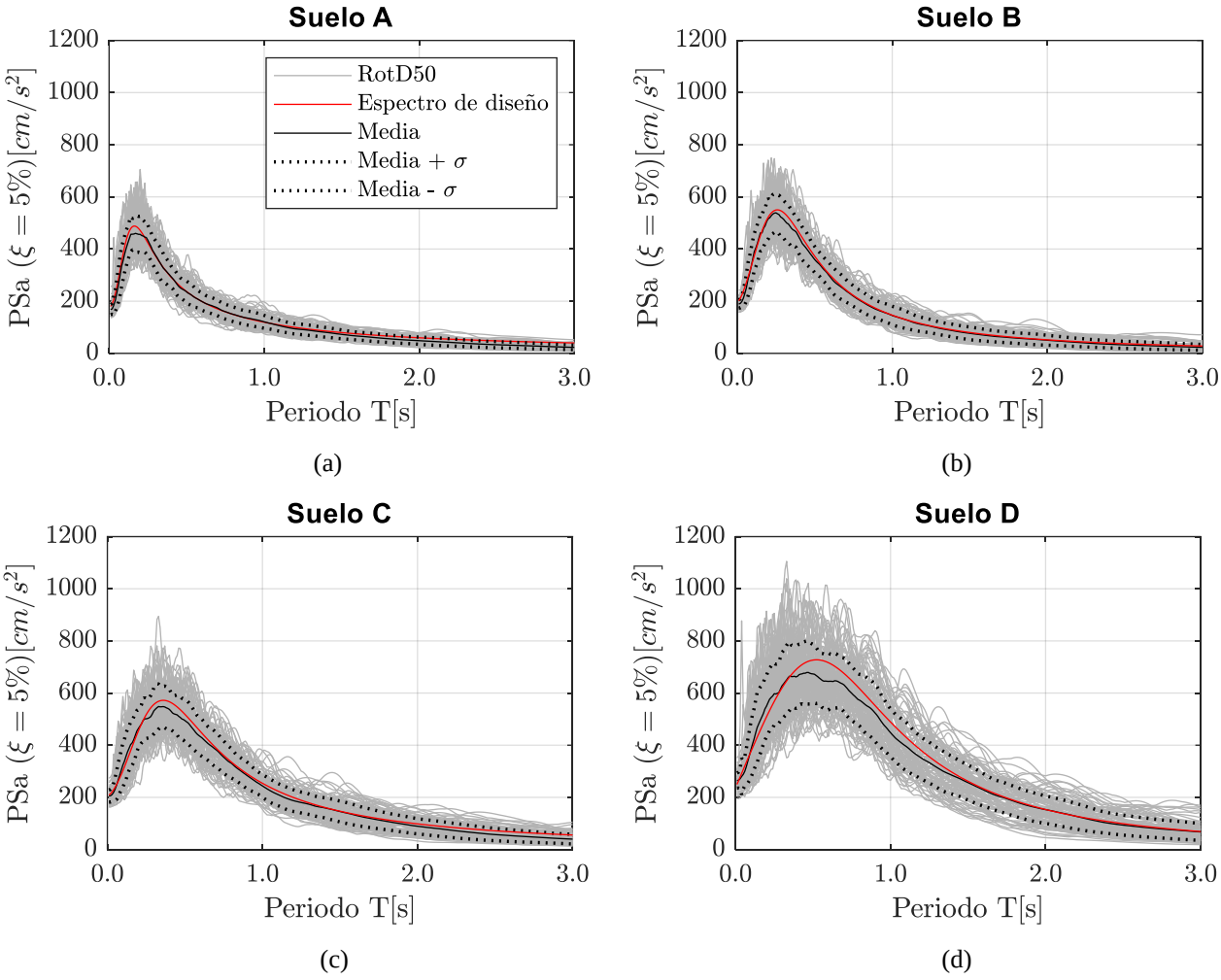


Figura 5: Mejores 100 registros, para el método de RotD50, que se ajustan al espectro objetivo de cada tipo de suelo para la zona sísmica 1, (a) Suelo A; (b) Suelo B; (c) Suelo C; (d) Suelo D.

6.2 Factores de modificación empíricos

Después de la selección de los 100 mejores registros para cada método de corrección por orientación, se procedió al cálculo de los factores de modificación del amortiguamiento. La Figura 6 presenta las medias de estos para todas las fracciones de amortiguamiento consideradas. Es evidente destacar que, para fracciones de amortiguamiento menores al 5%, se observa un aumento y el valor máximo del DMF durante el intervalo de 0 a 0.5 segundos, seguido de una disminución que se estabiliza posteriormente. Por otro lado, para fracciones de amortiguamiento mayores al 5%, se evidencia una disminución y el valor mínimo del DMF durante el mismo intervalo, seguido de un aumento que se estabiliza posteriormente. Es importante señalar que, para fracciones de amortiguamiento inferiores al 5%, se observa un aumento en el valor del DMF, mientras que, para amortiguamientos superiores al 5%, el valor del DMF disminuye. Además, se destaca que conforme la fracción de amortiguamiento tiende al 5%, los valores de DMF tienden a aproximarse a 1. Todo esto revela una relación clara entre la fracción de amortiguamiento, periodo y la variación en los valores de DMF.

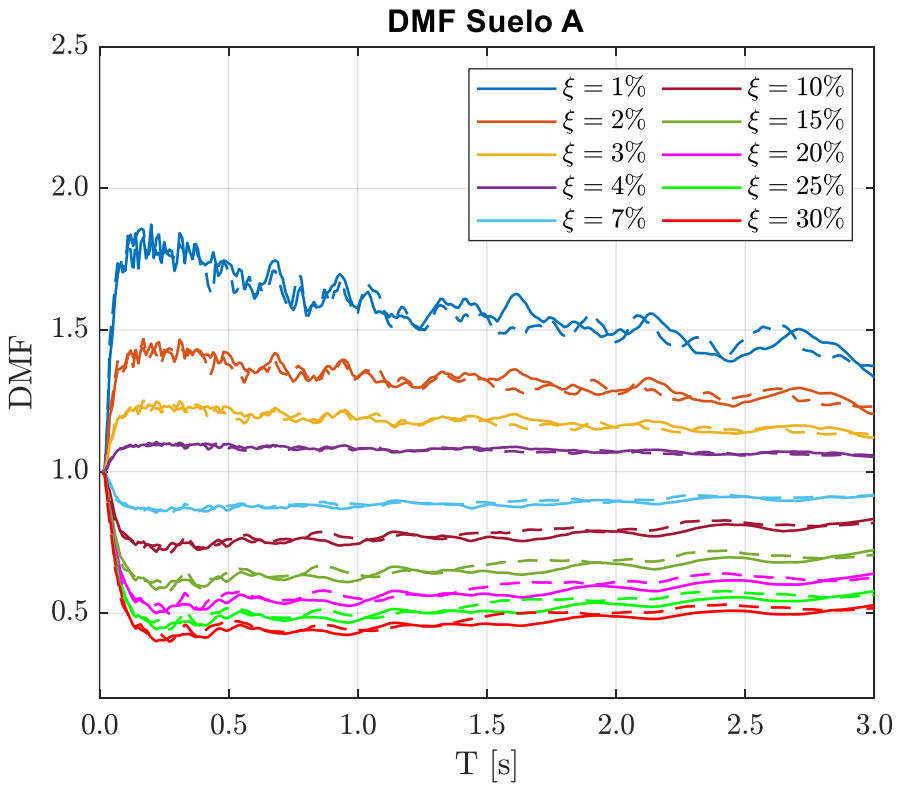
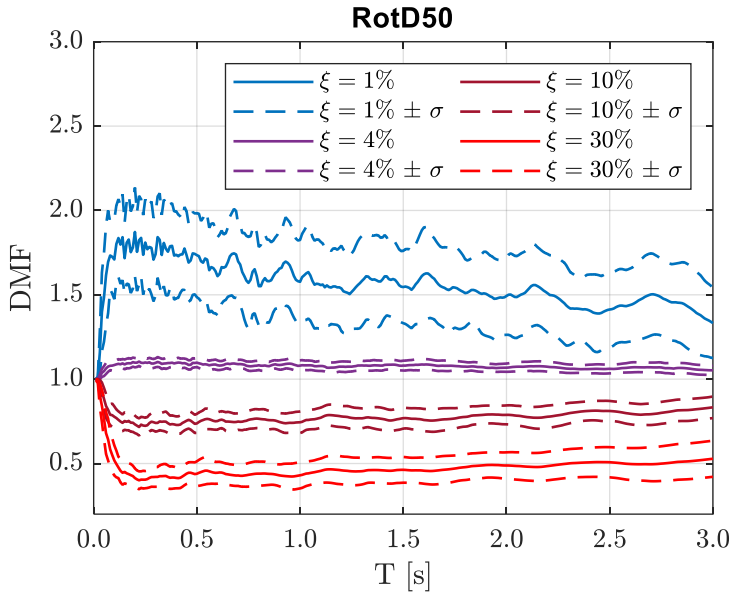


