



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

**ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS MODALES DE UN
CONJUNTO DE EDIFICIOS EN CALIFORNIA A PARTIR DE SU
RESPUESTA SÍSMICA Y SU CORRELACIÓN CON LA
AMPLITUD**

Memoria de Título presentada por

Daniel Octavio Contreras Gómez

Como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Cristián Emanuel Cruz Doggenweiler

Septiembre de 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Estimación de los parámetros modales de un conjunto de edificios en California a partir de su respuesta sísmica y su correlación con la amplitud

Nombre del candidato(a): Daniel Octavio Contreras Gómez

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: San Joaquín; **Departamento:** Departamento de Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Cristian Emanuel Cruz Doggenweiler, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

X El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

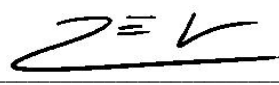
☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 21/10/2025

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 21/10/2025;

Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS MODALES DE UN CONJUNTO DE EDIFICIOS EN CALIFORNIA A PARTIR DE SU RESPUESTA SÍSMICA Y SU CORRELACIÓN CON LA AMPLITUD

Daniel Contreras G., Cristian Cruz D.
Universidad Técnica Federico Santa María.

Resumen

La presente memoria tiene como propósito principal aportar nueva evidencia al analizar y caracterizar la relación entre los parámetros modales — principalmente el periodo fundamental de vibración y la fracción de amortiguamiento — y la amplitud de respuesta en un conjunto de edificios instrumentados en California, a partir de datos obtenidos tanto de registros sísmicos como de vibraciones ambientales. Esta investigación forma parte de un proyecto mayor (FONDECYT No 11230258) orientado a caracterizar la dependencia de los parámetros modales respecto de la amplitud de respuesta.

Para lograr este objetivo, la investigación se apoya en métodos avanzados de identificación de sistemas estructurales, destacando el método de minimización modal en el dominio del tiempo para registros sísmicos, y los métodos de descomposición en el dominio de la frecuencia (FDD/EFDD) y decaimiento aleatorio (RD) para vibraciones ambientales. La confiabilidad de los parámetros obtenidos se evalúa mediante criterios de control basados en factores de amplificación dinámica, contribución modal de Arias e intervalos de confiabilidad mejorados (ERI), asegurando que los valores finales sean representativos y consistentes con la respuesta real de los edificios.

La muestra del estudio se compone de diez edificios instrumentados en California, seleccionadas de la base de datos del *Center for Engineering Strong Motion Data* (CESMD), abarcando desde estructuras de mediana altura de hormigón armado hasta estructuras con sistemas de muros de corte y marcos de acero. A través del procesamiento de múltiples registros de aceleración, se identificaron los parámetros modales dominantes de cada edificio, verificando su coherencia mediante comparaciones entre la respuesta observada y la predicha, apoyadas en gráficos de tiempo-historia de aceleración, espectros de respuesta y desplazamientos relativos de entrepiso.

A partir de los registros procesados, se identificaron periodos y fracciones de amortiguamiento del primer modo traslacional, evaluando su variación frente a la amplitud de respuesta, medida mediante el desplazamiento máximo de techo normalizado (PRDR). Los resultados confirman la existencia de una dependencia del periodo y, en menor medida, del amortiguamiento, respecto a la amplitud de excitación, observándose una tendencia creciente que, para amplitudes mayores, tiende a estabilizarse, en concordancia con tendencias reportadas por estudios previos.

Índice

1	Introducción	4
2	Objetivos	5
2.1	Objetivo general	5
2.2	Objetivos específicos	5
3	Marco teórico	5
3.1	Identificación de sistemas	5
3.1.1	Método de minimización modal en el tiempo	5
3.2	Evaluación de confiabilidad	6
3.2.1	Factores de amplificación dinámica	6
3.2.2	Contribución modal de Arias	7
3.2.3	Intervalos de confiabilidad mejorados (ERI)	7
3.3	Método de descomposición en el dominio de la frecuencia (FDD)	8
3.4	Método del decaimiento aleatorio (RD)	11
3.5	Método de outliers: Método 1.5 IQR	13
4	Metodología	13
4.1	Parámetros modales identificados	13
4.2	Dependencia de la amplitud	14
4.3	Comparación con otros estudios	14
5	Resultados	15
5.1	Parámetros modales identificados	15
5.2	Dependencia de la amplitud	26
5.3	Comparación con otros estudios	35
6	Conclusiones	37
7	Recomendaciones	37
8	Agradecimientos	38
9	Referencias	39
A.	Apéndice 1	41

1 Introducción

Los parámetros modales, como el periodo de vibración y la fracción de amortiguamiento, son fundamentales para estimar la respuesta estructural de un edificio. Tanto en la academia como en el ejercicio de la profesión, es necesario contar con métodos confiables para estimar el periodo de vibración de estructuras sometidas a acción sísmica. En estudios paramétricos – donde se simula un gran número de estructuras – se asignan directamente los parámetros modales a sus modelos en vez de calcularlos modelando la distribución de masa y rigidez de cada edificio (Miranda et al., 2024; Poulos & Miranda, 2024). Existen diversas investigaciones que han estudiado empíricamente el comportamiento del periodo fundamental y la fracción de amortiguamiento del primer modo de edificios sometidos a terremotos (Bernal et al., 2015; Cruz & Miranda, 2021; Goel & Chopra, 1997). Sin embargo, la dispersión de estos modelos es usualmente alta. La dispersión se debe a que los modelos estadísticos no controlan todas las variables que gobiernan el comportamiento de los parámetros modales. En particular, no se considera el efecto de la amplitud de la respuesta – o bien no se cuenta con una cantidad suficiente de datos para tomarla en cuenta adecuadamente.

Está bien documentado que los parámetros modales de un edificio varían en función de la amplitud de la respuesta. En la literatura, varias investigaciones han recopilado información sobre los parámetros modales y su relación con la amplitud. Haviland (1976) recopiló diversas investigaciones y creó una de las primeras bases de datos de propiedades modales, estimadas a partir de respuestas medidas en edificios. Sus resultados muestran que, el periodo fundamental y los coeficientes de amortiguamiento aumentaban en un 20% y más de un 100% respectivamente durante un terremoto, en comparación con movimientos de baja amplitud. Celebi et al. (1993) observaron tendencias similares al comparar valores inferidos de vibraciones ambientales con los obtenidos durante movimientos fuertes en edificios. Por otra parte, diversos estudios muestran que el amortiguamiento aumenta linealmente con el incremento de la amplitud, medida como el máximo desplazamiento de techo normalizado por la altura del edificio (PRDR, por sus siglas en inglés), esto cuando el PRDR es inferior a aproximadamente un 0.01% en los casos estudiados (Celebi et al., 1993; Fang et al., 1999; Jeary, 1986; Li et al., 2000). No obstante, tras alcanzar cierto nivel de amplitud, el amortiguamiento se satura e incluso puede llegar a disminuir (Spence & Kareem, 2014). Cruz y Miranda (2021) analizaron más de 1330 respuestas sísmicas en edificios. Si bien encontraron que la amplitud de la respuesta, medida como PRDR, era estadísticamente significativa en la predicción del amortiguamiento del primer modo, su efecto era marginal. Luego, al examinar 109 “componentes de edificios”, hallaron poca o nula correlación entre la fracción de amortiguamiento y la amplitud. Argumentaron que aquello puede estar relacionado a la falta de datos en rangos críticos de amplitud donde se observaría una tendencia lineal creciente con la amplitud. Sin embargo, en edificios con suficientes datos, detectaron un aumento en los periodos y coeficientes de amortiguamiento con la PRDR, seguido de una saturación para los valores de PRDR. Debido a la falta de datos y la caracterización de la dependencia a la amplitud de los parámetros modales es un área aún en desarrollo y requiere investigación adicional.

La presente memoria tiene como objetivo analizar, evaluar y caracterizar la relación entre parámetros modales y la dependencia a la amplitud para un conjunto de edificios instrumentados de California. Este trabajo forma parte del proyecto FONDECYT No 11230258, que busca caracterizar la dependencia de la amplitud del periodo y la fracción de amortiguamiento del primer modo traslacional de edificios instrumentados.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar y evaluar la relación entre parámetros modales y la amplitud del desplazamiento máximo de techo para un conjunto de edificios instrumentados en California.

2.2 Objetivos específicos

- i. Aportar nueva evidencia de la relación de periodos y fracciones de amortiguamiento con la amplitud de la respuesta de un conjunto de edificios en California obtenida a partir tanto de vibraciones ambientales como de su respuesta sísmica registrada.
- ii. Evaluar la dependencia del periodo y la fracción de amortiguamiento de la amplitud de la respuesta de los edificios estudiados.
- iii. Comparar los resultados obtenidos con resultados de otros edificios reportados en la literatura.

3 Marco teórico

3.1 Identificación de sistemas

En el contexto de esta investigación, la identificación de sistemas se entiende como un proceso destinado a obtener información sobre el comportamiento dinámico de una estructura o un sistema a partir de su respuesta medida ante excitaciones externas (Cruz & Miranda, 2017). Este enfoque se clasifica en dos grandes categorías: la primera trata de técnicas no paramétricas, que tratan al sistema como una “caja negra” y se enfocan en establecer relaciones funcionales entre las entradas y salidas del sistema, pero en general presentan problemas para predecir la respuesta estructural; y la segunda se trata de técnicas paramétricas, que buscan determinar un conjunto de parámetros que minimicen la diferencia entre la respuesta observada y la predicha por un modelo numérico (Cruz & Miranda, 2017), siendo esta última la empleada en el presente estudio.

La utilidad de la identificación de sistemas radica en su capacidad para proporcionar datos sobre propiedades dinámicas de una estructura, como frecuencias naturales, formas modales y fracciones de amortiguamiento. Estos parámetros son relevantes para modelar el comportamiento de una estructura ante eventos sísmicos, permitiendo realizar análisis más precisos y validaciones para modelos estructurales, ya que permiten ajustar los parámetros del modelo para que se alineen con las observaciones reales (Cruz & Miranda, 2017).

3.1.1 Método de minimización modal en el tiempo

El método de minimización modal corresponde a una técnica de identificación paramétrica de sistemas que consiste en encontrar el conjunto óptimo de parámetros que permita que un modelo matemático reproduzca la respuesta estructural registrada con el menor error posible (Cruz & Miranda, 2019).

El método fue propuesto originalmente por Beck & Jennings (1980)Beck & Jennings (1980), y en esta investigación se utilizó una versión adaptada para aprovechar las herramientas de optimización que dispone el software MATLAB. El método realiza un ajuste en el dominio del tiempo mediante un análisis de superposición modal. Se utiliza la superposición modal ya que es el tipo de análisis que más se utiliza en el diseño sísmico de estructuras. En consecuencia, los parámetros identificados corresponden directamente a aquellos requeridos por los diseñadores estructurales para calcular la respuesta sísmica de un edificio. A continuación, se detallan las ecuaciones consideradas en el análisis y la explicación de los parámetros utilizados, basadas en Cruz & Miranda (2017), adaptando el método de Beck & Jennings (1980).

Para una estructura lineal, con amortiguamiento clásico, base fija, y sometida a un movimiento en la base, la respuesta de cada uno de los modos se rige mediante la Ecuación (1):

$$\ddot{D}_n(t) + 2\omega_n \cdot \xi_n \cdot \dot{D}_n(t) + \omega_n^2 \cdot D_n(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

Donde $\ddot{D}_n$, $\dot{D}_n$ y D_n corresponden a la aceleración, la velocidad y el desplazamiento relativos de un sistema de un grado de libertad con masa unitaria. donde el subíndice n indica el número de modo que se está evaluando; ω_n corresponde a la frecuencia natural; ξ_n corresponde a la fracción de amortiguamiento; y $\ddot{u}_g$ corresponde a la aceleración del suelo.

Los desplazamientos modales para el j -ésimo grado de libertad de la estructura se pueden calcular mediante la Ecuación (2).

$$u_{nj}(t) = \Gamma_n \cdot \phi_{nj} \cdot D_n(t) \quad (2)$$

Donde Γ_n corresponde al factor de participación modal y ϕ_{nj} corresponde a la forma modal correspondiente al modo n asociado al j -ésimo grado de libertad de la estructura.

Se define la función objetivo J como la diferencia cuadrática entre la aceleración relativa predicha $\ddot{u}_j(i\Delta t)$ y la aceleración relativa medida por los sensores existentes en la estructura $\ddot{u}_j(i\Delta t)$, normalizada por la aceleración relativa registrada sumada a través del tiempo y los sensores.

$$J(\theta) = \sum_{j=1}^{N_{sen}} \sum_{i=1}^{\tau} \frac{[\ddot{u}_j(i\Delta t) - \ddot{u}_j(i\Delta t)]^2}{\sum_{i=1}^{\tau} [\ddot{u}_j(k\Delta t)]^2} \quad (3)$$

Donde N_{sen} corresponde al número de sensores sobre el nivel de suelo; Δt corresponde al paso del tiempo; τ corresponde al número de puntos en la señal; y θ corresponden al conjunto de parámetros modales que definen el modelo numérico de la estructura. Con ello se obtendrá una medida global del ajuste entre las aceleraciones relativas predichas y las medidas por los sensores de la estructura (Cruz & Miranda, 2017).

Finalmente, el set de parámetros óptimos que permitan reproducir de mejor manera la respuesta registrada será aquellos que minimicen la función objetivo:

$$\min J(\theta) \quad (4)$$

Donde:

$$\theta = \left(\begin{Bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_N \end{Bmatrix}; \begin{Bmatrix} \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_N \end{Bmatrix}; \begin{bmatrix} \Gamma_1 \phi_{11} & \dots & \Gamma_N \phi_{N1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Gamma_1 \phi_{1N_{sen}} & \dots & \Gamma_N \phi_{NN_{sen}} \end{bmatrix} \right) \quad (5)$$

3.2 Evaluación de confiabilidad

La confiabilidad de los parámetros obtenidos se evalúa mediante un conjunto de pruebas basadas en tres métricas de confiabilidad (Cruz & Miranda, 2019). Cada métrica está asociada a un criterio de corte específico que determina si el resultado puede considerarse confiable. Si alguno de estos criterios no se cumple, los valores de periodo o fracción de amortiguamiento asociados a ese modo se descartan. Las subsecciones siguientes detallan cada métrica y sus pruebas correspondientes.

3.2.1 Factores de amplificación dinámica

Durante ciertos eventos sísmicos, puede ocurrir que únicamente se exciten los modos superiores de una estructura, sin alcanzar la capacidad de excitar el primer modo, e inclusive el segundo (Cruz & Miranda, 2019). Aunque es posible obtener resultados para las fracciones de amortiguamiento, estos datos pueden no ser confiables. El factor de amplificación dinámica, R_n , mide cuánto se amplifica la respuesta en el techo respecto de la base de la estructura para los dos primeros modos. Esto se lleva a cabo utilizando la Ecuación (6):

$$R_n = \frac{\overline{S_{ar}}}{\overline{S_{ab}}} \quad (6)$$

Donde $\overline{S_{ar}}(T_n)$ y $\overline{S_{ab}}(T_n)$ corresponden a la media de las ordenadas de aceleración espectral del suelo, amortiguadas al 1%, correspondientes a los movimientos registrados en el techo y en la base del edificio, respectivamente, en una ventana de periodos definida por $[0.9 \cdot T_n, 1.1 \cdot T_n]$, más $0.01g$. A

partir de esto, los autores establecen que el criterio de corte para R_n para los dos primeros modos es lo que se indica en las Ecuaciones (7) y (8):

$$R_1 \geq 2.2 \quad (7)$$

$$R_2 \geq 1.6 \quad (8)$$

Donde R_1 corresponde al factor de amplificación dinámica asociado al primer modo y R_2 corresponde al factor de amplificación dinámica asociado al segundo modo.

3.2.2 Contribución modal de Arias

Esta métrica indica la contribución relativa de un modo en específico en la respuesta total de la estructura frente a un movimiento sísmico. Si la contribución relativa obtenida para un modo es muy pequeña, a partir de la Ecuación (3), entonces la respuesta no cambia significativamente si se usa un 1% o 20% (Cruz & Miranda, 2019). Por esta razón, se calcula la contribución modal de cada modo a través de la Ecuación (9), con el fin de determinar el porcentaje de participación de cada modo en la respuesta total. No se consideran confiables los parámetros de aquellos modos que tengan una contribución modal de Arias, MC_n , menor a un 5%.

$$MC_n = \frac{\sum_{j=1}^{N_{sen}} \sum_{k=1}^{\tau} [\ddot{u}_{nj}(k\Delta t)]^2}{\sum_{i=1}^{N_m} \sum_{j=1}^{N_{sen}} \sum_{k=1}^{\tau} [\ddot{u}_{ij}(k\Delta t)]^2} \quad (9)$$

Donde MC_n es la contribución modal de Arias del n -ésimo modo; $\ddot{u}_{nj}$ es la aceleración relativa calculada para el modo i -ésimo de vibración del suelo j ; Δt es el paso de tiempo de digitalización del registro; N_m es el número total de modos considerados en el modelo estructural; N_{sen} es el número de sensores sobre el nivel del suelo; y τ es el número de puntos de datos en el registro.

3.2.3 Intervalos de confiabilidad mejorados (ERI)

La función objetivo definida en la Ecuación (3), tiende a ser más sensible a los parámetros del modo fundamental, que a los de modos superiores (Cruz & Miranda, 2019). Los intervalos de confiabilidad mejorados (ERI, por sus siglas en inglés) buscan redefinir la función objetivo de modo de exagerar su sensibilidad al amortiguamiento modal.

Para ello, se realiza una verificación adicional del sistema, en la que solo se analiza la fracción de amortiguamiento del modo específico analizado, manteniendo constantes todos los parámetros previamente identificados. El objetivo es aislar la respuesta modal, minimizando la influencia de otros modos. Este análisis se realiza utilizando un sensor ubicado en el techo, ya que es en este punto que se espera obtener información relevante de los modos superiores. Se aplica un filtro digital Butterworth de orden 3 a la respuesta medida, eliminando las frecuencias que no se encuentren cercanas a la frecuencia modal del modo analizado, esto mediante las Ecuaciones (10), (11), (12) y (13):

$$f_L = 0.5 \cdot (f_{n-1} + f_n) \quad (10)$$

$$f_U = 0.5 \cdot (f_n + f_{n+1}) \quad (11)$$

$$f_{L1} = f_1/2 \quad (12)$$

$$f_{UN_m} = 2 \cdot f_{N_m} \quad (13)$$

Donde f_L y f_U corresponden a las frecuencias inferiores y superiores del filtro; f_n corresponde a la frecuencia identificada en el n -ésimo modo ($f_n = 1/T_n$); f_{L1} y f_{UN_m} son las frecuencias de corte inferior y superior del primer y último modos considerados.

La nueva función objetivo definida por Cruz & Miranda (2019), se expresa mediante la Ecuación (14):

$$J_s = \sum_{k=1}^{\tau} [\ddot{u}_R^F(k \cdot \Delta t) - \ddot{u}_R^F(k \cdot \Delta t)]^2 \quad (14)$$

Donde τ es el número de puntos en la señal; Δt es el paso del tiempo; $\ddot{u}_R^F$ corresponde a la aceleración filtrada en el techo de la estructura; y $\ddot{u}_R^F$ corresponde a la respuesta equivalente de un sistema de un

solo grado de libertad con periodo T_n y fracción de amortiguamiento $\hat{\xi}_n$, sometido al registro de aceleración de suelo filtrado y amplificado por la forma modal evaluada en el techo $\Gamma_n \cdot \phi_{ntecho}$ del modo n analizado.