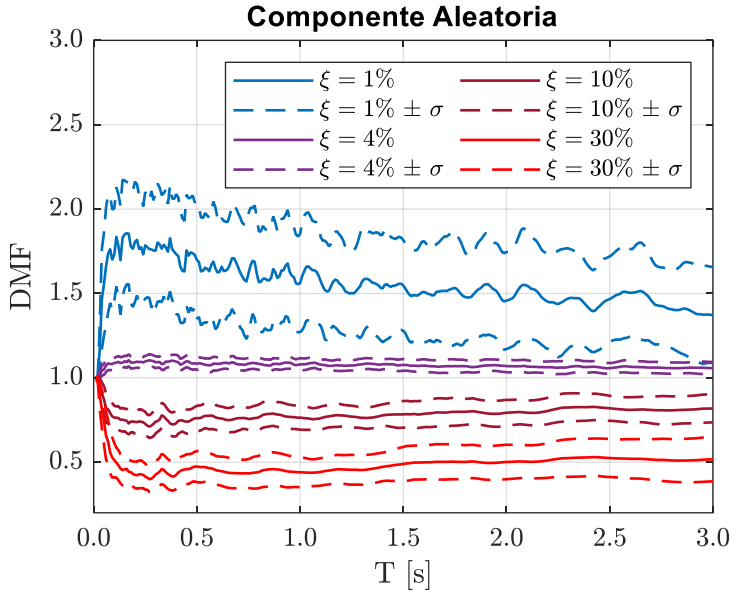
Figura 6: Valores medios de DMF en función del periodo para RotD50 y Componente aleatoria establecido en líneas continuas y discontinuas, respectivamente.

La Figura 7 muestra las medias y sus respectivas desviaciones estándar de los DMF obtenidos para fracciones de amortiguamiento del 1%, 4%, 10%, y 30%, para proporcionar información sobre la dispersión y la variabilidad de los DMF dependiendo su fracción de amortiguamiento.

En el contexto de fracciones de amortiguamiento menores al 5%, se evidencia una mayor dispersión y magnitud en los valores del DMF. Un ejemplo destacado de esta variabilidad se observa en los DMF con ξ =1%. Este comportamiento puede atribuirse a la naturaleza irregular del espectro cuando la fracción de amortiguamiento es más baja, lo que conduce a una mayor dispersión en los valores del DMF y pese a que no se muestren por temas de espacio los otros suelos, el comportamiento de la dispersión es similar para los cuatro tipos de suelos. Contrastando esta observación, a medida que la fracción de amortiguamiento se aproxima al 5%, la dispersión tiende a cero. Este fenómeno sugiere que niveles más altos de amortiguamiento están asociados con una mayor regularidad en los espectros y, por ende, con una menor variabilidad en los valores del DMF. En cambio, en fracciones de amortiguamiento superiores al 5%, a pesar de que puedan presentar cierta dispersión, esta nunca alcanzará los niveles observados en casos con ξ =1%. Este patrón se debe a que un mayor nivel de amortiguamiento contribuye a la estabilización de los espectros, resultando en una menor variabilidad en los valores del DMF en comparación con fracciones de amortiguamiento más bajas. Por último, se observa que de acuerdo a los métodos de corrección de efectos de orientación, en términos generales componente aleatoria presenta una mayor dispersión en comparación a RotD50.



(a)



(b)

Figura 7: Media y desviación estándar de los factores de modificación del amortiguamiento empíricos obtenidos para suelo A y zona sísmica 1. (a) RotD50 (b) Componente Aleatoria.

Posteriormente, se aplica un test Anova, para determinar si las medias de los DMF hallados por componente aleatoria y RotD50 son distintas estadísticamente. Se llevó a cabo un análisis en los intervalos de periodos que van desde 0.5 hasta 3, con incrementos de 0.5. Esta selección abarcó todo el dominio de periodos y se focalizó especialmente en las fracciones de amortiguamiento más alejadas del 5%, ya que estos suelen exhibir una mayor dispersión.

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 1, se puede concluir que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre ambos métodos. Esta conclusión sugiere que las personas tienen la libertad de optar por el método que prefieran, ya que, desde una perspectiva estadística, no hay evidencia de disparidades significativas en los resultados obtenidos.

Tabla 1: Resultados del Test Anova aplicado a $\xi = 1\%$ y $\xi = 30\%$.

Periodo [s]	ξ = 1%	ξ = 30%
0.5	0.5586	0.6506
1.0	0.7009	0.9581
1.5	0.7013	0.1871
2.0	0.6840	0.1023
2.5	0.7723	0.2197
3.0	0.2966	0.5834

6.3 Regresión multivariable

En el proceso de desarrollar una ecuación predictora para los factores de modificación del amortiguamiento empíricos, resulta imperativo identificar las variables que inciden en estos factores y llevar a cabo la selección adecuada de regresores. Este proceso se fundamenta en una revisión de la literatura, incorporando así investigaciones previas.

Diversos estudios muestran que el periodo de vibración T y la fracción de amortiguamiento ξ son factores altamente correlacionados con el DMF (e.g. Lin y Chang 2003, 2004; Rezaeian et al. 2021), por lo que se consideraron como regresores para la ecuación predictora. Si bien Miranda et al. 2020 mostraron que la forma espectral de los registros es el factor que mejor se correlaciona con el DMF, en este trabajo no se consideró un regresor basado en la forma espectral debido a que ésta ya que se encuentra incorporada de forma implícita en el criterio de selección de registros.

Un aspecto adicional que influye en los DMF es el periodo predominante del sitio en los suelos blandos (Dávalos et al. 2022), no obstante, en esta investigación, se omite la consideración de los suelos tipo E y F. En virtud de estas consideraciones, se decide que los únicos regresores son el periodo de vibración (T) y la fracción de amortiguamiento (ξ) como los elementos fundamentales para la propuesta de ecuación predictora de los DMF según el tipo de suelo.

Asimismo, se aborda la determinación de la forma funcional óptima que mejor se ajuste a los datos. Este proceso de selección se respalda en una investigación reciente similar aplicada a la norma NCh2745 Of. 2013, considerando el método de componente aleatoria y RotD50.

Como complemento esencial, se realiza un análisis detallado de las dispersiones asociadas a cada fracción de amortiguamiento para ambos métodos. Esta evaluación proporciona una comprensión más profunda de las variabilidades presentes en los datos, contribuyendo a la solidez y validez de la propuesta de ecuación predictora.

6.3.1 RotD50

Como forma funcional a utilizar en las regresiones se escogió la propuesta por Prado (2023), dado que también busca plantear una ecuación para una norma chilena, en su caso para la norma NCh 2745 Of. 2013. La expresión propuesta se indica en la Ecuación (7), donde *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f* y *g* son los coeficientes de la regresión, ξ y T son la fracción de amortiguamiento y el periodo de vibración del sistema respectivamente.

$$DMF = 1 + (a - b \cdot \frac{\xi^c}{(\xi + 0.05)^d}) \cdot \frac{T^e}{(T + f)^g} \quad (7)$$

En la Tabla 2, se presentan los coeficientes de determinación, denotados como R^2, enfocada en la regresión aplicada a fracciones de amortiguamiento por encima y por debajo del 5%. Donde se puede notar que la forma funcional se ajusta de mejor manera en la región de amortiguamiento mayor al 5% ya que existe menor dispersión.

En la Tabla 3, se encuentran registrados los resultados de la regresión aplicada a los coeficientes de determinación de la Ecuación (7). En la Tabla 4 se indican los valores de dispersión para los distintos tramos de las fracciones de amortiguamiento y para los diferentes escenarios de diseño de la norma, reafirmando lo dicho anteriormente.

Tabla 2: Coeficientes de determinación, R^2, resultantes de las regresiones aplicadas a dos formas funcionales para los 100 mejores DMF, correspondientes a cada tipo de suelo.

Tipo de suelo	Fracciones de amortiguamiento	Propuesta
A	ξ < 5%	0.67
	ξ > 5%	0.82
B	ξ < 5%	0.63
	ξ > 5%	0.76
C	ξ < 5%	0.64
	ξ > 5%	0.78
D	ξ < 5%	0.67
	ξ > 5%	0.80

Tabla 3: Coeficientes que varían en función del tipo de suelo y la fracción de amortiguamiento, para los 100 mejores DMF, de acuerdo a la Ecuación (7).

Tipo de suelo	Fracciones de amortiguamiento	a	b	c	d	e	f	g
A	ξ < 5%	2.0910	2.6997	0.3465	0.3391	15.6640	0.0052	16.0224
	ξ > 5%	1.0921	2.0463	0.5830	0.4870	23.5890	0.0034	23.7935
B	ξ < 5%	2.6795	3.5610	0.2301	0.1760	11.3221	0.0093	11.7196
	ξ > 5%	1.7331	2.6976	0.3692	0.2878	18.3973	0.0065	18.6889
C	ξ < 5%	2.4704	3.2666	0.2835	0.2472	8.7655	0.0163	9.1860
	ξ > 5%	1.4323	2.5505	0.5036	0.4051	4.3201	0.0485	4.6925
D	ξ < 5%	2.3343	2.9852	0.3641	0.3662	6.6617	0.0274	7.1165
	ξ > 5%	1.2795	2.8609	0.8277	0.7309	1.6305	0.2708	2.2475

Tabla 4: Desviación estándar obtenida para distintas regiones de amortiguamiento.

Tipo de suelo	Fracciones de amortiguamiento	σ
A	ξ < 5%	0.09
	ξ > 5%	0.06
B	ξ < 5%	0.09
	ξ > 5%	0.06
C	ξ < 5%	0.09
	ξ > 5%	0.06
D	ξ < 5%	0.09
	ξ > 5%	0.06

Dado el amplio conjunto de datos disponibles para cada fracción de amortiguamiento, en la Figura 8**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se exhiben segmentos específicos del modelo, junto con su correspondiente dispersión, aplicados al Suelo A y condicionados a niveles de

amortiguamiento. Es importante destacar que, debido a restricciones de espacio, los resultados se muestran únicamente para el Suelo A en esta ocasión. Sin embargo, es relevante mencionar que se obtienen resultados similares al aplicar el modelo a los valores de DMF obtenidos a partir de los registros seleccionados para los Suelos B, C y D.

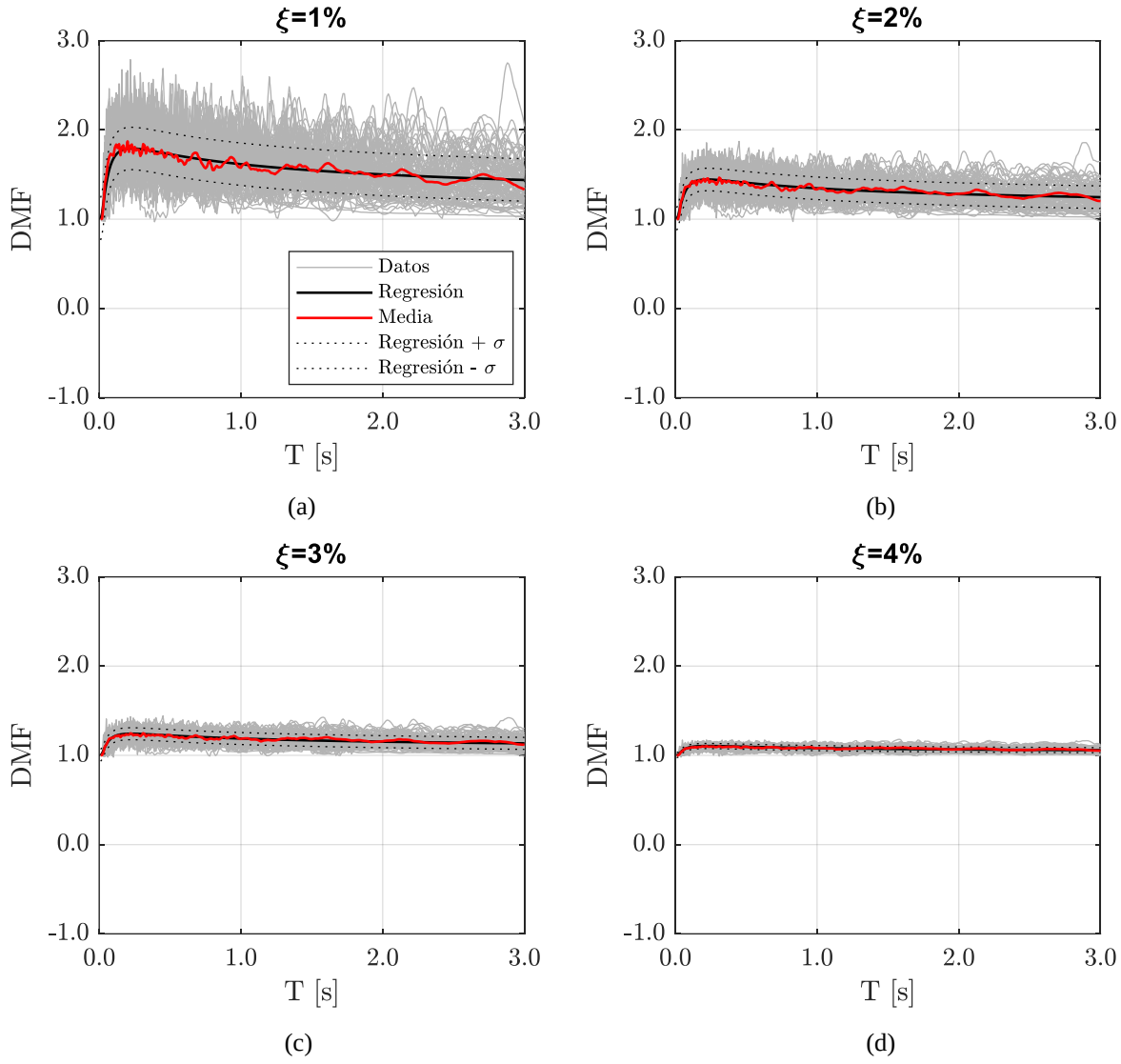
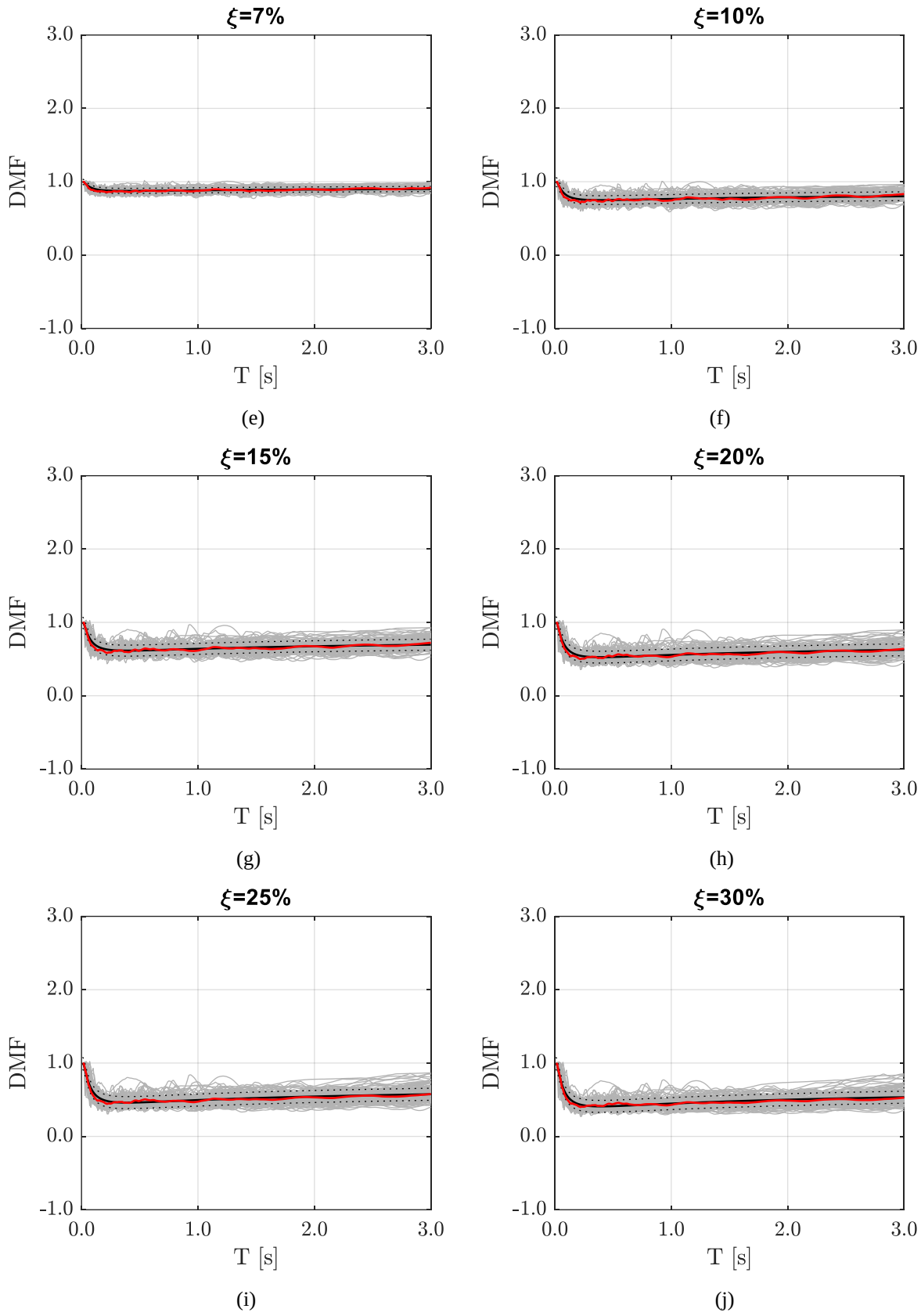