Los límites del ERI se definen como los valores de fracción de amortiguamiento que generan un incremento del 50% con respecto al valor mínimo de la nueva función objetivo J_s descrita en la Ecuación (14). Este criterio obtiene los valores más representativos del amortiguamiento modal del modo específico analizado. Donde la longitud del intervalo resultante refleja la sensibilidad de la respuesta estructural del n -ésimo modo. Un intervalo estrecho indica que la función objetivo es altamente sensible a variaciones en el amortiguamiento, lo cual sugiere una mayor confianza en el valor identificado. Por el contrario, intervalos más amplios indican incertidumbre en la estimación (Cruz & Miranda, 2019).

Finalmente, el intervalo de confianza calculado de estar dentro de los límites definidos en la Figura 1.

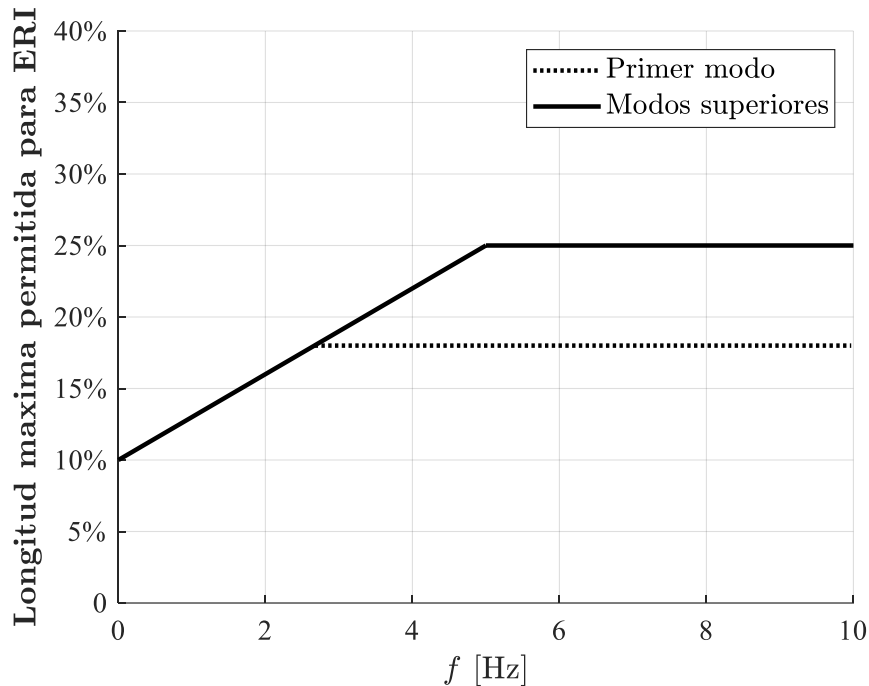


Figura 1: Longitud máxima admisible de los intervalos de confiabilidad mejorados (Cruz & Miranda, 2019).

Notar que se diferencia el primer modo de los modos superiores. Para el intervalo de frecuencias de 0 a 5 [Hz], se observa una pendiente de 0.03, lo que implica un incremento del 10 a 25% para modos superiores, alcanzando un valor un máximo de 25%, donde la pendiente se estabiliza. En cambio, para el primer modo se establece un límite fijo del 18%.

3.3 Método de descomposición en el dominio de la frecuencia (FDD)

El método FDD (Brincker et al., 2000) permite identificar los parámetros modales de una estructura bajo vibraciones ambientales. En este caso, no se cuenta con un registro de la señal que excita al edificio, por lo que se deben realizar supuestos respecto a las características estadísticas de la excitación. El método estima las frecuencias y formas modales a partir de la descomposición de valores singulares (SVD, por sus siglas en inglés) de la matriz de espectros de potencia de los registros. El método FDD mejorado (EFDD, por sus siglas en inglés), también identifica las fracciones de amortiguamiento modales a partir de la estimación de la función de autocorrelación de cada modo. La gran ventaja de este método es su fácil implementación y rapidez en de ejecución. Sus resultados son precisos si es que la estructura posee modos separados en frecuencia, pero también se obtiene una buena aproximación en caso de que haya modos cercanos. En lo que sigue, se detalla matemáticamente el método FDD y su extensión, EFDD.

La relación entre los valores de entrada $x(t)$ y la respuesta medida $y(t)$ puede ser expresada mediante la Ecuación (15):

$$G_{yy}(j\omega) = \bar{H}(j\omega) \cdot G_{xx}(j\omega) \cdot H(j\omega)^T \quad (15)$$

Donde $G_{xx}(j\omega)$ corresponde a la matriz del PSD de la respuesta, de dimensiones $r \times r$, siendo r es el número de valores de entradas en el sistema; $G_{yy}(j\omega)$ corresponde a una matriz de dimensiones $m \times m$ de la PSD de respuestas, siendo m el número de respuestas; $\bar{H}(j\omega)$ es una matriz de dimensiones $m \times r$ de la función de respuesta de frecuencia (FRF por sus siglas en inglés), el acento “-” y el superíndice T representan la matriz compleja conjugada y la matriz transpuesta, respectivamente.

La FRF, se puede escribir como una suma de fracciones parciales, es decir con la forma de polo/residuo mediante la Ecuación (16):

$$H(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{\bar{R}_k}{j\omega - \bar{\lambda}_k} \quad (16)$$

Donde n corresponde al número de modos evaluados, λ_k corresponde al polo y R_k corresponde al residuo. Además, el término R_k queda definido por la Ecuación (17):

$$R_k = \phi_k \cdot \gamma_k^T \quad (17)$$

Donde ϕ_k corresponde vector de la forma modal y γ_k^T corresponde vector de participación modal. El método supone que el valor de entrada corresponde a un ruido blanco, donde la matriz PSD se mantiene constante ($G_{xx}(j\omega) = C$). Bajo este contexto la Ecuación (15) se puede reescribir mediante lo expresado en la Ecuación (18):

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \left[\frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{\bar{R}_k}{j\omega - \bar{\lambda}_k} \right] \cdot C \cdot \left[\frac{R_s}{j\omega - \lambda_s} + \frac{\bar{R}_s}{j\omega - \bar{\lambda}_s} \right]^H \quad (18)$$

Donde el superíndice H representa la matriz compleja conjugada y la matriz transpuesta al mismo tiempo. Multiplicando los dos factores de las fracciones parciales y haciendo uso del teorema de *Heaviside* para fracciones parciales, donde se realizan algunas manipulaciones matemáticas, logrando reducir la respuesta de salida de la PSD a la forma polo/residuos, como se indica en la Ecuación (19):

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{\bar{A}_k}{j\omega - \bar{\lambda}_k} + \frac{B_k}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{\bar{B}_k}{-j\omega - \bar{\lambda}_k} \quad (19)$$

Donde A_k corresponde al k -ésimo residuo de la matriz de salida PSD. Como la matriz de salida PSD es de tamaño $m \times m$, el residuo también es una matriz hermitiana de tamaño $m \times m$, la cual es representada mediante la Ecuación (20):

$$A_k = R_k \cdot C \cdot \left(\sum_{s=1}^n \frac{\bar{R}_s^T}{-\lambda_k - \bar{\lambda}_s} + \frac{R_s^T}{-\lambda_k - \bar{\lambda}_s} \right) \quad (20)$$

La contribución del residuo A_k para el k -ésimo modo viene dado por la Ecuación (21):

$$A_k = \frac{R_k \cdot C \cdot \bar{R}_k^T}{2 \cdot \alpha_k} \quad (21)$$

Donde α_k corresponde a la parte real del polo multiplicado por menos uno (Ver Ecuación (22)). El término A_k se vuelve dominante cuando la estructura se encuentra ligeramente amortiguada y caso de que aquello suceda, el residuo se vuelve proporcional al vector de forma modal indicado en la Ecuación (23):

$$\lambda_k = -\alpha_k + j\omega_k \quad (22)$$

$$A_k \propto R_k \cdot C \cdot \bar{R}_k^T = \phi_k \cdot \gamma_k^T \cdot C \cdot \gamma_k \cdot \gamma_k^T = d_k \cdot \phi_k \cdot \phi_k^T \quad (23)$$

Donde d_k corresponde a una escalar constante. Bajo cierta frecuencia de excitación ω solo un número limitado de modos contribuirán significativamente en la respuesta, siendo por lo general uno o dos modos. Estos modos se denotan como $Sub(\omega)$, bajo el contexto antes mencionado de una estructura que posee un ligero amortiguamiento, el PSD puede ser descrito mediante la Ecuación (24):

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{d_k \cdot \phi_k \cdot \phi_k^T}{j\omega - \lambda_k} + \frac{\bar{d}_k \cdot \bar{\phi}_k \cdot \bar{\phi}_k^T}{j\omega - \bar{\lambda}_k} \quad (24)$$

Hasta el momento solo se ha detallado la teoría que existe detrás del método FDD, a continuación, se detallarán los pasos mencionados por Brincker et al. (2000) y que se deben aplicar en el algoritmo. Para ello en la PSD de respuesta $G_{yy}(j\omega)$, se debe discretizarse la frecuencia ($\omega = \omega_i$) mediante la descomposición de valores singulares (SVD), obteniendo la matriz $\hat{G}_{yy}(j\omega)$ (Ver Ecuación (25)).

$$\hat{G}_{yy}(j\omega_i) = U_i \cdot S_i \cdot U_i^H \quad (25)$$

Donde U_i corresponde a una matriz que contiene los vectores singulares u_{ij} (Ver Ecuación (26)) y S_i corresponde a una matriz diagonal que contiene los valores escalares singulares s_{ij} .

$$U_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}] \quad (26)$$

Al graficar los valores singulares en función de la frecuencia, cuando se está cercano a un peak correspondiente al k -ésimo modo, este modo – o posiblemente algún modo de frecuencia cercana – gobernará la respuesta en esta frecuencia. Y en caso de que solamente el k -ésimo modo sea el dominante, la Ecuación (24), solo contará con un término. Resultando en que, el primer vector singular u_{ij} será una estimación de la forma modal.

$$\hat{\phi} = u_{ij} \quad (27)$$

Además, el valor singular correspondiente, se tratará de la función de densidad autoespectral de potencia que a la vez corresponde a un sistema de un solo grado de libertad (SDOF) indicado en la Ecuación (24). La función de densidad autoespectral de potencia se identifica iterando en un rango acotado en torno al peak dominante, como se muestra Figura 2 mediante las líneas en color rojo. En este proceso la forma modal $\hat{\phi}$ se compara con los vectores singulares obtenidos en las frecuencias cercanas al peak, evaluado mediante iteraciones sucesivas, hasta encontrar el valor más adecuado.

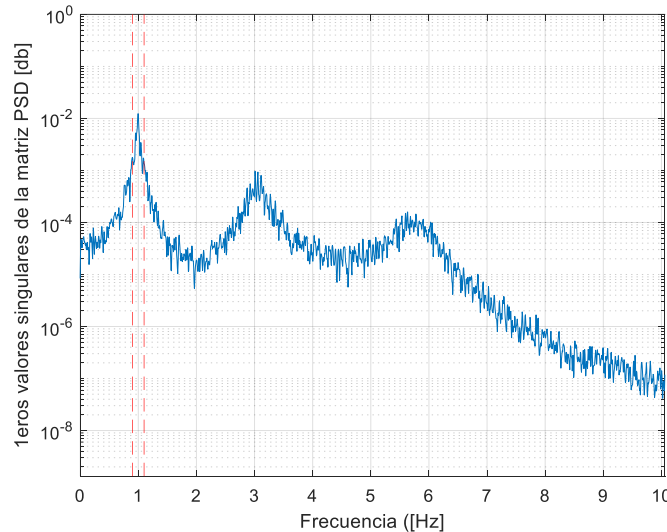


Figura 2: Relación entre los valores singulares de la matriz PSD promediada y la frecuencia. La línea azul corresponde a la relación y las líneas rojas corresponden al rango de iteración.

A partir de la función de densidad SDOF obtenida alrededor del peak de la PSD, se puede obtener la frecuencia y el amortiguamiento. Para ello el fragmento de la PSD SDOF, se lleva al dominio del tiempo mediante una transformada de Fourier inversa, obteniendo la función de autocorrelación del

SDOF asociado al modo analizado. La frecuencia y la fracción de amortiguamiento se estiman a partir de los tiempos de cruce y el decaimiento logarítmico de la función de autocorrelación SDOF correspondiente. Donde el decaimiento logarítmico δ se calcula mediante la Ecuación (28) y el amortiguamiento mediante la Ecuación (29).

$$\delta = \frac{2}{k} \cdot \ln\left(\frac{r_0}{|r_k|}\right) \quad (28)$$

$$\xi = \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + 4\pi^2}} \quad (29)$$

Donde r_k corresponde al valor k -ésimo peak (considerando valores negativos y positivos) de la función de autocorrelación y r_0 al valor inicial del primer peak de la función.

3.4 Método del decaimiento aleatorio (RD)

El método del decaimiento aleatorio (Random Decrement) se basa originalmente en el método desarrollado por H. A. Cole, donde se busca determinar el amortiguamiento y detectar fallas en estructuras aeroespaciales en servicio (Cole, 1968; Cole Jr, 1973). Es un método de convergencia rápida que obtiene información a partir de datos aleatorios. Promediando segmentos de la vibración aleatoria de una estructura sujeta a excitaciones aleatorias, se forma una señal representativa de la vibración libre del sistema y su decaimiento logarítmico. Este proceso genera una señal conocida como señal RD (por sus siglas en inglés), que permite extraer el amortiguamiento del sistema a partir de su vibración libre (Cole Jr, 1973). A continuación, se presentarán el análisis para el método RD en sistemas de un grado de libertad.

La respuesta $x(t)$ de un sistema lineal se define mediante la Ecuación (30):

$$m \cdot \ddot{x}(t) + c \cdot \dot{x}(t) + k \cdot x(t) = f(t) \quad (30)$$

Donde m , c y k corresponden a las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez respectivamente; $\ddot{x}$, $\dot{x}$ y x corresponden a los vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento respectivamente; y $f(t)$ corresponde a una excitación dinámica en el sistema.

Al aplicar superposición al sistema, la respuesta quedará definida por tres condiciones, las cuales son, condiciones iniciales de desplazamiento X_{X_0} , condiciones iniciales de velocidad $X_{\dot{X}_0}$ y la respuesta debido a vibración forzada X_f mediante la Ecuación (31) (Kareem & Gurley, 1996) :

$$X_T = X_{X_0} + X_{\dot{X}_0} + X_f \quad (31)$$

Con ello el método realiza un proceso donde, se promedia un conjunto de segmentos de la respuesta de manera tal, que las componentes de la respuesta debido a las condiciones iniciales de velocidad y vibración forzada tienden a cero.

El método RD se basa en promediar N segmentos de largo τ de la respuesta de un sistema, donde el tiempo inicial t_i de cada segmento se selecciona tal que $x(t_i) = x_s = \text{constante}$ y la pendiente $\dot{x}_i(t)$ alterne entre valores positivos y negativos. Este proceso se realiza mediante la Ecuación (32) (Yang et al., 1983):

$$Rd(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t_i + \tau) \quad (32)$$

Donde se cumple con lo indicado en las Ecuaciones (33), (34) y (35):

$$x_i(t_i) = x_s \quad \text{para } i = 1, 2, 3, \dots \quad (33)$$

$$\dot{x}_i(t_i) \geq 0 \quad \text{para } i = 1, 3, 5, \dots \quad (34)$$

$$\dot{x}_i(t_i) \leq 0 \quad \text{para } i = 2, 4, 6, \dots \quad (35)$$

En el cual $Rd(\tau)$ como señal Random Decrement (RD) y está definida solo en un intervalo de tiempo $0 \leq t \leq \tau$.

La respuesta a la vibración forzada de un sistema lineal debido a una excitación aleatoria estacionaria con media cero también resulta en una señal aleatoria estacionaria con media cero. Al aumentar el número de segmentos promediados, esta respuesta aleatoria tiende a cero, quedando solo la respuesta correspondiente al desplazamiento inicial. En sistemas lineales de un grado de libertad excitados por ruido blanco, la señal RD refleja la función de autocorrelación, adoptando así la misma forma que la vibración libre del sistema.

La función RD se puede evaluar considerando la Ecuación, (36) (Rodrigues & Brincker, 2005):

$$T_x(t_i) = \{a \leq x(t_i) < b, \dot{x}(t_i) = 0\} \quad (36)$$

Donde la Ecuación (36) incluye tanto los peaks positivos como negativos de la señal, corrigiendo el signo en el proceso del promediado.

Para determinar los parámetros dinámicos, relacionados a la frecuencia y la fracción de amortiguamiento, se utiliza la señal RD, la cual debe ser de igual forma que la vibración libre del sistema de un grado de libertad analizado. Para ello se utiliza el decaimiento logarítmico.

Para calcular el decaimiento logarítmico, se debe calcular el decaimiento que existe entre dos peaks de desplazamiento seguidos u_i y u_{i+j} , dados por la Ecuación (37):

$$\frac{u_i}{u_{i+j}} = \exp\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \xi}{\sqrt{1 - \xi^2}}\right) \quad (37)$$

De esta forma se llamará decaimiento logarítmico δ al logaritmo del decaimiento, como se indica en la Ecuación (38):

$$\delta = \ln\left(\frac{u_i}{u_{i+j}}\right) = \frac{2 \cdot \pi \cdot \xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \quad (38)$$

Lo que se puede expresar como el decaimiento entre el primer peak i y cualquier otro peak, j ciclos más adelante, como se indica en la Ecuación (39):

$$\ln\left(\frac{u_i}{u_{i+j}}\right) = j \delta \rightarrow \delta = \frac{1}{j} \cdot \ln\left(\frac{u_i}{u_{i+j}}\right) \quad (39)$$

De esta forma y despejando la Ecuación (38), la fracción de amortiguamiento se puede calcular mediante la Ecuación (40):

$$\xi = \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + 4 \cdot \pi^2}} \quad (40)$$

Para fracciones de amortiguamiento pequeñas, las ecuaciones mostradas hasta el momento también funcionan si se trabaja con aceleraciones.

En caso de que se utilicen múltiples peaks, se obtendrán múltiples valores de decaimientos, por lo cual, se puede considerar que al reordenar la Ecuación (39), se obtenga la Ecuación (41):

$$\ln(u_j) = -\delta \cdot j + \ln(u_1) \quad (41)$$

En base a la Ecuación (41) se realiza un símil con la ecuación de la recta, dada por:

$$\begin{aligned} y &= mx + n \\ x, y &\rightarrow j, \ln(u_j) \\ m &\rightarrow -\delta \\ n &\rightarrow \ln(u_1) \end{aligned} \quad (42)$$

Con ello se puede generar un ajuste lineal mediante la Ecuación (41), en donde la pendiente representa el valor que mejor se ajuste a los múltiples valores de decaimiento. Luego, se reemplaza el valor obtenido en la Ecuación (40), obteniendo así la razón de amortiguamiento.

Para obtener la frecuencia natural, f_n solo basta con obtener la función inversa de la distancia entre peaks.