Figura 8: DMF calculados, media y estimador, en función del periodo, empleando RotD50 (a) ξ=1%; (b) ξ=2%; (c) ξ=3%; (d) ξ=4%.



(e) (f) (g) (h) (i) (j)

Figura 8 (continuación): DMF calculados, media y estimador, en función del periodo, empleando RotD50 (e) ξ=7%; (f) ξ=10%; (g) ξ=15%; (h) ξ=20%; (i) ξ=25%; (j) ξ=30%.

En base a la Figura 8 se observa que la regresión se ajusta de buena manera en todas las fracciones de amortiguamiento estudiadas independiente el periodo. Por otro lado, respecto a la dispersión, se observa que la desviación estándar aumenta a medida que la fracción de amortiguamiento se aleja del 5%: para la región de amortiguamiento menor a 5% puede llegar a un valor de 0.24 para una fracción de amortiguamiento del 1% a lo largo de todo el periodo, mientras que para la región de amortiguamiento mayor al 5% puede llegar a 0.08 para una fracción de amortiguamiento del 30% a lo largo de todo el periodo. Sin embargo, la dispersión, en las fracciones de amortiguamiento estudiadas, más grande ocurre para ξ=1% con un valor de 0.24, lo cual puede deberse a que la respuesta al 1% es mucho mayor y por ende más variable.

6.3.2 Componente Aleatoria

Se evaluó la misma forma funcional utilizada para el método *RotD50*, con la intención de indicar la dispersión de los datos y evaluar la confiabilidad de la ecuación predictora en su conjunto.

En la Tabla 5, se muestran los coeficientes de determinación, R^2, que se refieren a la medida en que cada uno de estos modelos se ajusta a los datos para distintos tipos de suelo, tal como se especifican en la norma NCh433.

En la Tabla 6, se muestran los coeficientes resultantes de la regresión aplicada a los coeficientes de determinación de la Ecuación (7). En la Tabla 7 se lista la desviación estándar de la regresión, para cada caso de análisis.

Tabla 5: Coeficientes de determinación, R^2, resultantes de las regresiones aplicadas a dos formas funcionales para los 100 mejores DMF, correspondientes a cada tipo de suelo.

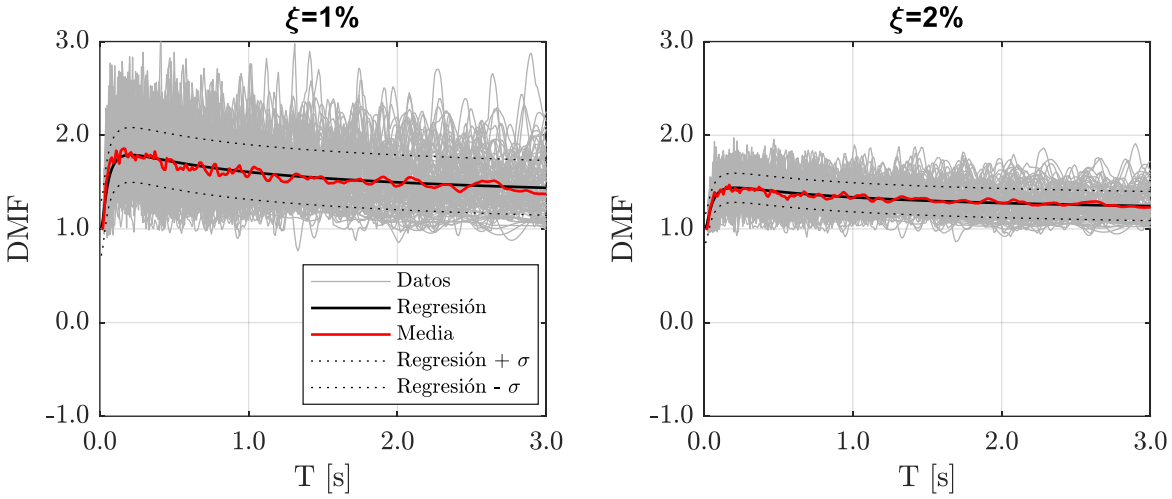
Tipo de suelo	Fracciones de amortiguamiento	Propuesta
A	ξ < 5%	0.56
	ξ > 5%	0.74
B	ξ < 5%	0.53
	ξ > 5%	0.69
C	ξ < 5%	0.54
	ξ > 5%	0.71
D	ξ < 5%	0.54
	ξ > 5%	0.71

Tabla 6: Coeficientes que varían en función del tipo de suelo y la fracción de amortiguamiento, para los 100 mejores DMF, de acuerdo a la Ecuación (7).