3.5 Método de outliers: Método 1.5 IQR

Dentro de un conjunto de datos, algunas observaciones pueden diferir notablemente del patrón general del resto. A estas se les conoce como valores atípicos o *outliers*, y corresponden a puntos cuyos valores numéricos se alejan significativamente del grupo de estudio.

El método del rango intercuartílico (IQR, por sus siglas en inglés), propuesto por Tukey J. W. (1977), es una herramienta útil para detectar valores atípicos en relación con una línea de tendencia. Para ello, el procedimiento se aplica a los residuos obtenidos de ajustar la línea de tendencia.

El método IQR define límites de aceptación en función del primer y tercer cuartil. Los pasos para su aplicación son los siguientes:

1. Calcular el rango intercuartílico (IQR): El IQR se obtiene restando el valor del primer cuartil (Q1) al valor del tercer cuartil (Q3), como se expresa en la Ecuación (43):

$$IQR = Q3 - Q1 \quad (43)$$

2. Determinar los límites para identificar *outliers*: Se multiplican 1.5 veces el IQR y se restan y suman a Q1 y Q3, respectivamente, para definir los límites inferior y superior, como se expresa en las ecuaciones (44) y (45). Cualquier valor que se encuentre fuera de este rango se considera un valor atípico.

$$\text{Límite superior} = Q3 + 1.5 \cdot IQR \quad (44)$$

$$\text{Límite inferior} = Q1 - 1.5 \cdot IQR \quad (45)$$

4 Metodología

Esta Sección describe los procedimientos implementados para cumplir los objetivos planteados en la Sección 2. El estudio se basa en el análisis de un conjunto de edificios instrumentados ubicados en California, los cuales se presentan en la Tabla 1. Las subsecciones siguientes indican las actividades desarrolladas para cumplir con los distintos objetivos específicos de este trabajo.

Tabla 1: Edificios Instrumentados en California analizados.

ID	CESMD ID	Ubicación	N° de pisos	Descripción
CA001	89770	Eureka	4	Muros de corte de hormigón armado
CA002	47459	Watsonville	4	Muros de corte de hormigón armado
CA003	24385	Burbank	10	Muros de corte de hormigón armado
CA004	1662	Emeryville	30	Marcos de momento dúctiles de hormigón armado
CA005	58532	San Francisco	47	Marcos de acero resistentes a momento
CA006	58411	San Francisco	58	Muros de corte de hormigón armado
CA007	1239	San Francisco	60	Marcos de acero resistentes a momento
CA008	58680	San Francisco	61	Muros de corte de hormigón armado
CA009	58389	San Francisco	62	Muros de corte de hormigón armado
CA010	24660	Los Angeles	73	Muros de corte de hormigón armado

4.1 Parámetros modales identificados

De la base de datos de “Center for Engineering Strong Motion Data (CESMD)” se obtuvo información sobre movimientos sísmicos y vibraciones ambientales asociados a los edificios instrumentados en California presentados en la Tabla 1.

Para los registros de movimientos sísmicos se aplicó el Método de minimización modal en el tiempo, con el objetivo de identificar los parámetros modales del primer modo traslacional de cada edificio en ambas direcciones principales (Norte-Sur y Este-Oeste). Los registros fueron analizados mediante rutinas desarrolladas en MATLAB, evaluando cada evento sísmico de manera independiente. Una vez

identificados los parámetros (periodo y fracción de amortiguamiento), se aplicaron los tres criterios de confiabilidad descritos en la Sección 3.2.

El análisis de los registros de vibraciones ambientales se realizó utilizando los métodos de descomposición en el dominio de la frecuencia (FDD), su versión extendida (EFDD), y el método del decaimiento aleatorio (RD). Estos métodos permitieron estimar los parámetros modales a partir de excitaciones operacionales no controladas. Dado que los registros provenientes de la página de CESMD no se encuentran calibrados ni filtrados, se aplicó una corrección y filtrado de la línea base del registro, tomando un rango de frecuencias entre 0.1 [Hz] y 30 [Hz], con el fin de corregir y calibrar los registros, previo a su análisis. Luego, se implementaron filtros de banda centrados en la frecuencia esperada del primer modo, con el fin de aislar su contribución. La selección de la ventana de frecuencia fue realizada en función del promedio entre las frecuencias estimadas para el primer y segundo modo, o en su defecto, considerando el valor más próximo a la frecuencia fundamental, evitando regiones con posibles modos torsionales.

Para cada uno de los métodos aplicados, se organizaron los registros de aceleración desde el nivel superior hasta los niveles inferiores del edificio, excluyendo la base. En el método EFDD se identificaron los máximos locales tanto positivos como negativos de la función de autocorrelación, y se seleccionaron aquellos que cumplieran con el decaimiento logarítmico esperado. En el método RD, de forma análoga, se consideraron también los peaks positivos y negativos de la señal, corrigiendo el signo en el promediado de segmentos. Con estos procedimientos se obtuvo, para cada vibración ambiental registrada, una estimación del periodo y la fracción de amortiguamiento asociados al primer modo traslacional del edificio evaluado.

Para cada registro procesado, tanto sísmico como ambiental, se estimó el valor del desplazamiento máximo de techo normalizado por la altura del edificio (PRDR), integrando los registros de aceleraciones. Este parámetro se utiliza como medida de amplitud de respuesta para evaluar su influencia sobre los parámetros modales.

Es importante mencionar que tanto el método EFDD y RD recomiendan usar registros con un valor mayor o igual a 30 minutos para mejores resultados. Esta recomendación forma parte del marco del proyecto FONDECYT N°11230258 en las investigaciones de S. Martínez (2024) y I. Besoain (2024) respectivamente.

4.2 Dependencia de la amplitud

Para evaluar la dependencia a la amplitud asociada a los parámetros modales se construyeron gráficas en los registros que poseían 3 o más sismos que cumplieran con los criterios de confiabilidad y se agregó el resultado obtenido para la vibración ambiental que se acercara más a la respuesta obtenida en los registros sísmicos.

Los gráficos construidos están asociados a los edificios de la Tabla 1 en cada dirección analizada, donde el eje independiente corresponde al PRDR y el eje dependiente corresponde al periodo (T_n) o a la fracción de amortiguamiento (ξ), de los cuales se construyeron líneas de tendencia que siguen la forma funcional que se presenta más adelante en la Sección 5.2 – Dependencia de la amplitud.

Al finalizar la construcción de los gráficos individuales de cada edificio y en cada dirección, se realizaron gráficas que contienen información de todas las direcciones analizadas, en edificios que cuenten con 4 o más puntos en sus gráficos. A este set de datos se le aplicó el Método de *outliers*: Método 1.5 IQR sobre los residuos respecto de la curva de ajuste, con el objetivo de eliminar valores atípicos que pudiesen distorsionar la tendencia general.

4.3 Comparación con otros estudios

Se compararon los resultados obtenidos con los reportados en la literatura (Cruz & Miranda, 2021) incluyendo tanto los valores derivados de registros sísmicos como los estimados a partir de

vibraciones ambientales. Esta comparación busca evaluar el aporte de nuevos datos y validar tendencias observadas en estudios anteriores.

5 Resultados

5.1 Parámetros modales identificados

Con el objetivo de estimar los parámetros modales a partir de registros sísmicos y vibraciones ambientales, se analizaron los edificios instrumentados presentados en la Tabla 1. La información fue obtenida desde la base de datos del *Center for Engineering Strong Motion Data* (CESMD). En esta etapa, se identificaron los registros disponibles para cada edificio, separando entre aquellos correspondientes a eventos sísmicos y los asociados a vibraciones ambientales.

Durante el proceso de verificación de datos, se excluyeron los edificios con ID CA004 y CA007. En el primer caso, no se disponía de registros sísmicos adicionales, y en ambos casos los registros ambientales no contaban con información suficiente respecto a la calibración del sistema utilizado. Los resultados detallados para los registros sísmicos validados se presentan en el Apéndice 1, mientras que los resultados representativos se resumen en este capítulo a modo de ejemplo.

La Tabla 2 presenta el número de registros por edificio, tanto para eventos sísmicos como para vibraciones ambientales, incluyendo el tiempo de duración de los registros de vibraciones ambientales utilizados.

Tabla 2: Número de sismos y vibraciones ambientales registrados.

ID	CESMD ID	Nº de registros sísmicos	Nº de vibraciones ambientales	Duración vibración ambiental
CA001	89770	31	2	4 [min] y 07 [s]
CA002	47459	7	3	4 [min] y 09 [s]
CA003	24385	22	3	3 [min] y 53 [s]
CA004	1662	1	-	-
CA005	58532	2	1	5 [min] y 00 [s]
CA006	58411	4	1	5 [min] y 00 [s]
CA007	1239	1	-	-
CA008	58680	1	3	4 [min] y 01 [s]
CA009	58389	2	2	3 [min] y 55 [s]
CA010	24660	4	1	5 [min] y 00 [s]

A modo ilustración, se presentan a continuación los resultados obtenidos para el edificio con ID CA003, correspondiente a una edificación residencial de 10 pisos ubicada en Burbank, California. Este edificio presenta muros de corte prefabricados de hormigón armado en ambas direcciones y cuenta con 16 sensores distribuidos en 4 niveles instrumentados.



Figura 3: Edificio CA003 “Burbank – 10 pisos – edificio residencial”.

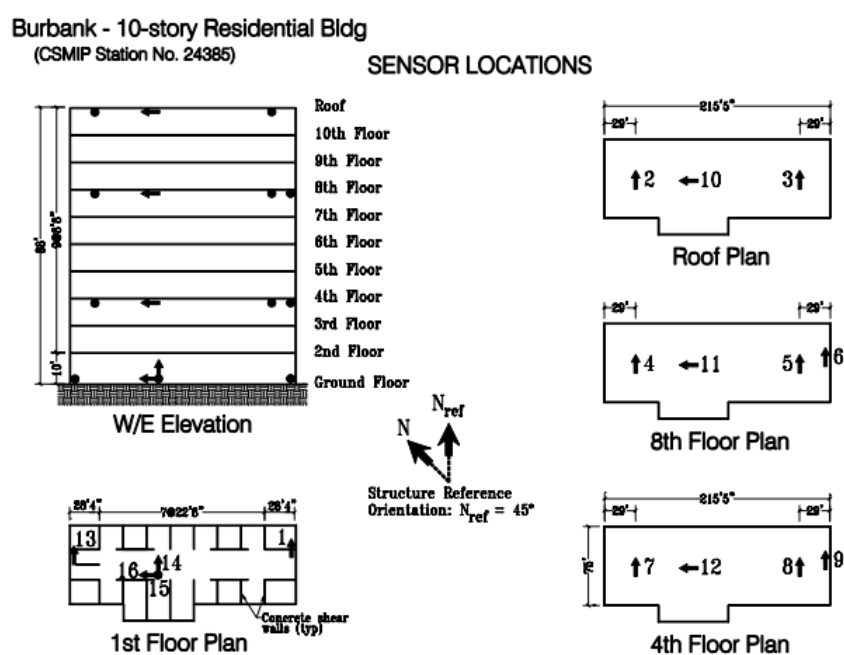


Figura 4 Edificio CA003 “Burbank – 10 pisos – edificio residencial”, distribución sensores.

Tabla 3: Edificio CA003 “Burbank – 10 pisos – edificio residencial”, características.

Número de edificio	: CA003
CSMIP	: 24385
Ubicación	: Burbank, CA
Latitud	: 34.1870 N
Longitud	: 118.3120 W.
Geología del emplazamiento	: Aluvión.
V_{s30} [m/s]	: 431
Clase del sitio	: D.
Altura [m]	: 27
N° de pisos por encima/debajo del suelo	: 10/0.
Dimensiones de la base	: 75'-3 1/2" x 215'-5".

Dimensiones típicas del piso	: Igual que las dimensiones de la base.
Fecha de diseño	: 1974
Niveles instrumentados	: 1980. 16 acelerómetros, en 4 niveles del edificio.
Materialidad	: Concreto.
Sistema de carga vertical	: Losas de hormigón prefabricadas y vertidas in situ soportadas por muros de carga de hormigón prefabricado.
Sistema de carga horizontal	: Muros de corte prefabricados de hormigón en ambas direcciones.
Tipo de fundación	: Cajones de hormigón (de 25 a 35 pies de profundidad) debajo de todos los muros de carga.
Código de diseño	: Sin información.
Tipo de uso	: Residencial.
Observaciones	: Construcción del sistema Dillon.

A partir de los registros sísmicos obtenidos para el edificio CA003, se generaron gráficos de aceleración tiempo historia de la respuesta medida por los sensores y se compararon con la respuesta predicha por el modelo, en conjunto a gráficos de espectros de aceleración de piso amortiguados al 1% (ver Figura 5) y gráficos desplazamiento relativo entre pisos (ver Figura 6). Estos gráficos se generan con la intención de evaluar el ajuste entre la respuesta observada (curva naranja) con la respuesta predicha (curva azul) y se analizó tanto para direcciones Norte-Sur (NS) y direcciones Este-Oeste (EW).

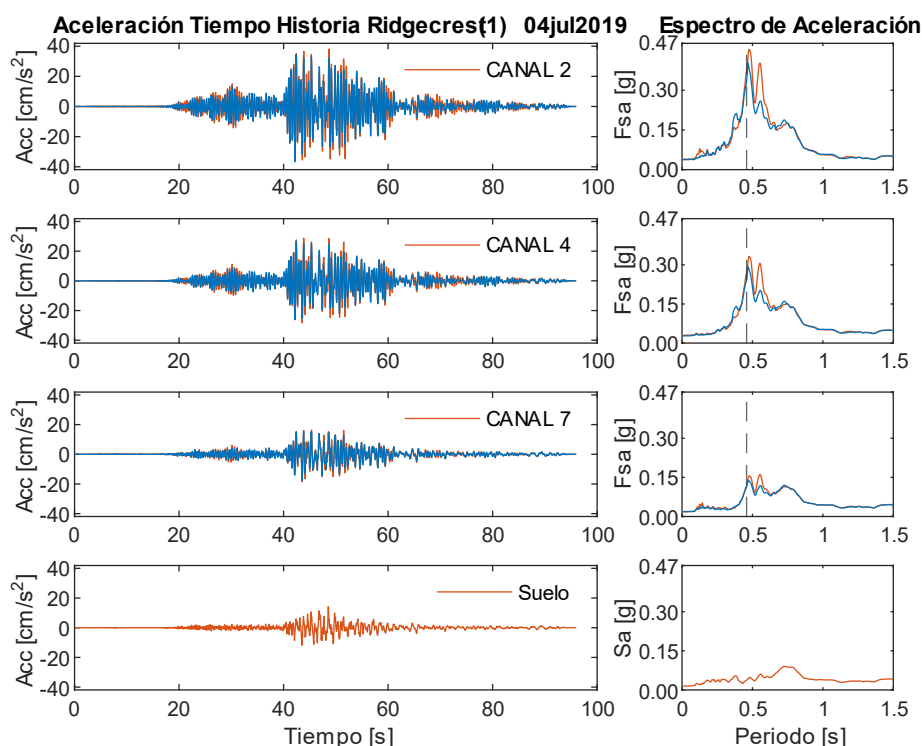


Figura 5: Aceleración total tiempo historia y espectro de aceleración ($\xi=1\%$) – CA003 – Dirección NS – Ridgecrest (1) 2019. La línea azul corresponde a la respuesta predicha. Las líneas verticales en los espectros de aceleración corresponden a los periodos identificados.

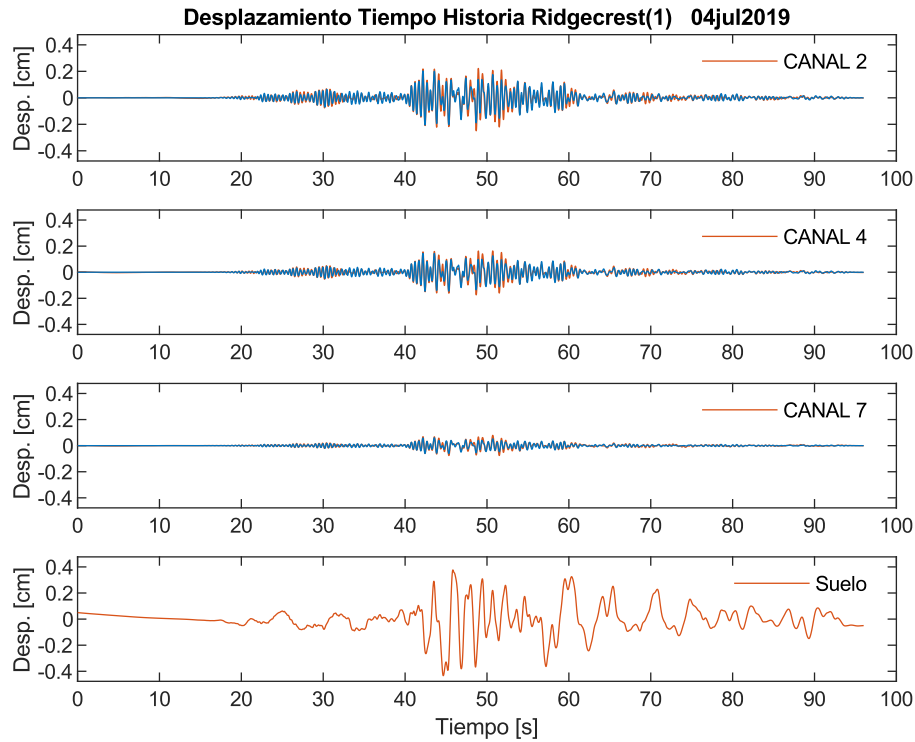


Figura 6: Desplazamiento Tiempo Historia– CA003 – Dirección NS – Ridegecrest (1) 2019. La línea azul corresponde a la respuesta predicha.

Como se puede observar de la Figura 5 y Figura 6 la respuesta predicha por el modelo reproduce de manera adecuada la respuesta que registran los sensores. Respecto a la respuesta obtenida en los espectros de aceleración, se logra identificar correctamente el valor asociado para el primer modo, siendo esto observable en la línea vertical que coincide con el primer peak. Dada esta similitud, se puede afirmar que la respuesta predicha por el sistema es correcta, ya que, los espectros de aceleración corresponden a sistemas de un solo grado de libertad, dados por la respuesta estructural del edificio analizado, por lo que su contenido en frecuencias se determina a partir de las frecuencias naturales de la estructura. Otro punto interesante que se puede observar de la Figura 6 es que la amplitud en la respuesta para los desplazamientos va aumentando a medida que aumenta la altura en la cual se ubica el sensor. Siendo esto consecuente con el comportamiento que tiene el primer modo de vibrar de una estructura.

Los resultados obtenidos para los registros sísmicos para la dirección Norte-Sur se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4: Resultados obtenidos para edificio CA003 – dirección NS.

Registro	Año	T [s]	f [Hz]	ξ	R_1	MC	ERI	PRDR
Borrego Springs	07 jul 2010	0.44	2.26	3.8%	7.70	99.53%	6.20%	5.19E-05
Granada Hills	22 ene 2020	0.43	2.30	2.1%	3.57	64.26%	2.90%	9.28E-06
Highland Park	12 ago 2024	0.45	2.20	3.1%	7.09	93.94%	2.80%	7.37E-05
Lamont	07 ago 2024	0.44	2.28	3.6%	7.26	98.66%	4.90%	2.87E-05
Malibu (1)	09 feb 2024	0.44	2.28	3.2%	6.67	75.47%	3.90%	2.44E-05
Malibu (2)	12 sep 2024	0.44	2.27	4.2%	5.98	85.68%	5.50%	1.99E-05
Ojai	20 ago 2023	0.44	2.28	2.0%	7.12	92.49%	3.00%	2.61E-05
Pacoima (1)	30 jul 2020	0.44	2.27	2.7%	6.05	56.46%	4.60%	3.12E-05
Pacoima (2)	30 jul 2020	0.44	2.29	2.3%	5.72	84.98%	2.60%	1.26E-05
Ridgecrest (1)	04 jul 2019	0.46	2.18	6.4%	8.03	99.43%	8.20%	1.70E-04
Ridgecrest (2)	06 jul 2019	0.47	2.12	5.3%	8.34	99.40%	6.80%	5.48E-04
SearlesValley (1)	04 jun 2020	0.43	2.31	2.5%	5.76	97.35%	5.00%	2.23E-05
SearlesValley (2)	05 jul 2019	0.44	2.29	3.2%	4.96	99.25%	5.90%	1.85E-05

Registro	Año	T [s]	f [Hz]	ξ	R ₁	MC	ERI	PRDR
Sierra Madre 91	28 jun 1991	0.48	2.10	4.3%	9.10	99.46%	3.20%	7.19E-04
Whittier 87	01 oct 1987	0.47	2.13	7.8%	7.47	91.23%	9.20%	5.28E-04
Whittier Narrows	16 mar 2010	0.45	2.23	2.2%	6.86	80.83%	1.80%	2.46E-05
Calexico	04 abr 2010	0.45	2.24	3.6%	6.37	99.85%	5.00%	1.07E-03
Chatsworth	09 ago 2007	0.44	2.27	2.2%	6.01	74.73%	2.00%	1.47E-05
Chinohills	29 jul 2008	0.52	1.94	4.9%	7.80	96.80%	6.10%	3.16E-04
Encino	17 mar 2014	0.47	2.13	5.7%	6.45	35.44%	12.00%	5.78E-05
Newhall	01 sept 2011	0.44	2.30	2.8%	5.89	88.67%	3.90%	1.30E-05
Northridge	17 ene 1994	0.59	1.70	8.9%	7.95	91.22%	20.80%	1.87E-03

En la Tabla 4 se puede observar que la columna 3 contiene los valores obtenidos para periodos; la columna 5 contiene los valores para las fracciones de amortiguamiento; las columnas 6, 7 y 8 contienen los valores para evaluación de la confiabilidad siendo el factor de amplificación dinámica, la contribución modal de Arias y los intervalos de confiabilidad mejorados respectivamente; y finalmente la columna 9 contiene los valores para PRDR obtenidos del análisis. Al realizar un análisis de los resultados obtenidos se observa que, para el registro de “Northridge” el valor de ERI es de un 20.8% por lo cual no cumple con el criterio de corte detallado en la Sección 3.2.3, siendo descartados sus resultados para el análisis final.

Respecto a las vibraciones ambientales se presentarán en primera instancia los resultados obtenidos para el método EFDD. En la Figura 7 se presenta la respuesta obtenida para los primeros valores singulares de la matriz PSD promediada sin filtrar a la izquierda y a la derecha con la respuesta ya filtrada.

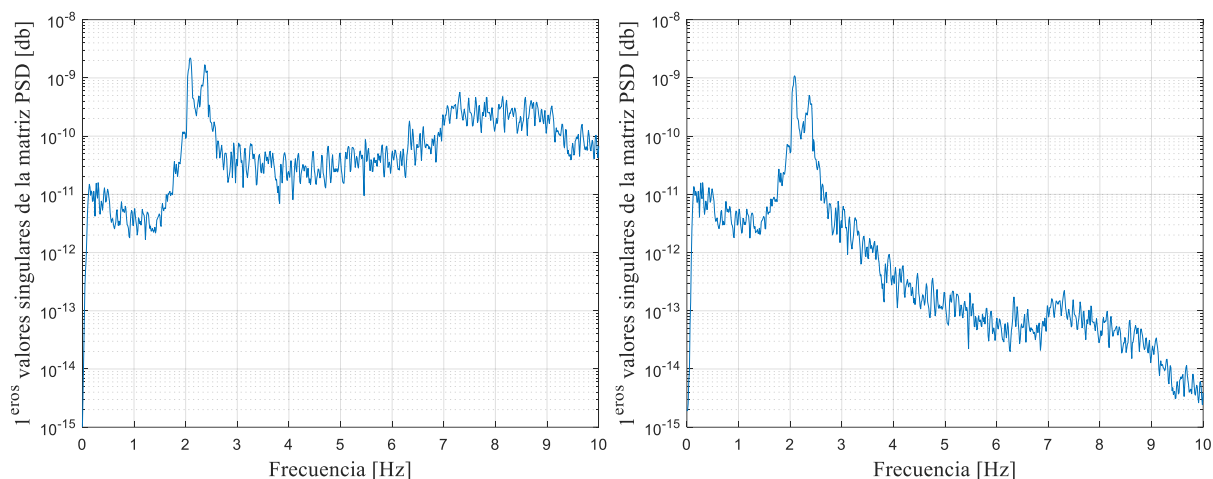


Figura 7: Primeros valores singulares de la matriz PSD promediada – CA003 – Dirección NS – Método EFDD. A la izquierda sin filtrar y a la derecha con la respuesta filtrada.

La Figura 7 muestra los primeros valores singulares de la matriz PSD, antes y después de aplicar el filtro de banda, donde se observa un peak dominante asociado al primer modo. En la Figura 8 y Figura 9 se presentan los resultados obtenidos a partir de la respuesta filtrada correspondiente al método EFDD.

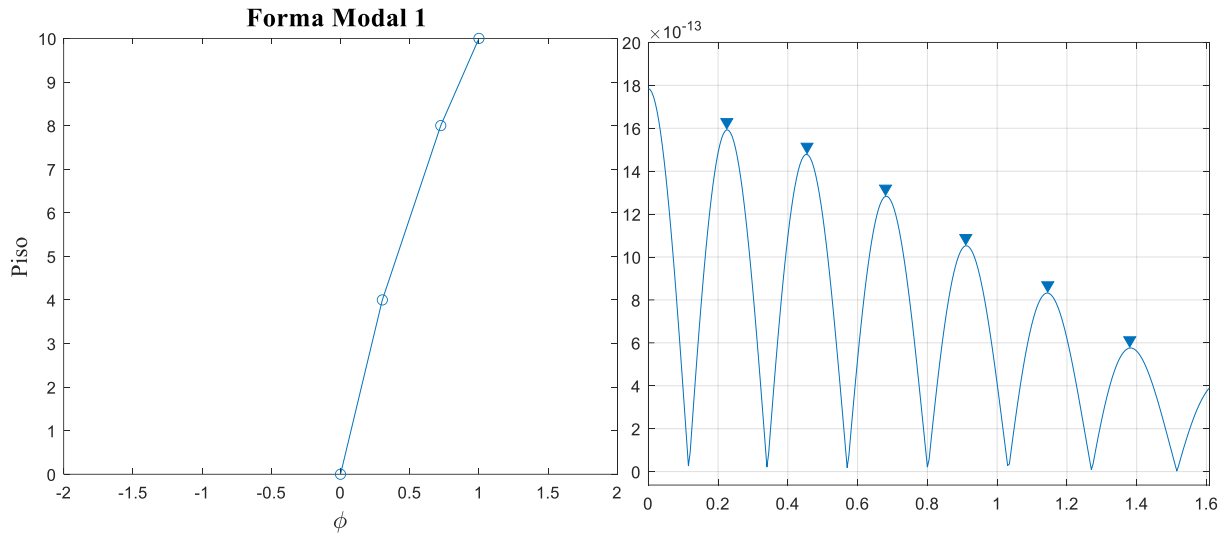


Figura 8: CA003 – Dirección NS – Método EFDD. A la izquierda primera forma modal y la derecha módulo de la función de autocorrelación filtrada en el primer modo.

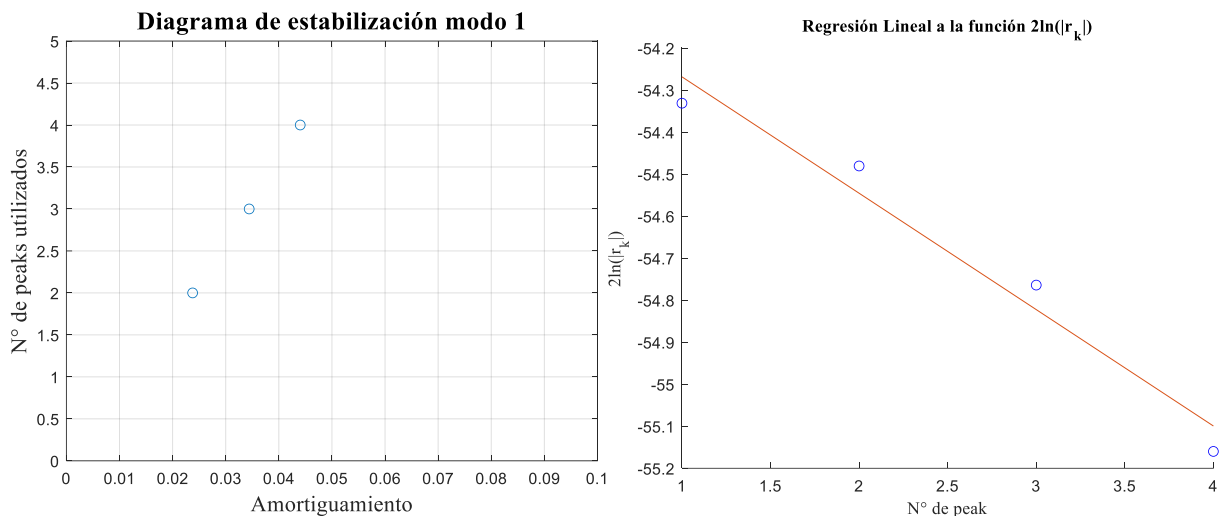


Figura 9: A la izquierda el diagrama de estabilización para el primer modo y la derecha la regresión lineal a la función $2\ln(|r_k|)$ – CA003 – Dirección NS – Método EFDD.

De los gráficos obtenidos se puede observar que la Figura 8, a su izquierda corresponde a la primera forma modal asociada a la forma típica del primer modo y la derecha presenta el módulo de la función de autocorrelación filtrada en el rango de este modo. Nótese que no está centrada en cero, ya que se aplica un ajuste en el que los peaks negativos se reflejan en la parte positiva, con el fin de aumentar el número de picos disponibles para el análisis (como se discutió en la Sección 4.1). De la Figura 9, a la izquierda, se observa que el número de peaks utilizado es de cuatro y como varía el amortiguamiento obtenido a medida que aumenta el número de peaks seleccionado, y a la derecha se obtiene la tendencia lineal a la regresión utilizada de $2\ln(|r_k|)$. Si bien los puntos no se ajustan perfectamente a la recta de tendencia, esta discrepancia se atribuye a la duración relativamente corta de los registros (5 [min] frente a los 30 [min] recomendados en la literatura). Aun así, se considera que los resultados obtenidos son aceptables para el presente análisis.

Siguiendo con lo que respecta a vibraciones ambientales y pasando al Método del decaimiento aleatorio (RD) se presenta el resultado obtenido en la Figura 10 y Figura 11.

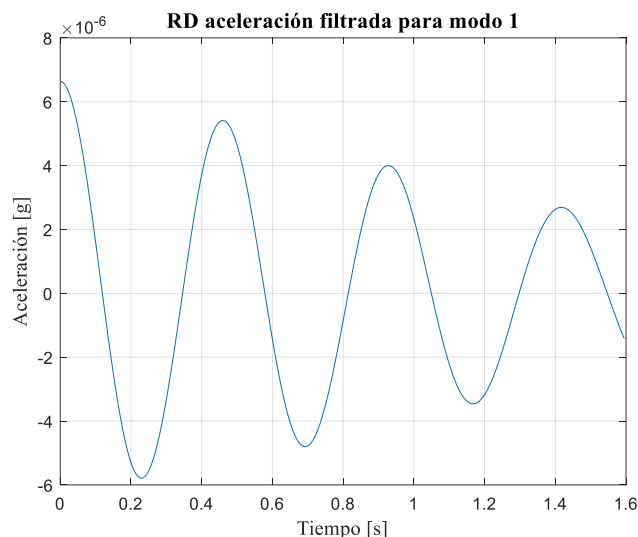


Figura 10: Señal RD resultante para aceleración filtrada – CA003 – Dirección NS – Método EFDD.

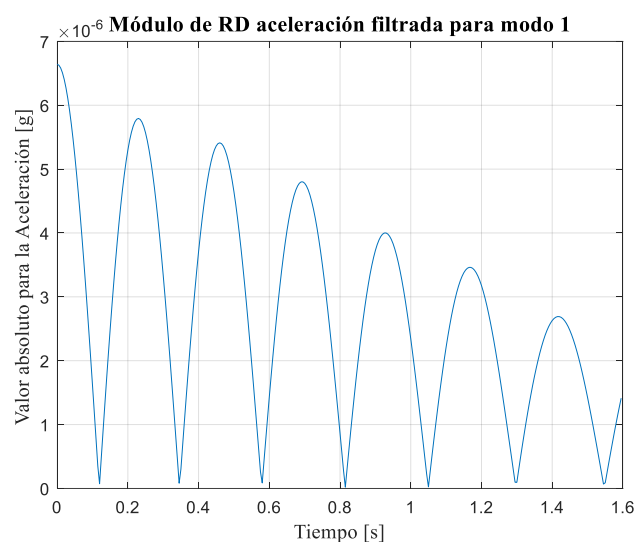


Figura 11: Módulo para señal RD resultante para aceleración filtrada – CA003 – Dirección NS – Método EFDD.

En la Figura 10 se presenta la señal de Random Decrement (RD) filtrada para el modo 1, que evidencia un comportamiento oscilatorio amortiguado. A partir del espaciamiento entre máximos sucesivos se obtiene el periodo fundamental del modo. En la Figura 11 se muestra el módulo de dicha señal, el cual facilita la identificación de la envolvente decreciente. Sobre esta curva se aplica el método del decaimiento logarítmico, lo que permite estimar la fracción de amortiguamiento correspondiente al modo en análisis. Finalmente, los valores obtenidos para ambos métodos se presentan en la Tabla 5 y en la Tabla 6, correspondientes al método EFDD y RD respectivamente.

Tabla 5: Resultados obtenidos para edificio CA003 – dirección NS – Método EFDD.

Registro vibración ambiental	T [s]	f [Hz]	ξ	PRDR
EFDD - 2019-08-05_1859PDT	0.48	2.08	2.83%	1.00E-06
EFDD - 2019-08-06_0659PDT	0.43	2.33	3.71%	1.28E-06
EFDD - 2019-08-06_1159PDT	0.48	2.08	3.41%	7.65E-07

Tabla 6: Resultados obtenidos para edificio CA003 – dirección NS – Método RD.

Registro vibración ambiental	T [s]	f [Hz]	ξ	PRDR
RD - 2019-08-05_1859PDT	0.46	2.17	3.63%	1.00E-06

Registro vibración ambiental	T [s]	f [Hz]	ξ	PRDR
RD - 2019-08-06_0659PDT	0.44	2.27	5.17%	1.28E-06
RD - 2019-08-06_1159PDT	0.46	2.17	3.61%	7.65E-07

Los resultados obtenidos en la Tabla 5 y en la Tabla 6 sirven para comparar la respuesta entregada por ambos métodos, si bien, como un primer análisis se puede observar que las respuestas tienden a ser similares en los periodos obtenidos, al analizar todos los edificios, se llega al resultado de que la respuesta obtenida por el método RD, tiende a ser más similar a los resultados en los registros sísmicos, en relación con el amortiguamiento. Esto tiene sentido, ya que el método EFDD no fue implementado para detectar valores de amortiguamiento, si no, que para detectar el valor del periodo. Es por ello por lo que, a modo de presentación de resultados, solo se seleccionará el mejor registro de vibración ambiental asociado al método RD, descartando todos aquellos que presenten valores alejados a la respuesta sísmica o sean parte del método EFDD. Esto no quiere decir que un método sea mejor sobre otro, sino, que para efectos de esta investigación se seleccionó el método RD.

Finalmente, a partir de los datos obtenidos en la respuesta predicha y al pasar por la Evaluación de confiabilidad y sumado al dato obtenido para vibraciones ambientales, se obtienen los resultados para el edificio CA003, que se presentan en la Tabla 7 y Tabla 8 para las direcciones Norte-Sur y Este-Oeste respectivamente.

Tabla 7: Resultados finales obtenidos para edificio CA003 – dirección NS.

Registro	Año	T [s]	ξ	PRDR
Borrego Springs	07 jul 2010	0.44	3.75%	5.19E-05
Granada Hills	22 ene 2020	0.43	2.08%	9.28E-06
Highland Park	12 ago 2024	0.45	3.08%	7.37E-05
Lamont	07 ago 2024	0.44	3.56%	2.87E-05
Malibu (1)	09 feb 2024	0.44	3.25%	2.44E-05
Malibu (2)	12 sep 2024	0.44	4.16%	1.99E-05
Ojai	20 ago 2023	0.44	1.96%	2.61E-05
Pacoima (1)	30 jul 2020	0.44	2.75%	3.12E-05
Pacoima (2)	30 jul 2020	0.44	2.33%	1.26E-05
Ridgecrest (1)	04 jul 2019	0.46	6.43%	1.70E-04
Ridgecrest (2)	06 jul 2019	0.47	5.30%	5.48E-04
Searles Valley (1)	04 jun 2020	0.43	2.49%	2.23E-05
Searles Valley (2)	05 jul 2019	0.44	3.23%	1.85E-05
Sierra Madre 91	28 jun 1991	0.48	4.26%	7.19E-04
Whittier 87	01 oct 1987	0.47	7.77%	5.28E-04
Whittier Narrows	16 mar 2010	0.45	2.16%	2.46E-05
Calexico	04 abr 2010	0.45	3.57%	1.07E-03
Chatsworth	09 ago 2007	0.44	2.20%	1.47E-05
Chinohills	29 jul 2008	0.52	4.87%	3.16E-04
Encino	17 mar 2014	0.47	5.75%	5.78E-05
Newhall	01 sep 2011	0.44	2.78%	1.30E-05
RD 03 - 2019-08-06_1159PDT	06 ago 2019	0.46	3.61%	7.65E-07

Tabla 8: Resultados finales obtenidos para edificio CA003 – dirección EW.