Tipo de suelo	Fracciones de amortiguamiento	a	b	c	d	e	f	g
A	ξ < 5%	2.5930	3.2950	0.2496	0.2204	18.1407	0.0039	18.4809
	ξ > 5%	2.5310	3.4743	0.2360	0.1691	11.0567	0.0075	11.2875
B	ξ < 5%	1.9613	2.5689	0.3469	0.3333	14.3079	0.0080	14.7473
	ξ > 5%	1.5463	2.5316	0.3893	0.2934	15.6245	0.0085	15.9571
C	ξ < 5%	1.9206	2.4130	0.4067	0.4289	13.2548	0.0097	13.6504
	ξ > 5%	3.0741	4.2339	0.2342	0.1655	2.9359	0.0819	3.3509
D	ξ < 5%	2.1148	2.6423	0.4084	0.4336	4.1444	0.0448	4.6187
	ξ > 5%	2.4800	4.3122	0.4766	0.3805	1.3239	0.4041	2.0324

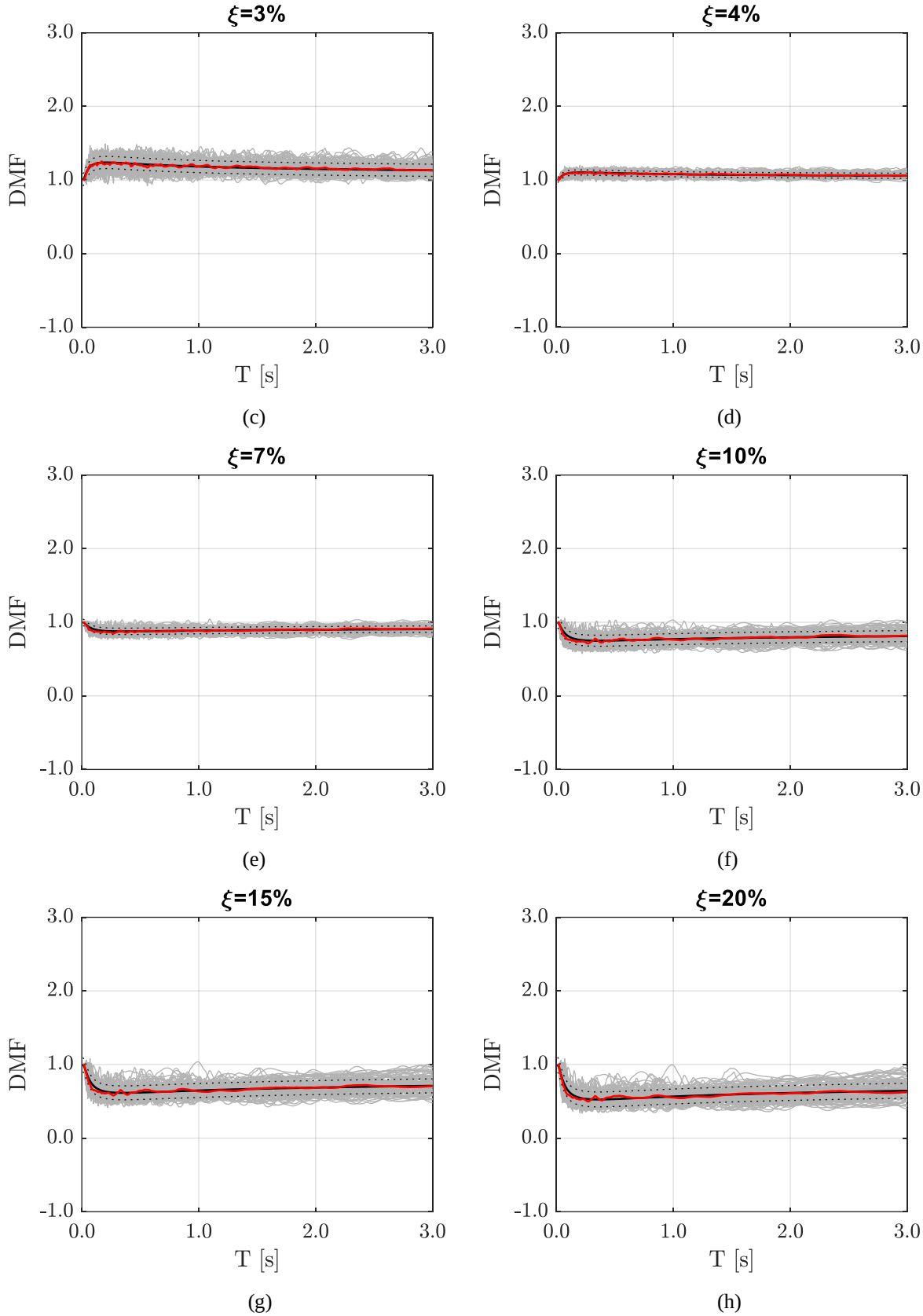
Tabla 7: Desviación estándar obtenida para distintas zonas de amortiguamiento.

Tipo de suelo	Fracciones de amortiguamiento	σ
A	ξ < 5%	0.11
	ξ > 5%	0.07
B	ξ < 5%	0.11
	ξ > 5%	0.08
C	ξ < 5%	0.11
	ξ > 5%	0.07
D	ξ < 5%	0.11
	ξ > 5%	0.08



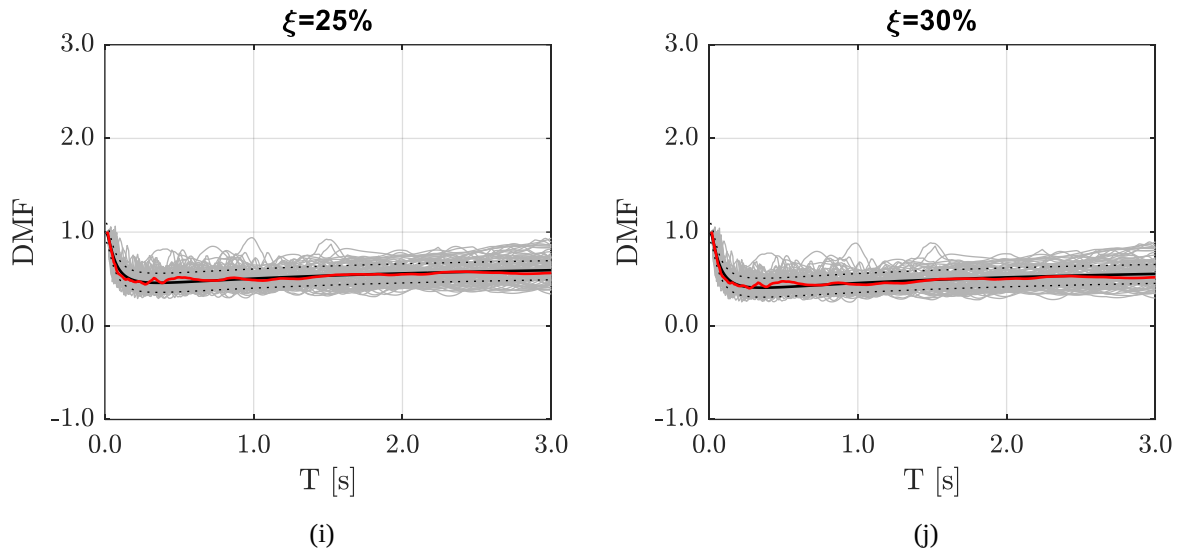
(a) (b)

Figura 9: DMF calculados, media y estimador, en función del periodo, empleando Componente Aleatoria (a) ξ=1%; (b) ξ=2%.



(c) (d) (e) (f) (g) (h)

Figura 9 (continuación): DMF calculados, media y estimador, en función del periodo, empleando Componente Aleatoria (c) ξ=3%; (d) ξ=4%; (g); (e) ξ=7%; (f) ξ=10%; (g) ξ=15%; (h) ξ=20%.



(i) (j)

Figura 9 (continuación): DMF calculados, media y estimador, en función del periodo, empleando Componente Aleatoria (i) ξ=25%; (j) ξ=30%.