Registro	Año	T [s]	ξ	PRDR
Borrego Springs	07 jul 2010	0.49	4.85%	4.43E-05
Granada Hills	22 ene 2020	0.47	2.13%	7.03E-06
Highland Park	12 ago 2024	0.50	4.26%	5.46E-05
Lamont	07 ago 2024	0.47	3.89%	2.47E-05
Malibu (1)	09 feb 2024	0.47	3.12%	1.75E-05
Malibu (2)	12 sep 2024	0.48	4.03%	2.53E-05
Ojai	20 ago 2023	0.48	3.40%	3.08E-05
Pacoima (1)	30 jul 2020	0.48	3.31%	1.65E-05
Pacoima (2)	30 jul 2020	0.47	2.01%	7.90E-06
Ridgecrest (1)	04 jul 2019	0.52	5.71%	3.89E-04

Registro	Año	T [s]	ξ	PRDR
Ridgecrest (2)	06 jul 2019	0.53	5.04%	7.81E-04
Searles Valley (1)	04 jun 2020	0.48	3.98%	4.46E-05
Searles Valley (2)	05 jul 2019	0.49	4.25%	2.91E-05
Sierra Madre 91	28 jun 1991	0.52	4.95%	4.27E-04
Whittier Narrows	16 mar 2010	0.49	3.62%	2.17E-05
Calexico	04 abr 2010	0.50	3.98%	6.28E-04
Chatsworth	09 ago 2007	0.48	3.03%	1.33E-05
Chinohills	29 jul 2008	0.55	4.74%	2.25E-04
Encino	17 mar 2014	0.52	4.43%	8.75E-05
Newhall	01 sept 2011	0.47	2.56%	8.56E-06
Northridge	17 ene 1994	0.60	6.27%	1.44E-03
RD - 2019-08-06_1159PDT	06 ago 2019	0.46	1.76%	1.94E-06

Como se puede observar de la Tabla 7 y de la Tabla 8 de los 22 registros sísmicos analizados, 21 de ellos cumplen con las pruebas de confiabilidad y de las 3 vibraciones ambientales evaluadas se optó por ocupar el tercer registro de la Tabla 6 correspondiente al método RD. Este caso es muy favorable, ya que cuenta con un gran número de datos para analizar. Sin embargo, no todos los edificios instrumentados analizados cuentan con una cantidad de datos suficientes que cumplan con los criterios de confiabilidad. A continuación, se detalla el caso del edificio CA010, las características se presentan en Apéndice 1 - Tabla A. 14.



Figura 12: Edificio CA010 “Los Angeles – 73 pisos – edificio residencial/oficinas”.

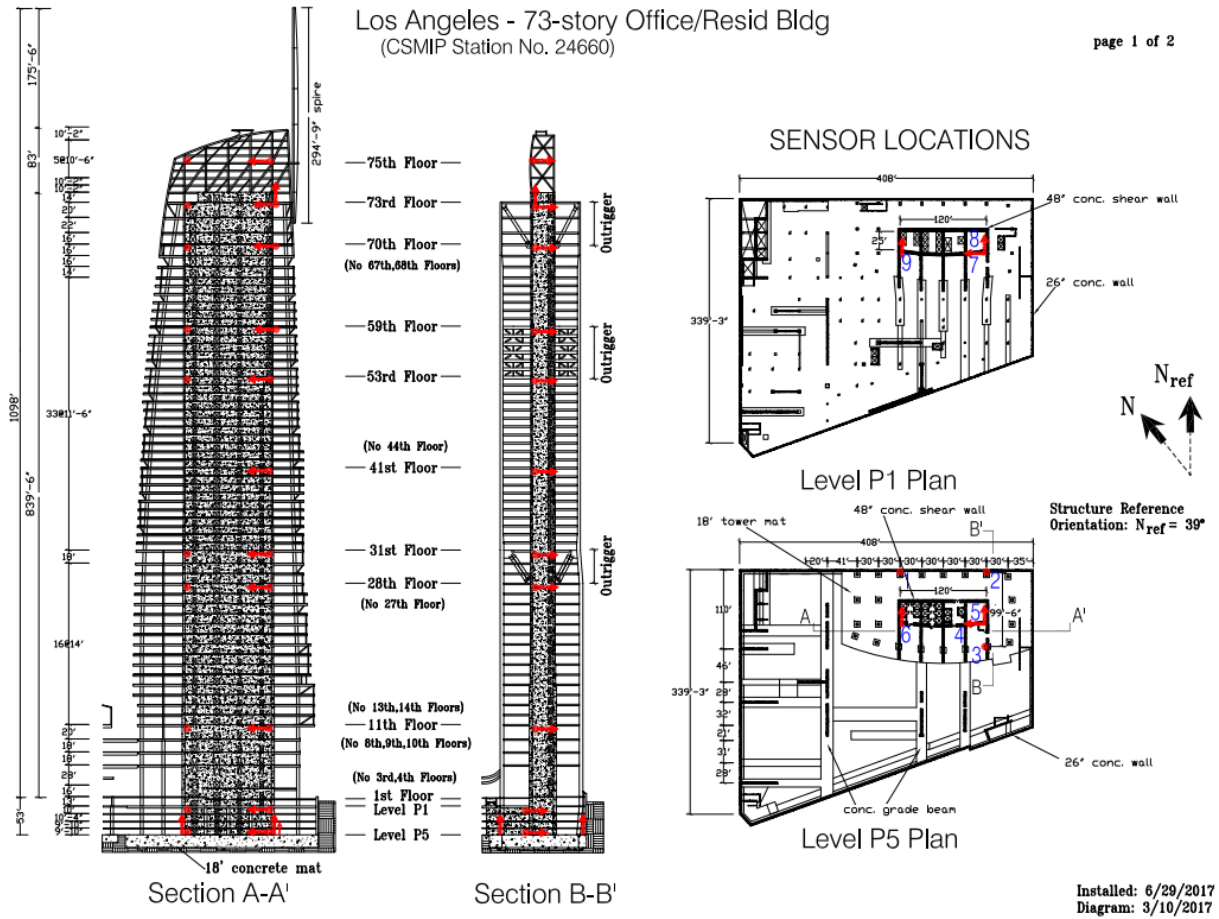
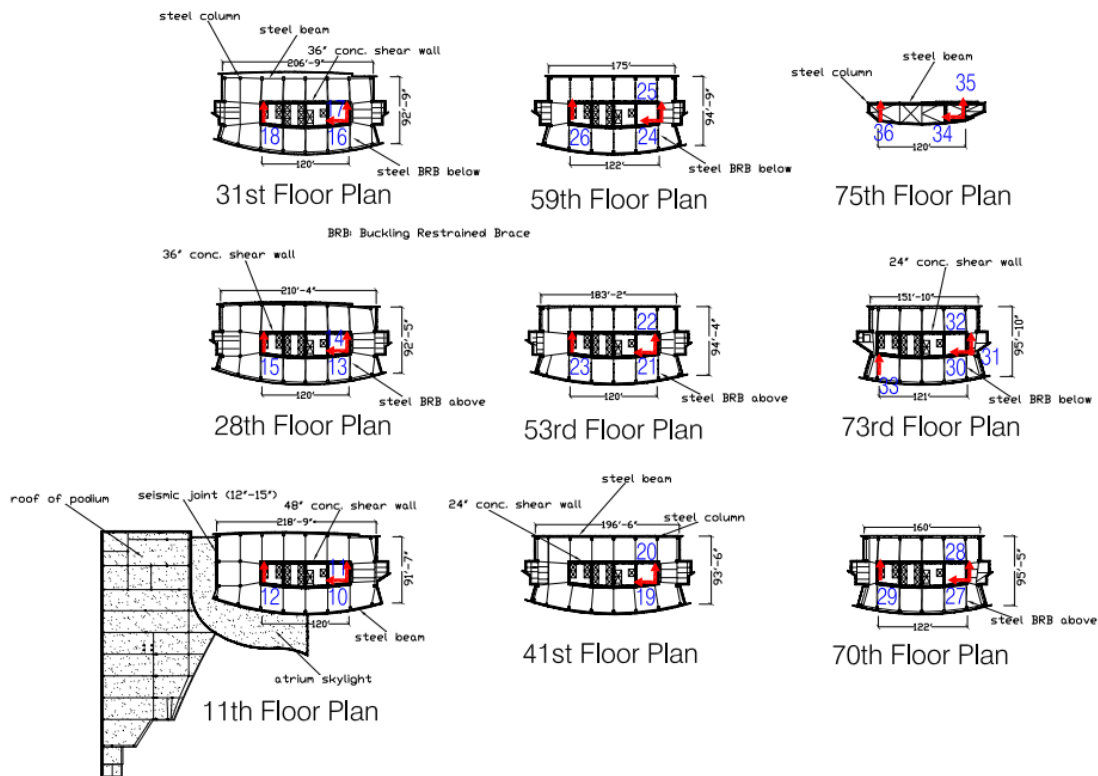


Figura 13: Edificio CA010 “Los Angeles – 73 pisos – edificio residencial/oficinas, características – parte 1/2.



Installed: 6/29/2017
Diagram: 3/10/2017

Figura 14: Edificio CA010 “Los Angeles – 73 pisos – edificio residencial/oficinas, características – parte 2/2.

Tabla 9: Resultados finales obtenidos para edificio CA010 – dirección NS.

Registro	Año	T [s]	ξ	PRDR
Ridgecrest (1)	06 jul 2019	6.48	1.28%	7.00E-04
Ridgecrest (2)	04 jul 2019	6.32	1.06%	1.43E-04
RD 01 - 2017-09-21_1629PDT	21 sep 2017	6.09	0.13%	1.02E-06

Tabla 10: Resultados finales obtenidos para edificio CA010 – dirección EW.

Registro	Año	T [s]	ξ	PRDR
Ridgecrest (1)	06 jul 2019	3.72	1.73%	3.03E-04
Ridgecrest (2)	04 jul 2019	3.63	1.46%	1.57E-04
RD 01 - 2017-09-21_1629PDT	21 sep 2017	3.46	0.75%	1.92E-07

Como se puede apreciar en la Tabla 9 y Tabla 10 de los cuatro registros sísmicos analizados, solo 2 cumplieron con los criterios de confiabilidad aplicados. En el Apéndice 1 se presentan los resultados para todos los edificios. Existe un caso para vibraciones ambientales correspondientes al edificio CA009 (ver detalles en Apéndice 1 - Tabla A. 13) en la dirección EW en el que amortiguamiento obtenido es mucho mayor que el registrado en la dirección NS y en los registros sísmicos (ver Tabla 11 y Tabla 12). Esto se debe a que en la parte superior del edificio se encuentra situado un amortiguador de masa líquida que sirve para reducir los movimientos inducidos por el viento, en la dirección EW, lo cual genera una amplificación en el resultado del amortiguamiento para vibraciones ambientales.

Tabla 11: Resultados finales obtenidos para edificio CA009 – dirección NS.

Registro	Año	T [s]	ξ	PRDR
South Napa	24 ago 2014	3.43	1.65%	6.26E-05
RD - 2012-12-28_5AM	28 dic 2012	3.30	1.19%	1.01E-07

Tabla 12: Resultados finales obtenidos para edificio CA009– dirección EW.

Registro	Año	T [s]	ξ	PRDR
South Napa	24 ago 2014	3.92	3.52%	9.82E-05
RD - 2012-12-28_5AM	28 dic 2012	3.66	20.63%	3.11E-07

5.2 Dependencia de la amplitud

Una vez analizados los resultados para cada uno de los edificios presentados en la Tabla 2, se procede a evaluar la dependencia de la amplitud, como se explica en la Sección 4.2, utilizando únicamente los resultados que cumplen con los criterios de confiabilidad y el resultado asociado a la vibración ambiental. Siguiendo la evidencia reciente de la memoria de Espinoza (2025), desarrollada en el marco del proyecto FONDECYT N°11230258, se adopta una forma funcional logarítmica con componente exponencial para capturar el incremento inicial y la posterior saturación del parámetro modal con la amplitud medida como PRDR. La forma funcional empleada se presenta a continuación:

$$Y = A \cdot \ln(x) \cdot e^{-B \cdot x} + C \quad (46)$$

Donde Y corresponde al parámetro modal; x a la deriva de techo (PRDR); y A, B, C son valores constantes específicas para cada conjuntos de datos analizados. Esta forma ha mostrado una alta capacidad de ajuste entre alternativas probadas (Espinoza, 2025), reproduciendo el aumento dominante a bajas amplitudes (principalmente para $PRDR < 10^{-4}$) y la posterior saturación de la tendencia. En esta memoria se utiliza la misma forma funcional, permitiendo que el parámetro B se estime libremente (con $B \geq 0$), de modo que el término $e^{-B \cdot x}$ modele la atenuación de la pendiente a medida que aumenta la amplitud.

A continuación, se presentan las curvas ajustadas y la dispersión de datos para los edificios CA001 (ver de la Figura 15 a la Figura 18), CA002 (ver de la Figura 19 a la Figura 22) y CA003 (ver de la Figura 23 a la Figura 24) seleccionados, ya que contienen cuatro o más datos para su análisis y evidencian lo descrito en el párrafo anterior, para el resto de edificios este análisis no fue posible ya que no cuentan con cuatro más datos que cumplan con el criterio de análisis, de igual forma sus resultado se presentan en la Sección de Apéndice 1.

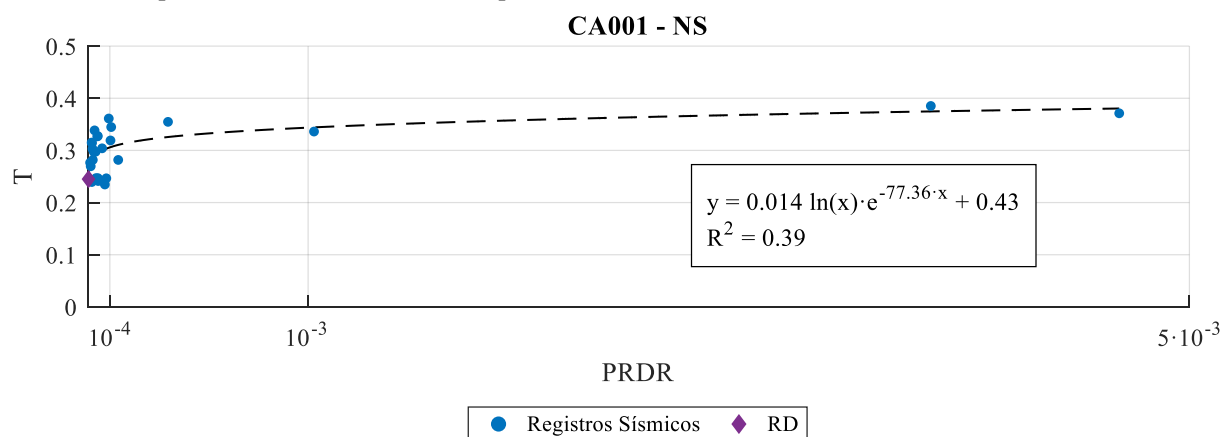


Figura 15: Periodo vs PRDR – CA001 – Dirección NS.

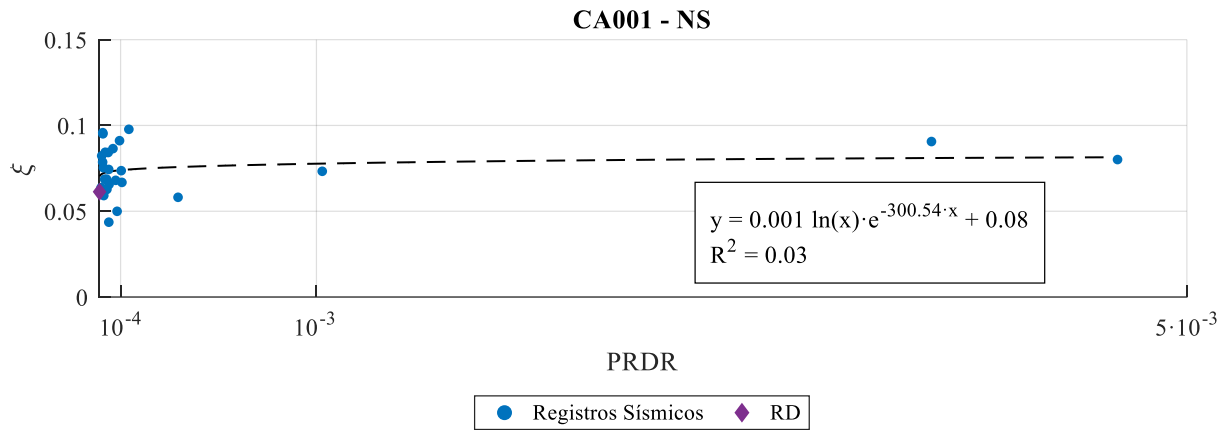


Figura 16: Fracción de amortiguamiento vs PRDR – CA001 – Dirección NS.

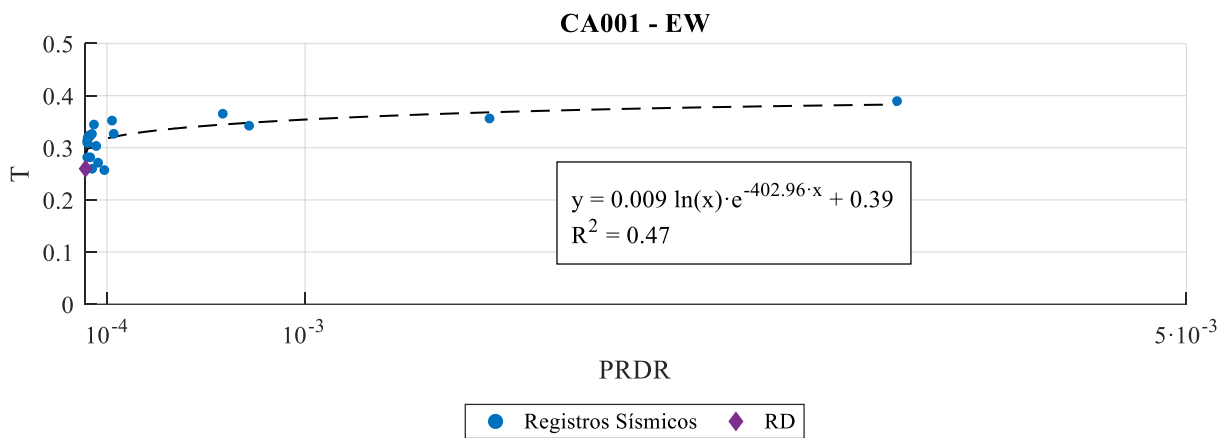


Figura 17: Periodo vs PRDR – CA001 – Dirección EW.

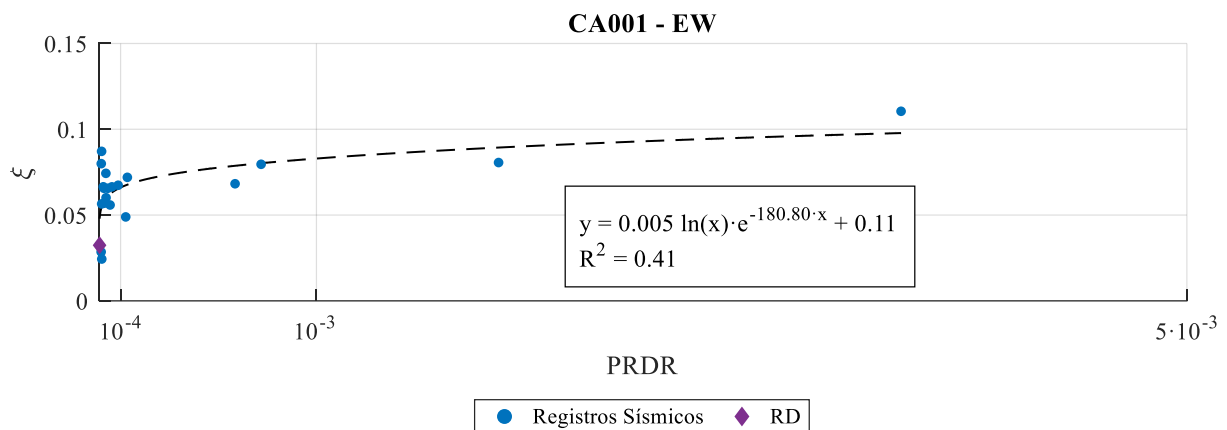


Figura 18: Fracción de amortiguamiento vs PRDR – CA001 – Dirección EW.

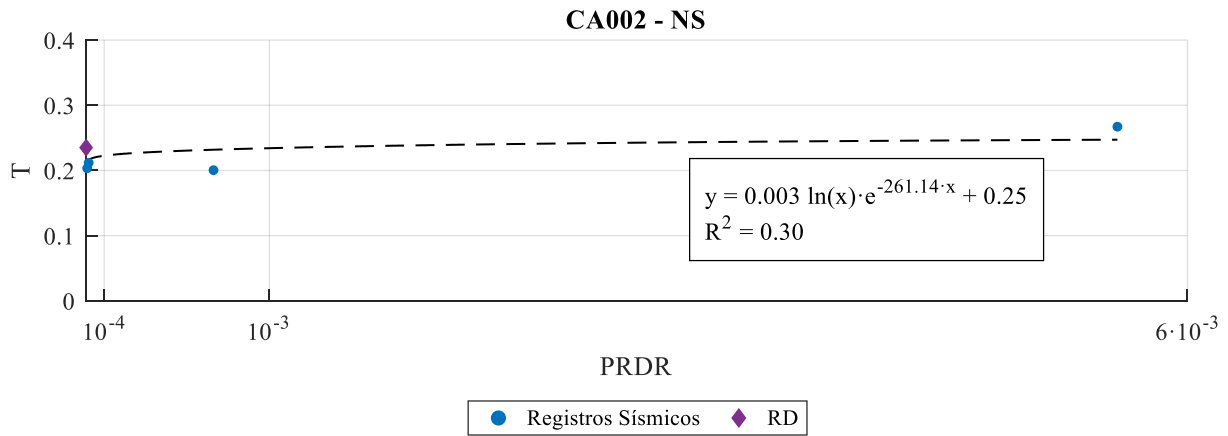


Figura 19: Periodo vs PRDR – CA002 – Dirección NS.

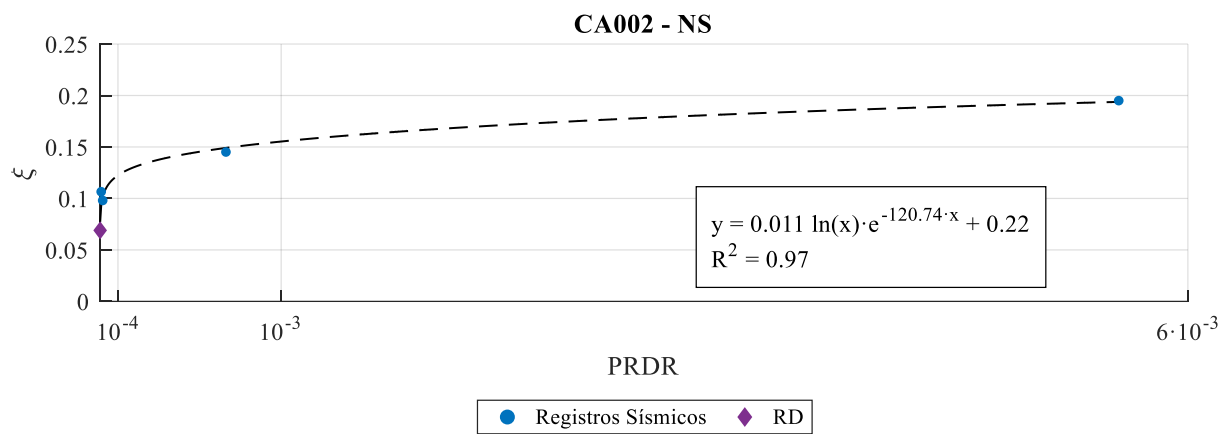


Figura 20: Fracción de amortiguamiento vs PRDR – CA002 – Dirección NS.

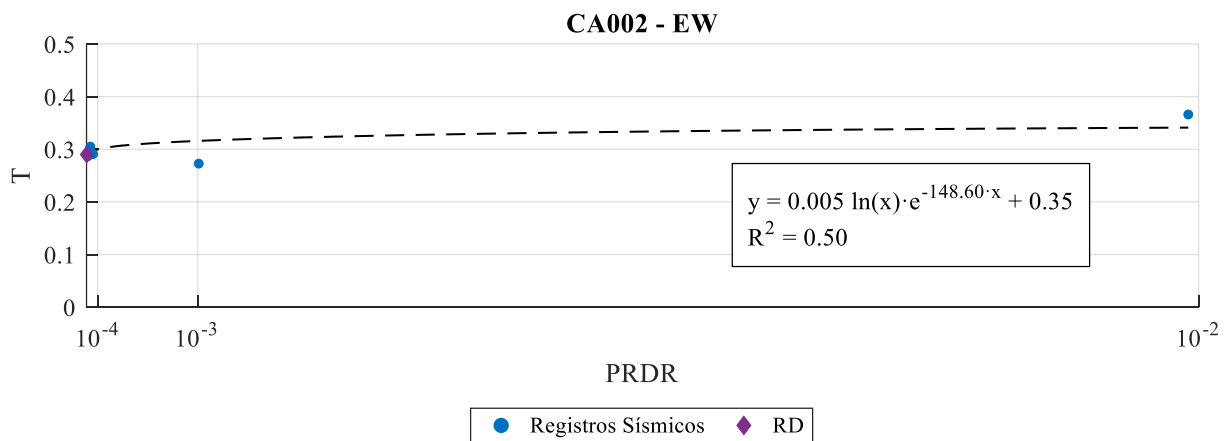


Figura 21: Periodo vs PRDR – CA002 – Dirección EW.

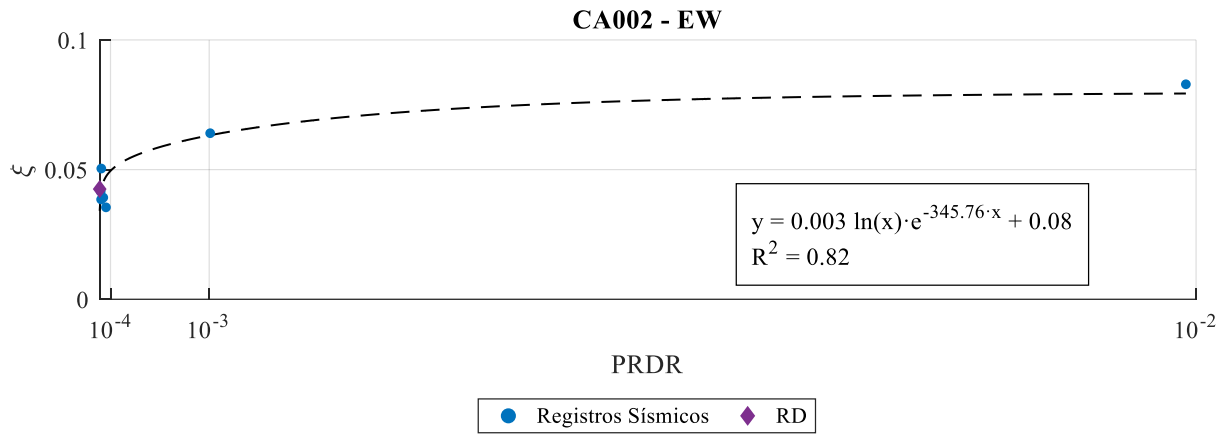


Figura 22: Fracción de amortiguamiento vs PRDR – CA002 – Dirección EW.

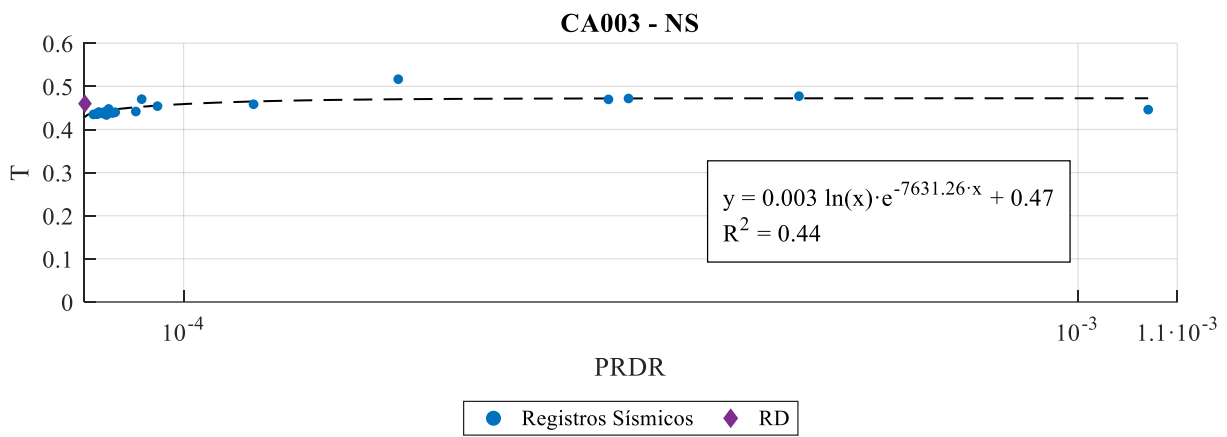


Figura 23: Periodo vs PRDR – CA003 – Dirección NS.

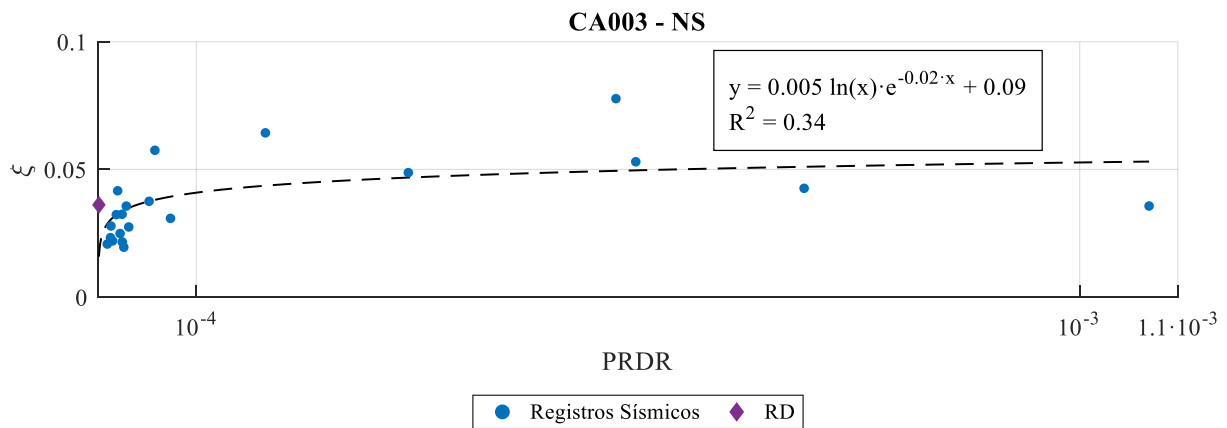


Figura 24: Fracción de amortiguamiento vs PRDR – CA003 – Dirección NS.

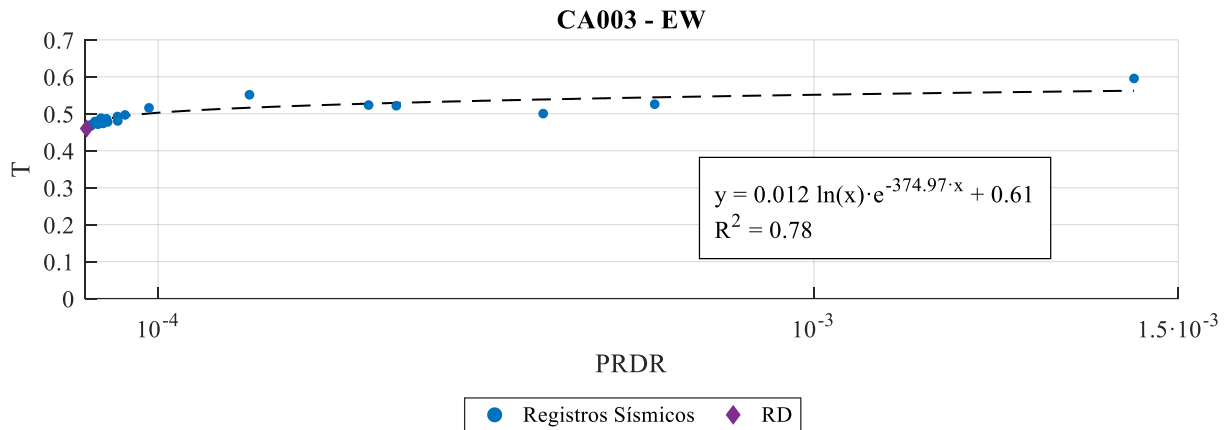


Figura 25: Periodo vs PRDR – CA003 – Dirección EW.

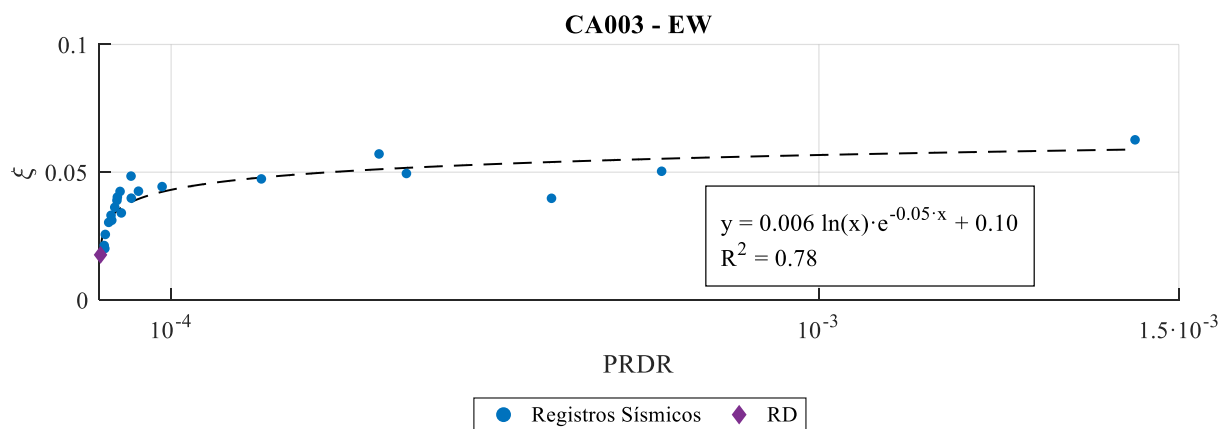


Figura 26: Fracción de amortiguamiento vs PRDR – CA003 – Dirección EW.

De la Figura 15 a la Figura 26 se observa que la mayor parte de los datos se concentran en un rango de PRDR del orden de 10^{-4} , con algunos registros que alcanzan valores de 10^{-3} y 10^{-2} según edificio y dirección. A medida que aumenta la amplitud (PRDR), el periodo fundamental T tiende a crecer suavemente, mientras que la fracción de amortiguamiento ξ presenta un aumento más marcado; en ambos casos la pendiente se atenúa para demandas mayores, mostrando saturación del crecimiento dentro del rango analizado. Esta descripción se limita a lo observado en los datos y es consecuente con lo esperado en la literatura.

El punto correspondiente al registro de vibraciones ambientales se ubica, como se esperaba, en el extremo inferior del eje PRDR (cercano a 0). En algunos casos aparece levemente separado del inicio de la curva, lo que puede relacionarse con la duración de ciertos registros ambientales y/o con diferencias metodológicas respecto a los registros sísmicos. Como se menciona en la Sección 4.2, los registros analizados no superaran un tiempo de 5 minutos, siendo 30 minutos o más el tiempo recomendado. El parámetro que más se ve afectado en la estimación, es la fracción de amortiguamiento, lo cual se apoya en la forma de las curvas y en la inspección de los datos obtenidos por edificio y dirección.

Múltiples variables pueden influir en el comportamiento de las propiedades modales de un edificio con la amplitud del movimiento. Por ejemplo, edificios de diferente materialidad, altura, geometría, y sistema estructural podrían presentar un comportamiento diferente. Por ejemplo, para el edificio CA003, la Figura 23 y Figura 24 muestran un coeficiente de determinación R^2 bajo para la dirección NS, mientras que la Figura 25 y Figura 26 presentan un valor más alto para la dirección EW. En contraste, para el edificio CA001, de la Figura 15 a la Figura 18 se presentan valores bajos de R^2 en ambas direcciones, aunque mantienen la forma esperada en la curva de PRDR, sugiriendo que la dispersión de los datos afecta más a la calidad del ajuste que a la tendencia general. Si se contara con

un mayor número de edificios, se podría evaluar estadísticamente la influencia de estas variables, sin embargo, esto no está dentro del alcance de este trabajo.

Para facilitar la comparación entre edificios, se aplica una normalización de los datos. Dicha normalización consiste en evaluar la Ecuación (46) de la regresión del valor del parámetro modal de interés (periodo o fracción de amortiguamiento) en un valor de referencia $PRDR = 10^{-4}$. Esta magnitud fue seleccionada debido al estudio realizado por Espinoza (2025), en la cual un 89% de las direcciones analizadas presentan valores de PRDR entre los órdenes de magnitud 10^{-5} y 10^{-4} , por lo que 10^{-4} se encuentra en el dominio observado, lo que evita la necesidad de la extrapolación y según los resultados obtenidos en esta investigación es aplicable a los casos analizados. A partir de esta evaluación, se obtuvieron los parámetros normalizados T_{ref} y ξ_{ref} , los cuales se presentan en las Figura 27 y Figura 28 para los edificios CA001, CA002 y CA003, en ambas direcciones principales.

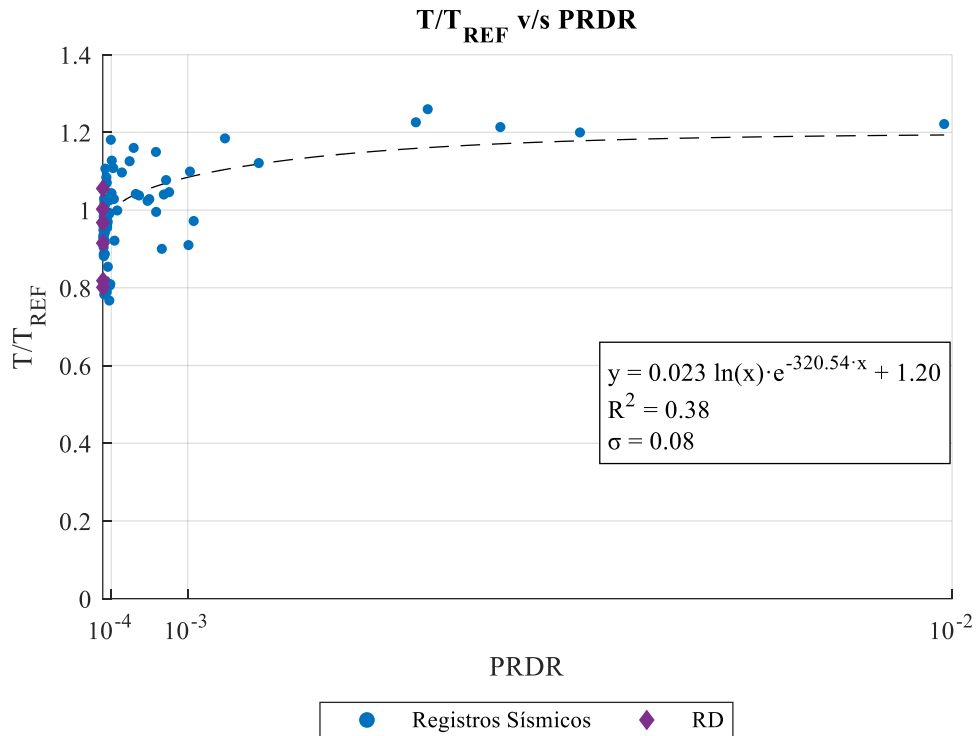


Figura 27: Periodo normalizado v/s PRDR para todas las direcciones.