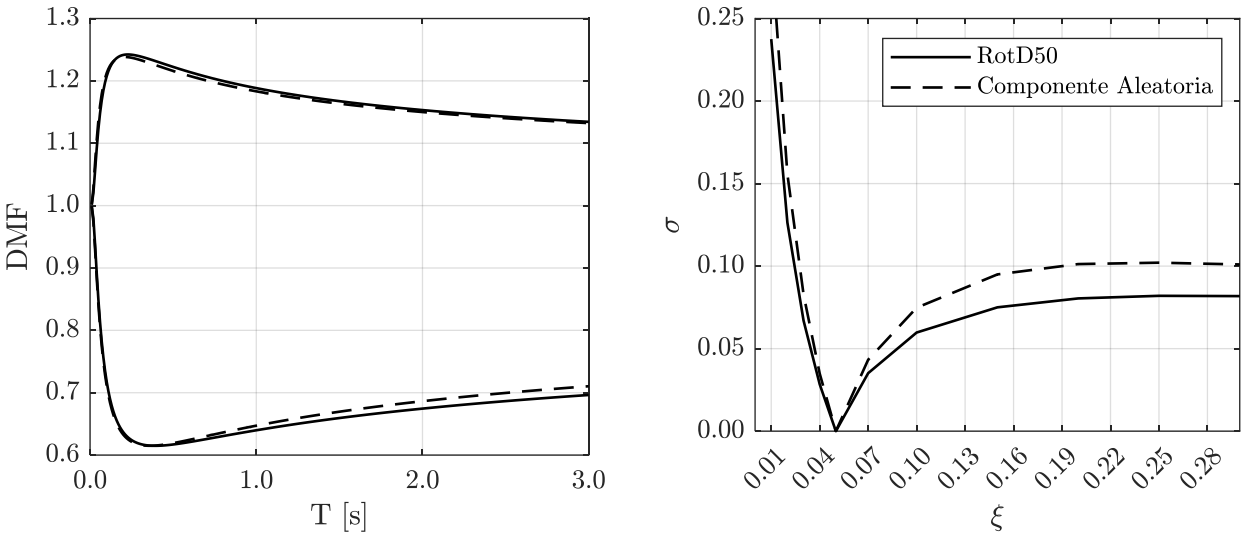
En la Figura 9 se muestran segmentos específicos del modelo junto con su variabilidad correspondiente aplicados al Suelo A, en función de los niveles de amortiguamiento. Los resultados son similares para los Suelos B, C y D, aunque aquí solo se presentan los resultados para el Suelo A debido a limitaciones de espacio. En términos generales, se observa que la regresión se adapta a las medias a lo largo de todo el dominio de períodos de manera consistente, por lo que se puede decir que la regresión tiene un buen ajuste en todas las fracciones de amortiguamiento analizadas, independientemente del período. Además, se observa que la dispersión aumenta a medida que la fracción de amortiguamiento se aleja del 5%. En la región de amortiguamiento por debajo del 5%, esta dispersión puede alcanzar un valor de 0.29 para una fracción de amortiguamiento del 1% a lo largo de todo el periodo, mientras que en la región con amortiguamiento superior al 5%, puede llegar a 0.10 para una fracción de amortiguamiento del 30% a lo largo de todo el periodo. No obstante, es importante destacar que la mayor dispersión, dentro de las fracciones de amortiguamiento estudiadas, se produce en ξ=1%, con un valor de 0.29. Esto podría deberse a que un espectro de pseudo-aceleración con 1% de amortiguamiento es más irregular por lo tanto generaría una mayor dispersión.

6.4 Comparación entre métodos

En esta sección se comparan los resultados obtenidos para los métodos de RotD50 y Componente Aleatoria. A modo de ejemplo, la Figura 10a muestra la similitud entre las regresiones obtenidas con ambos métodos, para fracciones de amortiguamiento del 3% y 15% en función del periodo.

La Figura 10b compara el conjunto de DMF y la regresión, para cada fracción de amortiguamiento considerada en esta investigación, obteniendo así la desviación estándar para medir la dispersión entre los métodos de eliminación de efectos de orientación. Se observa que, para ξ<5% se presenta una dispersión que varía desde aproximadamente 0.25 hasta 0 para amortiguamientos de 1% al 5%, respectivamente. Estos valores que son mayores en comparación con ξ>5%, además, se destaca que la diferencia entre métodos es prácticamente nula en este rango de amortiguamientos. Es importante resaltar que para valores de ξ>5%, se observa una marcada diferencia entre los valores de dispersión entre los dos métodos, donde el método de Componente Aleatoria es mayor a RotD50 en todo el dominio de amortiguamientos mencionados.

La finalidad del conjunto representado en la Figura 10 es resaltar que, a pesar de que la diferencia numérica entre las regresiones encontradas por ambos métodos es mínima. Sin embargo, se observa una disparidad en la región ξ>5% en términos de dispersión, por lo tanto a la hora de usar esto en un contexto probabilístico si hay diferencias. Este patrón se repite de manera constante en todos los tipos de suelos analizados.



(a) (b)

Figura 10: Comparación de resultados de la regresión para Suelo A. (a) Relación entre el estimador del DMF y el periodo para $\xi = 3\%$ y $\xi = 15\%$; (b) Relación entre la desviación estándar del estimador y la fracción de amortiguamiento.

6.5 Factores de modificación del amortiguamiento para la norma

Como consecuencia de desarrollar una ecuación predictora con coeficientes de determinación mostrados en la Tabla 2, la Figura 11, Figura 12, Figura 13 y Figura 14 ofrecen una comparativa entre la media de los factores de modificación del amortiguamiento empíricos para cada tipo de suelo y los valores estimados mediante la Ecuación (7). Esta ecuación, cuyos coeficientes detallados se encuentran en la Tabla 3, fue obtenida a partir de la selección de registros. Pese a que se presentan sólo los resultados para el método RotD50, debido a limitaciones de espacio, los hallazgos son análogos para el método de Componente Aleatoria. Se obtuvo un buen ajuste para los resultados en los cuatro tipos de suelos. Donde se observa un mayor error es para el amortiguamiento del 1% con un error promedio de 4.34% para el Suelo A, 4.18% para el Suelo B, 4.79% para el Suelo C y 4.74% para el Suelo D, obteniendo un error máximo de 10.85% para un periodo de 3 segundos para el Suelo A, 11.89% para un periodo de 1.61 segundos para el Suelo B, 14.86% para un periodo de 0.7 segundos para el Suelo C y 13.67% para un periodo de 0.89 segundos para el Suelo D. Este análisis avala la solidez y aplicabilidad de la Ecuación (7), consolidándose como una herramienta eficaz para la evaluación precisa de los DMF en diversas condiciones de suelo y fracciones de amortiguamiento.

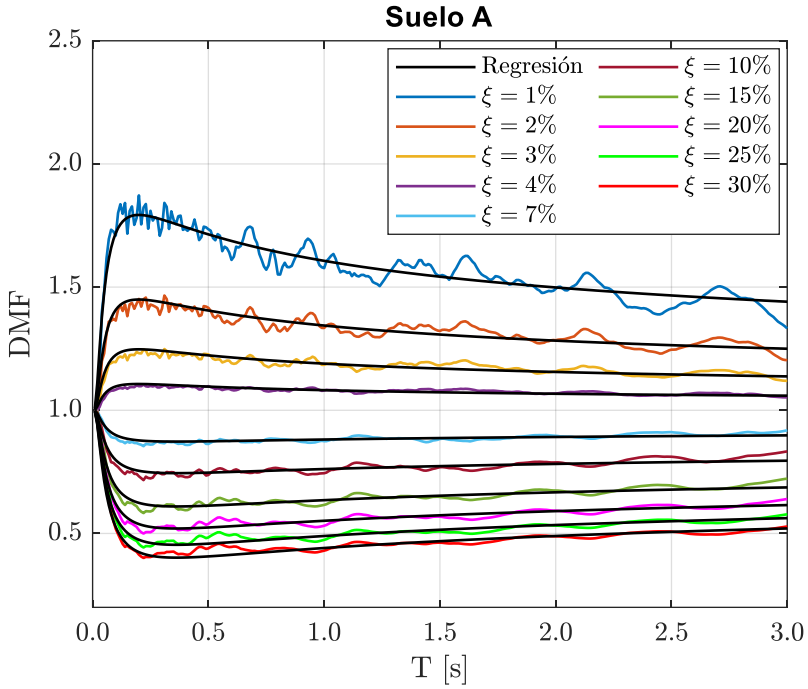


Figura 11: Media de los factores de modificación del amortiguamiento obtenidos en función del periodo, para el método RotD50, y su estimación según Ecuación (7) para Suelo A.