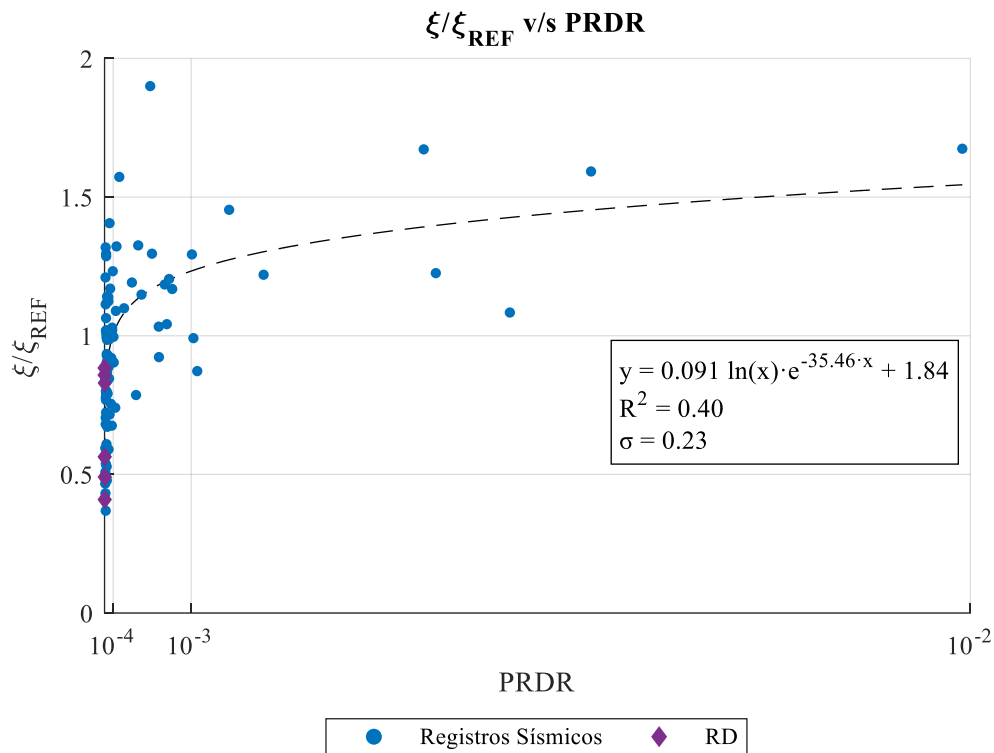


Figura 28: Fracción de amortiguamiento normalizado v/s PRDR para todas las direcciones.

En las Figura 27 y Figura 28 se observa que, tanto el periodo como la fracción de amortiguamiento tienden a aumentar con el valor de PRDR, especialmente en un rango inferior a 10^{-4} . A partir de dicho umbral, la tendencia muestra una saturación, evidenciando una menor sensibilidad del parámetro modal frente a incrementos adicionales de amplitud.

Si bien los datos presentan cierta dispersión, atribuible a la presencia de valores atípicos (*outliers*), esta situación se aborda mediante la aplicación del Método de outliers: Método 1.5 IQR sobre los residuos obtenidos del ajuste. Los resultados corregidos tras aplicar este procedimiento se presentan en las Figura 29 y Figura 30.

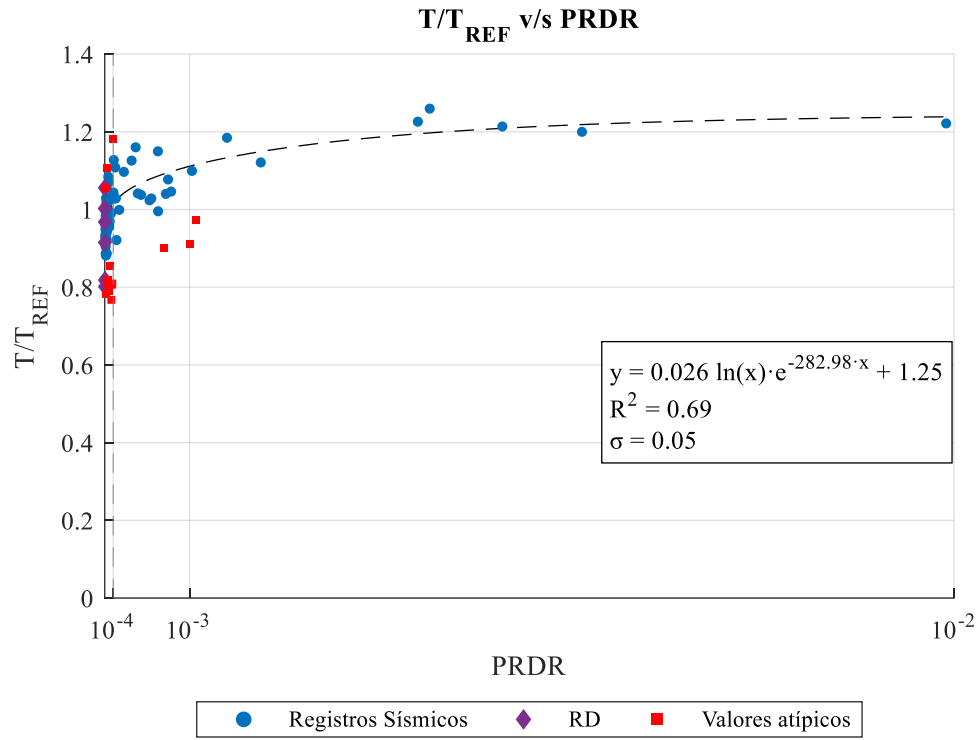


Figura 29: Periodo normalizado v/s PRDR para todas las direcciones, aplicando método 1.5 IQR. La línea vertical corresponde a PRDR = 10^{-4} .

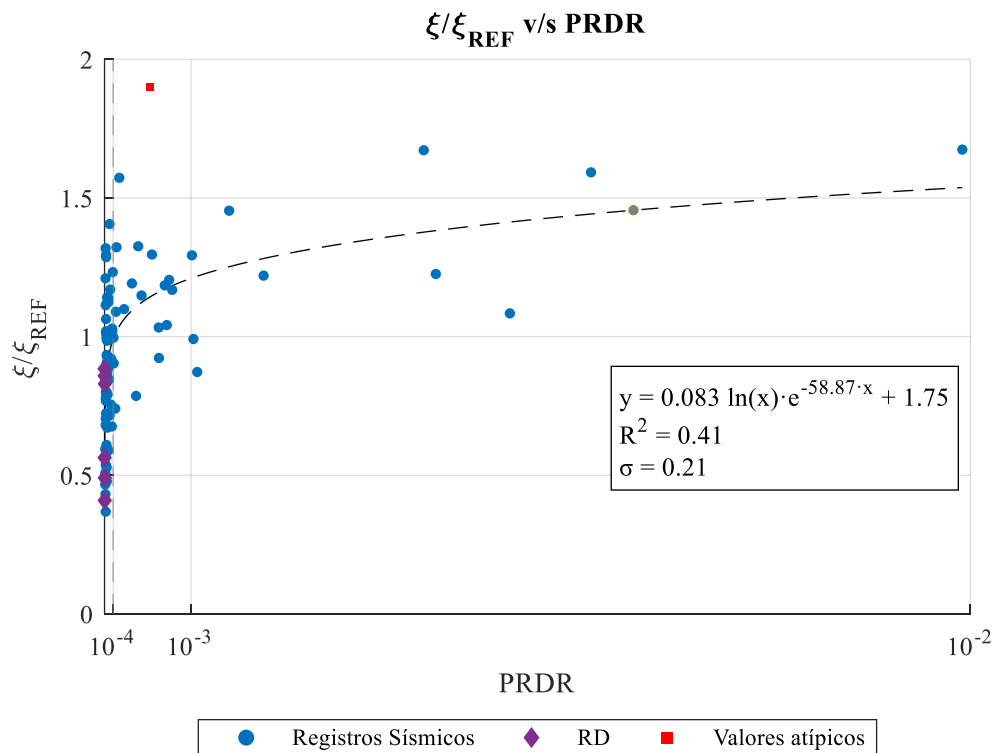


Figura 30: Fracción de amortiguamiento normalizado v/s PRDR para todas las direcciones, aplicando método 1.5 IQR. La línea vertical corresponde a PRDR = 10^{-4} .

En la Figura 29, correspondiente al análisis del periodo normalizado, se observa que la aplicación del método 1.5 IQR sobre los residuales del ajuste generó un aumento en el coeficiente de determinación R^2 , desde 0.38 a 0.69 y una disminución en la desviación estándar de los residuales σ , de 0.08 a 0.05. En la Figura 30, asociada al amortiguamiento, también se evidencian mejoras en ambos indicadores, aunque de menor magnitud en comparación con el caso anterior, 0.40 a 0.41 para R^2 y de 0.23 a 0.21 para σ .

Esta diferencia puede explicarse por la mayor presencia de valores atípicos en los datos de periodo, los cuales se alejan significativamente del grupo principal. En contraste, los valores de amortiguamiento presentan una menor dispersión, lo que implica un número más reducido de *outliers* identificables por el método.

Si bien podría afirmarse que el periodo presenta una mayor variabilidad inherente en su estimación, es importante considerar que el método 1.5 IQR se aplica directamente sobre los residuales del ajuste. Por ello, resulta más estricto en casos donde la variabilidad es baja, generando intervalos más acotados entre el primer y tercer cuartil. Para ilustrar esta diferencia de comportamiento en los residuos, se presentan las Figura 31 y Figura 32.

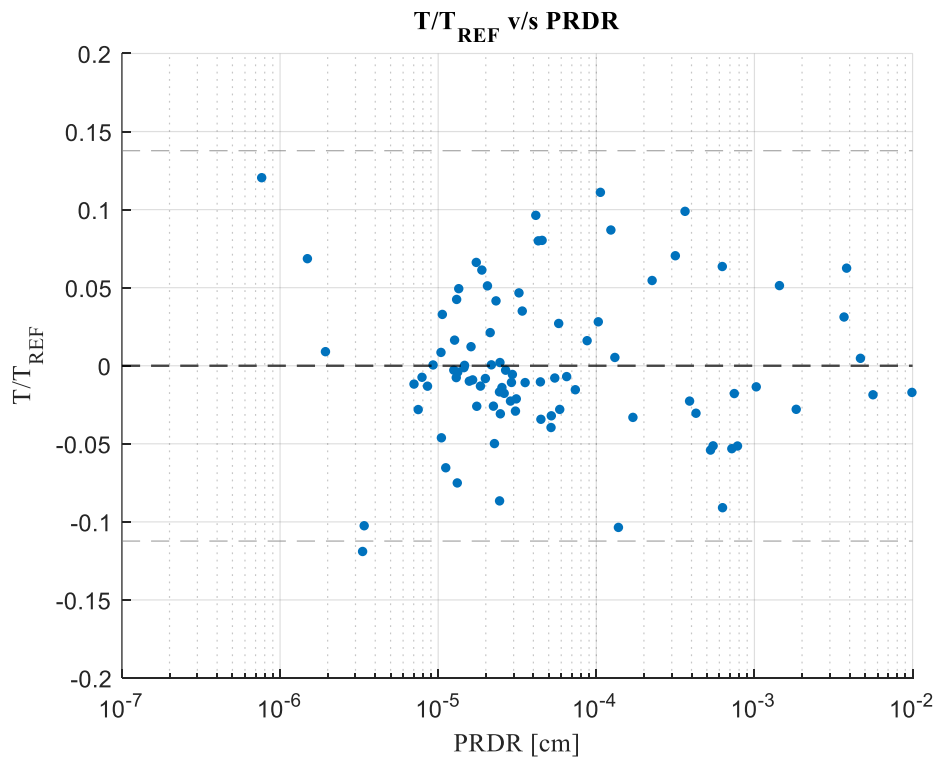


Figura 31: Aplicación del método 1.5 IQR sobre residuales del periodo normalizado para todas las direcciones.

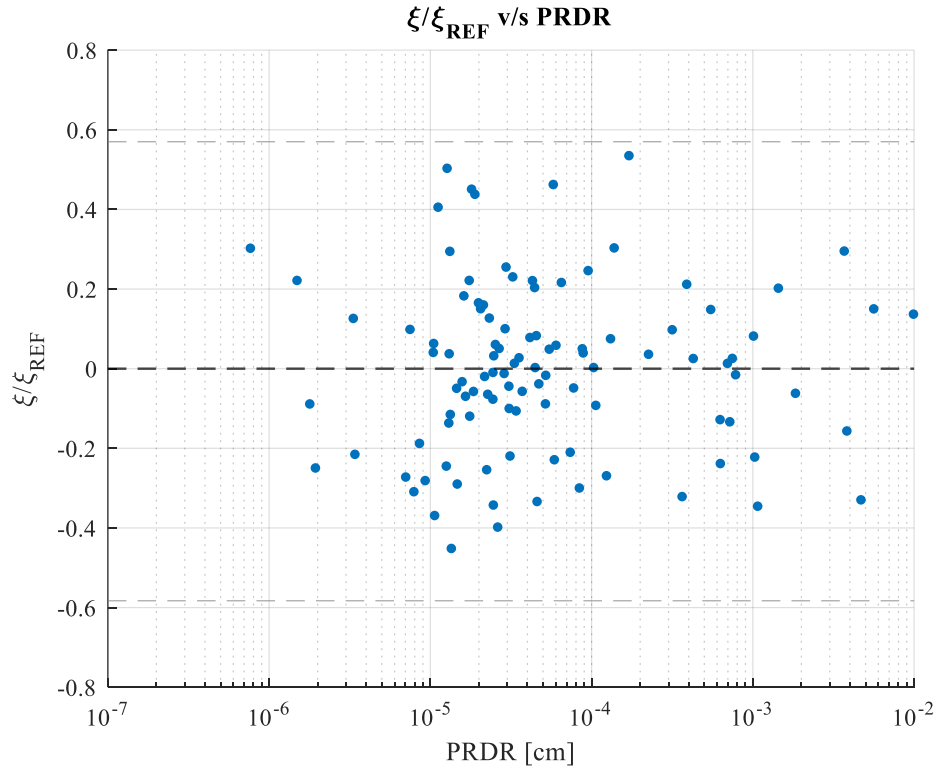


Figura 32: Aplicación del método 1.5 IQR sobre residuales de la fracción de amortiguamiento normalizado para todas las direcciones.

Se observa que, en el caso de los periodos, el intervalo intercuartílico resultante es más estrecho que el correspondiente a las fracciones de amortiguamiento. En consecuencia, el método 1.5 IQR tolera una menor diferencia entre el valor observado y el ajustado antes de considerar un punto como atípico. Esta diferencia en la sensibilidad del método frente a cada parámetro justifica la discriminación observada en la detección de *outliers*.

Esto dado que los periodos tienden a presentar variaciones más perceptibles ante cambios relativamente pequeños en la amplitud estructural, mientras que las fracciones de amortiguamiento son más difíciles de estimar con precisión, tanto en registros de vibraciones ambientales como en registros sísmicos, se considera aceptable para esta investigación el comportamiento diferencial del método. Esta distinción permite interpretar adecuadamente la dispersión de los resultados obtenidos.

5.3 Comparación con otros estudios

Al comparar los resultados obtenidos en este trabajo con los reportados por Cruz & Miranda (2021), se observa una concordancia cualitativa en la forma de la relación entre la amplitud de la respuesta (PRDR) y los parámetros modales. En ambos trabajos, el periodo fundamental y la fracción de amortiguamiento presentan un aumento marcado a bajas amplitudes (PRDR del orden de 10^{-4}) y, a medida que la amplitud aumenta, la pendiente se atenúa mostrando una tendencia a la saturación. Este patrón se observa en las curvas para los edificios CA001, CA002 y CA003 y también en las figuras ilustrativas de Cruz & Miranda (2021) (ver Figura 33), que corresponden a edificios analizados individualmente, donde T/T_0 y ξ/ξ_0 crecen rápido a baja amplitud y luego tienden a estabilizarse.

Existen, no obstante, diferencias metodológicas que condicionan la comparación cuantitativa. En Cruz & Miranda (2021) se normalizan los valores de periodo y fracción de amortiguamiento respecto del menor valor de PRDR disponible por cada edificio y dirección, definidos como T_0 y ξ_0 (ver Figura 33). Este criterio introduce ciertas limitaciones al momento de comparar distintos edificios entre sí, o incluso distintas direcciones dentro de un mismo edificio, ya que no existe un valor de referencia

común para todos los casos. Como resultado, la dispersión aparente en los datos se ve incrementada, especialmente en aquellos edificios que cuentan con un número reducido de registros, donde el valor mínimo de PRDR disponible puede ser relativamente alto debido a la ausencia de eventos de baja amplitud. Para abordar esta limitación, en la presente investigación se adoptó un referencia común fijando un valor de $PRDR = 10^{-4}$ para normalizar los parámetros modales, el cual se considera representativo dentro del rango de datos observados, facilitando la comparación transversal entre edificios y direcciones dentro del presente conjunto de datos. No obstante, se reconoce que esta elección es específica para el presente análisis, y no se plantea como un estándar general aplicable a todos los casos.

Adicionalmente, en este trabajo se incorporan registros de vibración ambiental para reforzar el extremo de muy baja amplitud, lo que hace más visible el tramo inicial de crecimiento en las curvas o como punto inicial de referencia en la curva. El estudio de Cruz & Miranda (2021) se basa exclusivamente en respuestas sísmicas, por lo que el arranque de las curvas no siempre se aproxima tanto al límite inferior de PRDR. Estas diferencias en la estrategia de normalización y en el conjunto de registros explican parte de las discrepancias en magnitud y en dispersión entre ambos resultados, sin alterar la coincidencia en la tendencia general.

En síntesis, la relación entre PRDR y los parámetros modales observada en esta memoria reproduce el patrón descrito por Cruz & Miranda (2021): crecimiento marcado a bajas amplitudes y atenuación de la pendiente hacia una meseta. Las diferencias en magnitud y en dispersión se entienden principalmente por los criterios de normalización (mínimo PRDR por edificio/dirección versus referencia común $PRDR = 10^{-4}$) y por la inclusión de registros de vibración ambiental en el presente estudio. Por ello, las comparaciones cuantitativas directas entre coeficientes deben interpretarse con cautela. Ampliar la base de edificios y mantener un criterio de referencia común puede permitir reducir la incertidumbre y fortalecer estas conclusiones en trabajos futuros.