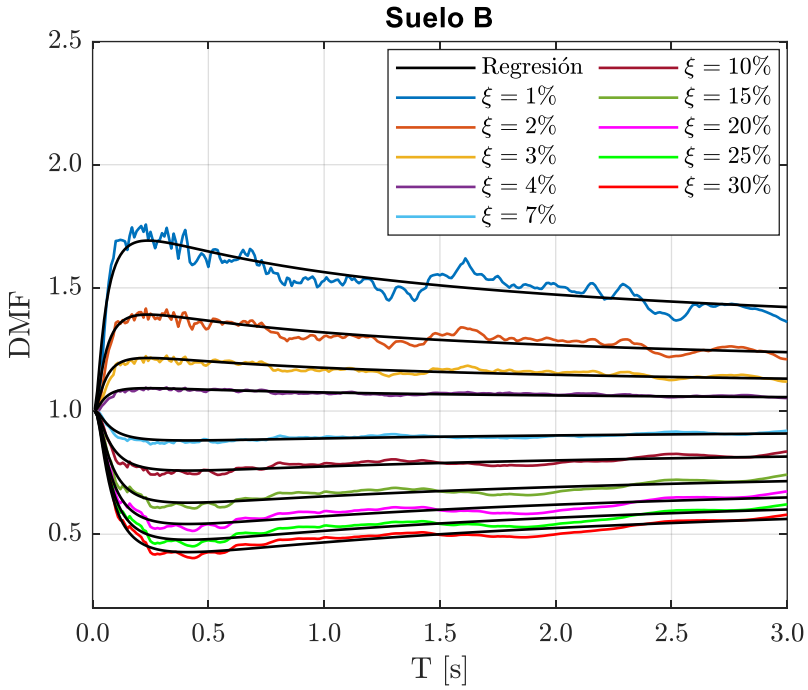


Figura 12: Media de los factores de modificación del amortiguamiento obtenidos en función del periodo, para el método RotD50, y su estimación según Ecuación (7) para Suelo B.

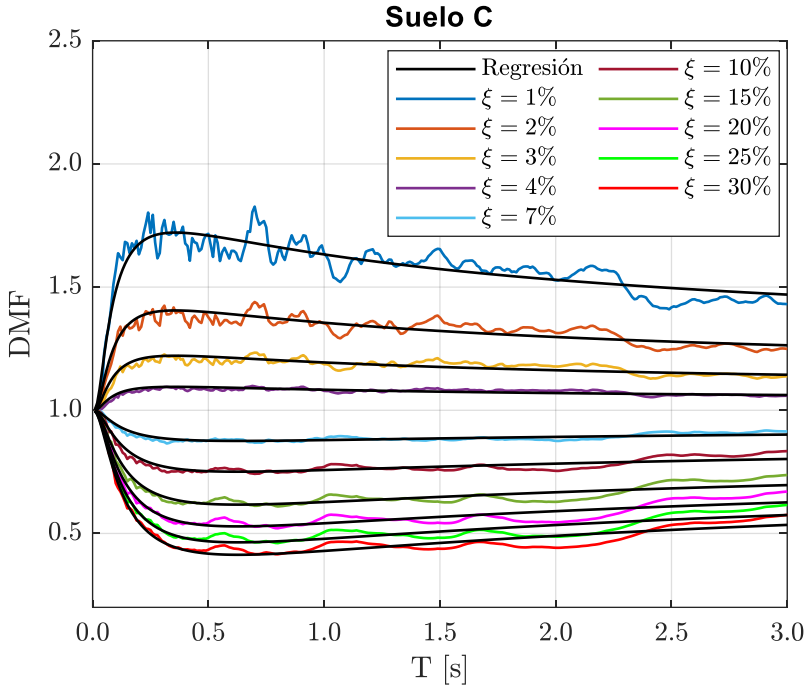


Figura 13: Media de los factores de modificación del amortiguamiento obtenidos en función del periodo, para el método RotD50, y su estimación según Ecuación (7) para Suelo C.

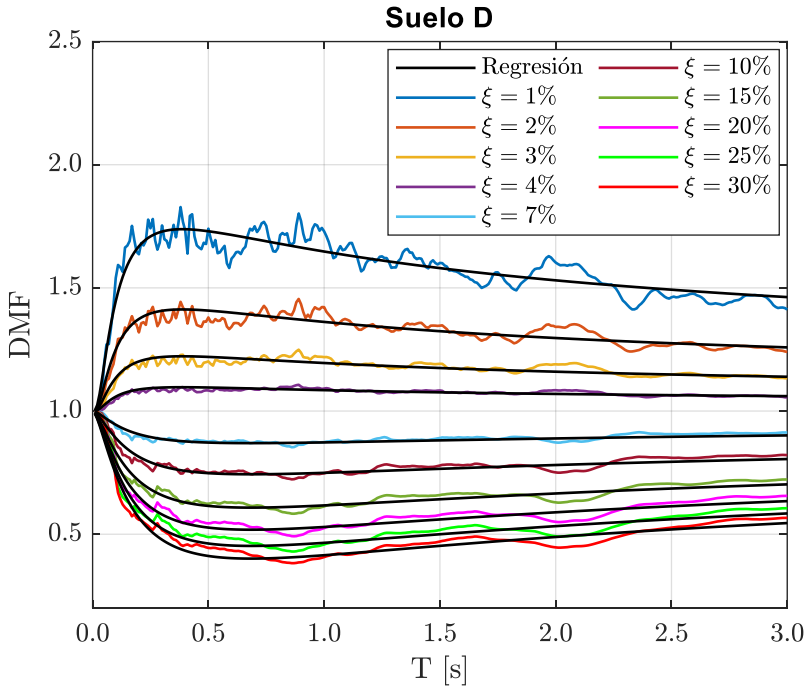


Figura 14: Media de los factores de modificación del amortiguamiento obtenidos en función del periodo, para el método RotD50, y su estimación según Ecuación (7) para Suelo D.

6.6 Comparación de demanda sísmica

Dado que la norma NCh 433 Of. 1996 Mod. 2009 + DS61 no presenta ninguna expresión específica para los DMF, se procederá a ilustrar una comparativa de fracciones de amortiguamiento en el contexto de la normativa.

La Figura 15 muestra los pseudo-espectros de aceleración de la norma en Suelo B, escalados por el factor de modificación calculado mediante la Ecuación (7) para periodos entre 0 y 3 segundos, y fracciones de amortiguamiento de 1%, 3%, 5%, y 10%. Se observa que la norma subestima un 35% y 15% la demanda sísmica para el amortiguamiento de 1% y 3%, respectivamente, entre los periodos 0.2 a 0.3 segundos. Por otra parte, la norma sobreestima un 20% la demanda sísmica para el amortiguamiento de 10% entre los mismos periodos mencionados anteriormente. Estos resultados señalan la sensibilidad de la norma a la fracción de amortiguamiento utilizada y sugieren la necesidad de considerar ajustes en la formulación de normas y estándares para garantizar evaluaciones sísmicas más precisas, especialmente en los rangos de periodos mencionados.

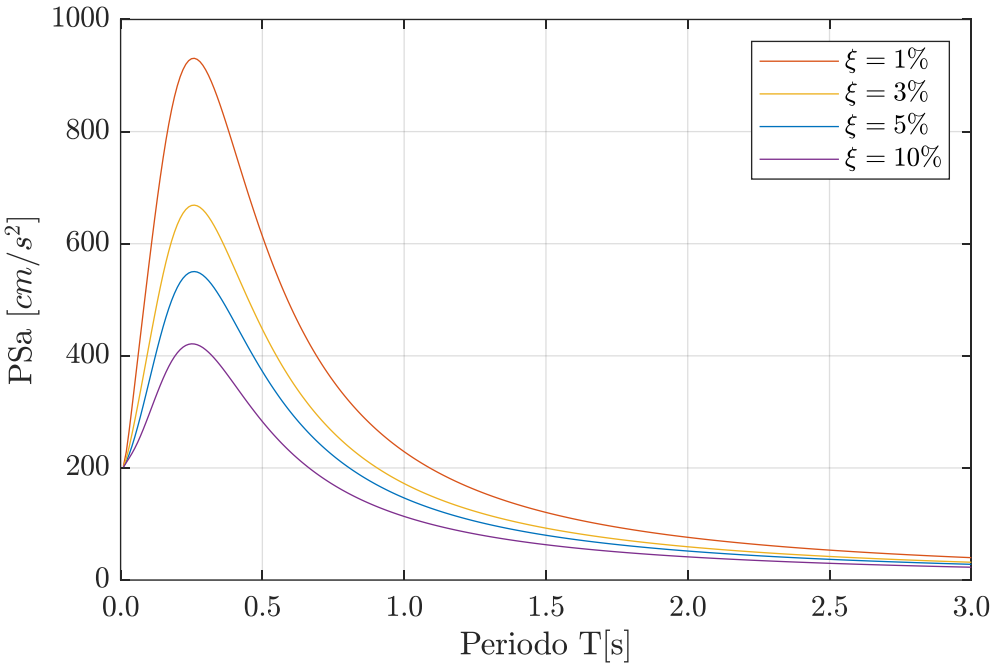


Figura 15: Espectro de la Norma NCh433 en Suelo B y Zona Sísmica 1, escalado según los DMF resultantes de esta investigación para fracciones de amortiguamiento del 1%, 3%, 5%, y 10%.

7 Resumen y conclusiones

En esta investigación, se estimó y propuso una expresión para los factores de modificación del amortiguamiento según la normativa chilena NCh 433 Of. 1996 Mod. 2009 + DS61 2011. Esto se realizó utilizando una base de datos de registros sísmicos y la selección de espectros se basó en el criterio de forma espectral, comparando las ordenadas espectrales de los registros rotados conforme a RotD50 y seleccionando al azar una componente del registro para los distintos escenarios de diseño.

Se determinaron los factores de modificación del amortiguamiento para cuatro escenarios de diseño según la norma. Este cálculo se realizó empleando 100 mejores registros sísmicos seleccionados para cada tipo de suelo, abarcando períodos desde 0.01 hasta 3 segundos, y fracciones de amortiguamiento que oscilaron entre el 1% y el 30%. Para el análisis regresión no lineal multivariable se utilizó la fracción de amortiguamiento y el período de vibración como variables independientes obteniendo una estimación para los DMF. Por último, se comparan pseudo-espectros de aceleración para distintas fracciones de amortiguamiento, para comprender cómo la norma puede subestimar o sobreestimar la demanda sísmica.

De acuerdo a los resultados entregados en esta investigación, se concluye lo siguiente:

- A través de la aplicación de dos métodos diferentes de selección de registros sísmicos en cumplimiento con los escenarios de diseño especificados en la norma NCh 433, se ha logrado obtener factores de modificación del amortiguamiento empíricos.

- No se detectó una diferencia estadística entre las medias de los resultados generados por RotD50 con Componente Aleatoria, sin embargo, la desviación estándar obtenida para Componente Aleatoria es, en promedio, un 19% mayor.

- Se propone una fórmula para estimar la media de los factores de modificación del amortiguamiento, tanto para componente aleatoria como para RotD50.

- Se muestra que la demanda sísmica puede subestimarse hasta en un 35% para amortiguamientos menores al 5%, y sobreestimarse hasta en un 20% si es que el espectro actual de la norma NCh 433 se emplea para calcular estructuras con amortiguamientos diferentes al 5% entre los periodos de 0.2 a 0.3 segundos. Estos resultados sugieren la necesidad de reconsiderar y actualizar la normativa para una evaluación más precisa de la respuesta sísmica de las estructuras.

8 Agradecimientos

Los registros sísmicos fueron obtenidos del Centro Sismológico Nacional (CSN) y de la Red Nacional de Acelerógrafos del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile (RENADIC). Se agradecen y reconocen los esfuerzos realizados para instalar, operar y mantener la instrumentación sísmica, así como la recopilación y el procesamiento de los registros sísmicos. Adicionalmente, se agradece al profesor Fabian Rojas por proveer acceso a la base de datos de registros sísmicos de la Universidad de Chile. También se reconoce al profesor Pablo Heresi, de la Universidad Técnica Federico Santa María, por su ayuda en el procesamiento de los registros.

Además, expresar reconocimiento al profesor guía, Cristian Cruz, por su invaluable contribución durante este proceso académico. Su dedicación y disposición para transmitir sus conocimientos han sido esenciales para mi formación y desarrollo. Además, quiero destacar y agradecer su orientación y paciencia, ya que ha desempeñado un papel fundamental al guiarme a lo largo de este camino.

Por otra parte, agradecer a mi familia por todo el apoyo que me han brindado a lo largo de mi vida. Su respaldo constante ha sido fundamental para mi desarrollo personal y académico. Agradecer a mi pareja por su apoyo incondicional desde que apareció en mi vida, cada gesto de aliento, comprensión y paciencia ha sido un pilar fundamental que me ha permitido superar desafíos, alcanzar metas y siempre seguir hacia el futuro con la mejor predisposición.

9 Referencias

ASCE/SEI 7-16, (2016), Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, Estados Unidos.

Boore, D. M. (2010). Orientation-independent, nongeometric-mean measures of seismic intensity from two horizontal components of motion. Bulletin of the Seismological Society of America, 100(4), 1830-1835.

Cruz, C., & Miranda, E. (2021). Damping ratios of the first mode for the seismic analysis of buildings. *Journal of Structural Engineering*, *147*(1), 04020300.

Dávalos, H., Miranda, E., Bantis, J., & Cruz, C. (2022). Response spectral damping modification factors for structures built on soft soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *154*, 107153.

Instituto Nacional de Normalización (INN). (2009). NCh 433 Of. 1996 Mod 2009. Seismic Design of Buildings. Santiago, Chile.

Lin, Y. Y., & Chang, K. C. (2003). Study on damping reduction factor for buildings under earthquake ground motions. Journal of Structural Engineering, 129(2), 206-214.

Lin, Y. Y., & Chang, K. C. (2004). Effects of site classes on damping reduction factors. Journal of structural engineering, 130(11), 1667-1675.

Lin, Y. Y., Miranda, E., & Chang, K. C. (2005). Evaluation of damping reduction factors for estimating elastic response of structures with high damping. *Earthquake engineering & structural dynamics*, *34*(11), 1427-1443.

MINVU. (2011). Decreto Supremo N°61: Reglamento que fija el diseño sísmico de edificios y deroga decreto N°117, de 2010. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Santiago, Chile.

Miranda, S., Miranda, E., & Carlos de la Llera, J. (2020). The effect of spectral shape on damping modification factors. *Earthquake Spectra*, *36*(4), 2086-2111.

Newmark, N. M., y W. J. Hall. (1982) Earthquake Spectra and Design. Engineering Monographs on Earthquake Criteria, Structural Design, and Strong Motion Records, v. 3. Berkeley, Calif: Earthquake Engineering Research Institute.

Prado G. (2023). Evaluación de los factores de modificación del amortiguamiento de la norma NCh 2745 of 2013 para el diseño de edificios con aislación sísmica.

Rezaeian, S., Al Atik, L., Kuehn, N. M., Abrahamson, N., Bozorgnia, Y., Mazzoni, S., ... & Campbell, K. (2021). Spectral damping scaling factors for horizontal components of ground motions from subduction earthquakes using NGA-Subduction data. Earthquake Spectra, 37(4), 2453-2492.