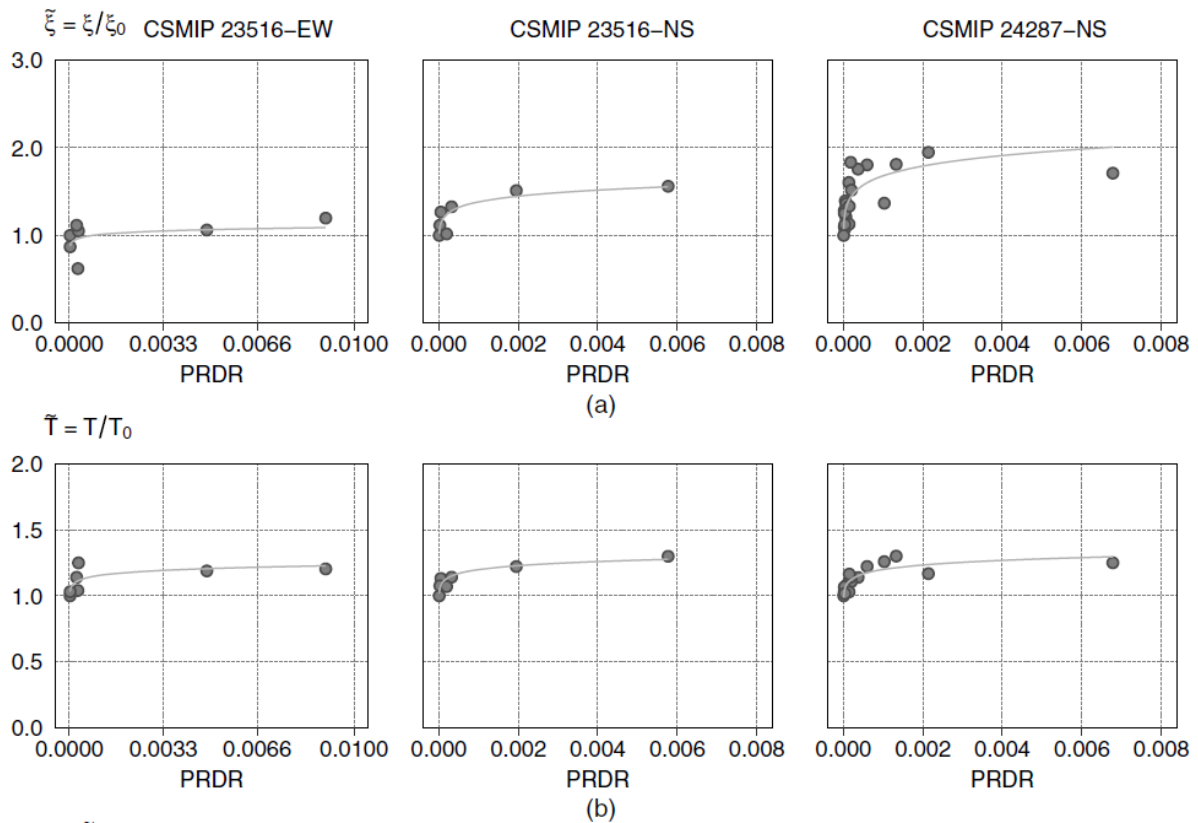


Figura 33: Ejemplo de tres componentes de edificios con puntos de datos que cubren un amplio rango de amplitudes: (a) relación de amortiguación normalizada inferida en función de la relación de desplazamiento máximo del techo; (b) período normalizado inferido en función de la relación de desplazamiento máximo del techo, (Cruz & Miranda, 2021).

6 Conclusiones

Durante el desarrollo de esta investigación se estudió el comportamiento de parámetros modales, como el periodo y la fracción de amortiguamiento, en función de la amplitud de respuesta estructural, expresada mediante el desplazamiento máximo de techo normalizado (PRDR), considerando tanto registros de vibraciones ambientales como sísmicos. Los resultados presentados se enmarcan bajo el supuesto de que todas las estructuras analizadas se mantienen en el régimen lineal-elástico durante la totalidad de los eventos registrados.

A continuación, se presentan las principales conclusiones obtenidas:

1. De los edificios CA001, CA002 y CA003, y en ambas direcciones el análisis reveló que el periodo fundamental y la fracción de amortiguamiento presentan un aumento a bajas amplitudes (PRDR del orden de 10^{-4}) y que, al crecer la amplitud, la pendiente se atenúa, evidenciando un comportamiento de saturación dentro del rango de datos disponible. Esta tendencia fue consistente a nivel de edificio y dirección, aunque con magnitudes diferentes entre casos, lo que refleja la composición específica de registros y el rango de PRDR cubierto por cada uno, fenómeno consistente con lo reportado en la literatura como meseta de alta amplitud.
2. La forma funcional $Y = A \cdot \ln(x) \cdot e^{-B \cdot x} + C$ (con $Y \in \{T, \xi\}$ y $x = PRDR$) reprodujo adecuadamente el alza inicial y la posterior estabilización en los conjuntos estudiados para esta investigación. Añadiendo un aporte en el marco de investigación de este proyecto.
3. Para facilitar la comparación entre edificios y direcciones, se normalizaron los parámetros modales usando una referencia común en $PRDR = 10^{-4}$. Además, se incorporaron registros de vibración ambiental para describir con mayor detalle el tramo de muy baja amplitud (cercano a $PRDR \approx 0$), aportando observaciones al inicio de la curva y manteniendo su continuidad en ese rango. A diferencia de Cruz & Miranda (2021), donde el nivel de referencia varía entre casos, este criterio permite una lectura más homogénea de las tendencias. Aun así, se concluye que, la forma general de la relación (alza inicial y posterior saturación) coincide con lo observado por los autores y la falta de correlación presentada en Cruz & Miranda (2021) se debe a la normalización aplicada.

7 Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se proponen las siguientes recomendaciones para futuros trabajos que busquen profundizar en el análisis de parámetros modales en edificaciones sometidas a excitaciones sísmicas y ambientales:

1. Ampliar la base de datos sísmica: Se sugiere incorporar nuevos registros sísmicos, especialmente en aquellos edificios que actualmente cuentan con una cantidad limitada de datos. Idealmente, estos registros deberían provenir de eventos de mayor magnitud, capaces de excitar de forma más significativa los modos de vibración principales, sin descartar el valor informativo de sismos de menor intensidad.
2. Extender la duración de los registros ambientales: Para futuras investigaciones, se recomienda emplear registros de vibraciones ambientales con una duración mínima de 30 minutos. Esto permitiría evaluar la estabilidad de los parámetros modales estimados y contrastar los resultados con aquellos obtenidos en este estudio, los cuales se basaron en registros de corta duración (menores a cinco minutos).
3. Para el uso de métodos en vibraciones ambientales los métodos EFDD y RD se recomienda considerarlos como complementarios. La concordancia con parámetros derivados de registros sísmicos varió entre edificios y direcciones. Futuros trabajos deberían evaluar sistemáticamente la consistencia de ambos métodos utilizando registros ambientales de mayor duración (≥ 30 min) antes de priorizar uno sobre otro.

8 Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) mediante el proyecto FONDECYT de Iniciación No. 11230258. Se agradece el financiamiento otorgado para el desarrollo de esta investigación. Los registros utilizados en este trabajo se obtuvieron del Center for Engineering Strong Motion Data (CESMD). Se agradece el trabajo de instrumentación y mantención de los equipos, así como el procesamiento y divulgación de los registros.

Se agradece a Daniel Rodrigo Contreras Inostroza y Lorena Alejandra Gómez Miranda, por su constante apoyo y ayuda durante estos 6 años de carrera, sin ustedes este logro no sería posible, muchas gracias.

9 Referencias

- Beck, J. L., & Jennings, P. C. (1980). Structural identification using linear models and earthquake records. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 8(2), 145–160. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290080205>
- Bernal, D., Döhler, M., Kojidi, S. M., Kwan, K., & Liu, Y. (2015). First Mode Damping Ratios for Buildings. *Earthquake Spectra*, 31(1), 367–381. <https://doi.org/10.1193/101812EQS311M>
- Brincker, R., Zhang, L., & Andersen, P. (2000). Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition. *IMAC 18 : Proceedings of the International Modal Analysis Conference (IMAC), San Antonio, Texas, USA, February 7-10, 2000*, 18, 625–630.
- Celebi, M., Phan, L. T., & Marshall, R. D. (1993). Dynamic characteristics of five tall buildings during strong and low-amplitude motions. *The Structural Design of Tall Buildings*, 2(1), 1–15. <https://doi.org/10.1002/tal.4320020102>
- Cole, JR., H. (1968, April 1). On-the-line analysis of random vibrations. *9th Structural Dynamics and Materials Conference*. <https://doi.org/10.2514/6.1968-288>
- Cole Jr, H. A. (1973). *On-line failure detection and damping measurement of aerospace structures by random decrement signatures*.
- Cruz, C., & Miranda, E. (2017). Evaluation of Damping Ratios for the Seismic Analysis of Tall Buildings. *Journal of Structural Engineering*, 143(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001628](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001628)
- Cruz, C., & Miranda, E. (2019). Reliability of damping ratios inferred from the seismic response of buildings. *Engineering Structures*, 184, 355–368. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.056>
- Cruz, C., & Miranda, E. (2021). Damping Ratios of the First Mode for the Seismic Analysis of Buildings. *Journal of Structural Engineering*, 147(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002873](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002873)
- Espinoza, E. (2025). *Estimación de los parámetros modales de un conjunto de edificios en California a partir de su respuesta sísmica y su correlación con la amplitud*. UTFSM.
- Fang, J. Q., Li, Q. S., Jeary, A. P., & Liu, D. K. (1999). Damping of tall buildings: its evaluation and probabilistic characteristics. *The Structural Design of Tall Buildings*, 8(2), 145–153. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1794\(199906\)8:2<145::AID-TAL127>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1794(199906)8:2<145::AID-TAL127>3.0.CO;2-1)
- Goel, R. K., & Chopra, A. K. (1997). Period Formulas for Moment-Resisting Frame Buildings. *Journal of Structural Engineering*, 123(11), 1454–1461. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:11\(1454\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:11(1454))
- Haviland, R. (1976). A study of the uncertainties in the fundamental translational periods and damping values for real buildings. *Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Constructed Facilities Division*.
- I. Besoain. (2024). *Evaluación del método del decaimiento aleatorio para estimar las fracciones de amortiguamiento y periodos modales de una estructura experimental a partir de registros de vibraciones ambientales*. UTFSM.
- Jeary, A. P. (1986). Damping in tall buildings—a mechanism and a predictor. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 14(5), 733–750. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290140505>
- Kareem, A., & Gurley, K. (1996). Damping in structures: its evaluation and treatment of uncertainty. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 59(2–3), 131–157. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(96\)00004-9](https://doi.org/10.1016/0167-6105(96)00004-9)

- Li, Q. S., Liu, D. K., Fang, J. Q., Jeary, A. P., & Wong, C. K. (2000). Damping in buildings: its neural network model and AR model. *Engineering Structures*, 22(9), 1216–1223. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(99\)00050-4](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(99)00050-4)
- Miranda, E., Bantis, J., Heresi, P., & Poulos, A. (2024). Novel framework for regional seismic analysis. *Proc. 18th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Poulos, A., & Miranda, E. (2024). Accounting for ground motion directionality in regional seismic risk assessment. *Proc. 18th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Rodrigues, J., & Brincker, R. (2005). Application of the random decrement technique in operational modal analysis. *Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference, April 26-27, 2005, Copenhagen, Denmark*, 191–200.
- S. Martínez. (2024). *Evaluación del método de descomposición en el dominio de la frecuencia (FDD) para estimar las propiedades modales de una estructura experimental a partir de registros de vibraciones ambientales*. UTFSM.
- Spence, S. M. J., & Kareem, A. (2014). Tall Buildings and Damping: A Concept-Based Data-Driven Model. *Journal of Structural Engineering*, 140(5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000890](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000890)
- Tukey J. W. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley.
- Yang, J. C. S., Dagalak, N. G., Everstine, G. C., & Wang, Y. F. (1983). Measurement of structural damping using the random decrement technique. *Shock and Vibration Bulletin*, 53(4), 63–71.

A. Apéndice 1

En esta Sección se presentarán los resultados obtenidos para los sismos que han pasado las pruebas de confiabilidad, en conjunto al resultado obtenido para el dato de vibración ambiental asociado al método EFDD y sus respectivas curvas de PRDR, si estás se han podido construir.

Tabla A. 1: Resultados finales obtenidos para edificio CA001 – dirección NS.

Registro	Año	T [s]	ξ	PRDR
Bayside	04 abr 2022	0.27	8.23%	1.32E-05
Ferndale (10)	30 sep 2023	0.34	6.68%	1.06E-04
Ferndale (3)	04 feb 2010	0.32	7.36%	1.03E-04
Ferndale (7)	20 dic 2022	0.39	9.06%	3.83E-03
Ferndale (9)	21 mar 2023	0.33	7.44%	4.54E-05
Fortuna (1)	23 oct 2022	0.28	5.91%	2.27E-05
Hydesville (1)	20 dic 2022	0.34	6.25%	3.07E-05
Hydesville (3)	24 dic 2022	0.31	9.51%	1.89E-05
McKinleyville	13 ago 2023	0.30	7.53%	2.13E-05
Petrolia	16 oct 2023	0.33	8.42%	4.30E-05
RioDell (2)	04 abr 2022	0.28	6.38%	1.05E-05
RioDell (3)	01 ene 2023	0.36	9.11%	9.51E-05
Bayview	11 oct 2013	0.30	8.65%	6.49E-05
Bluelake	21 jul 2016	0.35	5.81%	3.64E-04
Crescentcity	14 jun 2005	0.23	6.80%	7.73E-05
Ferndale (1)	26 feb 2007	0.25	5.00%	8.40E-05
Ferndale (2)	09 ene 2010	0.37	8.01%	4.68E-03
Ferndale (4)	17 dic 2013	0.30	6.86%	2.67E-05
Ferndale (5)	09 mar 2014	0.34	7.33%	1.03E-03
Ferndale (6)	28 jul 2017	0.30	8.44%	2.95E-05
Ferndale (8)	20 dic 2022	0.32	7.86%	1.74E-05
Ferndaleoffshore	08 dic 2016	0.28	9.77%	1.38E-04
Humboldthill	02 ago 2013	0.30	6.87%	3.55E-05
Petroliaoffshore	26 oct 2008	0.24	9.58%	1.80E-05
Trinidad (1)	24 jun 2007	0.25	4.36%	4.59E-05
Trinidad (2)	16 ago 2008	0.25	6.28%	3.71E-05
Willowcreek	29 abr 2008	0.24	6.56%	4.71E-05
RD - 2019-08-01_2359PDT	01 ago 2019	0.25	6.13%	3.33E-06

Tabla A. 2: Resultados finales obtenidos para edificio CA001 – dirección EW.

Registro	Año	T [s]	ξ	PRDR
Bayside	04 abr 2022	0.28	8.00%	1.12E-05
Ferndale (3)	04 feb 2010	0.33	7.20%	1.31E-04
Ferndale (7)	20 dic 2022	0.39	11.05%	3.69E-03
Ferndale (9)	21 mar 2023	0.33	7.43%	3.24E-05
Fortuna (2)	27 ene 2023	0.32	2.44%	1.35E-05
Humbold Hill	16 oct 2023	0.31	8.71%	1.27E-05
Hydesville (1)	20 dic 2022	0.34	6.56%	4.14E-05
Hydesville (2)	21 dic 2022	0.31	2.85%	1.06E-05
Hydesville (3)	24 dic 2022	0.32	6.65%	2.05E-05
Petrolia	16 oct 2023	0.32	6.56%	2.32E-05
Rio Dell (3)	01 ene 2023	0.35	4.89%	1.24E-04
Bayview	11 oct 2013	0.30	5.59%	5.17E-05
Bluelake	21 jul 2016	0.37	6.82%	6.26E-04
Ferndale (1)	26 feb 2007	0.27	6.64%	6.01E-05
Ferndale (2)	09 ene 2010	0.36	8.06%	1.84E-03
Ferndale (5)	09 mar 2014	0.34	7.96%	7.46E-04
Ferndale (6)	28 jul 2017	0.28	5.69%	2.45E-05
Ferndale (8)	20 dic 2022	0.32	5.65%	1.31E-05
Trinidad (2)	16 ago 2008	0.26	6.01%	3.32E-05
Willowcreek	29 abr 2008	0.26	6.74%	8.86E-05

Registro	Año	T [s]	ξ	PRDR
RD - 2019-08-01_2359PDT	01 ago 2019	0.26	3.24%	3.40E-06

Tabla A. 3: Resultados finales obtenidos para edificio CA002 – dirección NS.

Registro	Año	T [s]	ξ	PRDR
Aromas	17 ene 2021	0.21	9.80%	1.57E-05
Morgan Hill 84	14 abr 1984	0.20	14.51%	6.95E-04
Tres Pinos	04 abr 2023	0.20	10.65%	7.48E-06
Loma Prieta	17 oct 1989	0.27	19.50%	5.62E-03
RD - 2019-08-06_0659PDT	06 ago 2019	0.24	6.90%	1.79E-06

Tabla A. 4: Resultados finales obtenidos para edificio CA002 – dirección EW.

Registro	Año	T [s]	ξ	PRDR
Alum Rock	25 oct 2022	0.29	3.54%	5.87E-05
Aromas 2	11 jun 2021	0.29	4.16%	1.04E-05
Aromas	17 ene 2021	0.30	3.92%	3.40E-05
Morgan Hill 84	14 abr 1984	0.27	6.40%	1.01E-03
Tres Pinos	04 abr 2023	0.29	3.85%	1.45E-05
Interlaken	23 ene 2018	0.29	5.04%	1.61E-05
Loma Prieta	17 oct 1989	0.37	8.29%	9.91E-03
RD - 2019-08-06_0659PDT	06 ago 2019	0.29	4.25%	1.49E-06

Tabla A. 5: Resultados finales obtenidos para edificio CA004 – dirección NS.

Registro	Año	T [s]	ξ
Loma Prieta	1989	2.69	6.6%

Tabla A. 6: Resultados finales obtenidos para edificio CA004 – dirección EW.

Registro	Año	T [s]	ξ
Loma Prieta	1989	2.72	5.9%

Tabla A. 7: Resultados finales obtenidos para edificio CA005 – dirección NS.

Registro	Año	T [s]	ξ	PRDR
Loma Prieta	17 oct 1989	5.26	1.17%	7.97E-04
South Napa	24 ago 2014	4.92	1.95%	8.77E-05
RD - 2021-01-19_1510PST	19 ene 2019	4.47	1.37%	3.91E-06

Tabla A. 8: Resultados finales obtenidos para edificio CA005 – dirección EW.

Registro	Año	T [s]	ξ	PRDR
Loma Prieta	17 oct 1989	6.23	1.84%	1.28E-03
South Napa	24 ago 2014	5.59	2.68%	1.25E-04
RD - 2021-01-19_1510PST	19 ene 2019	4.90	3.15%	2.85E-06

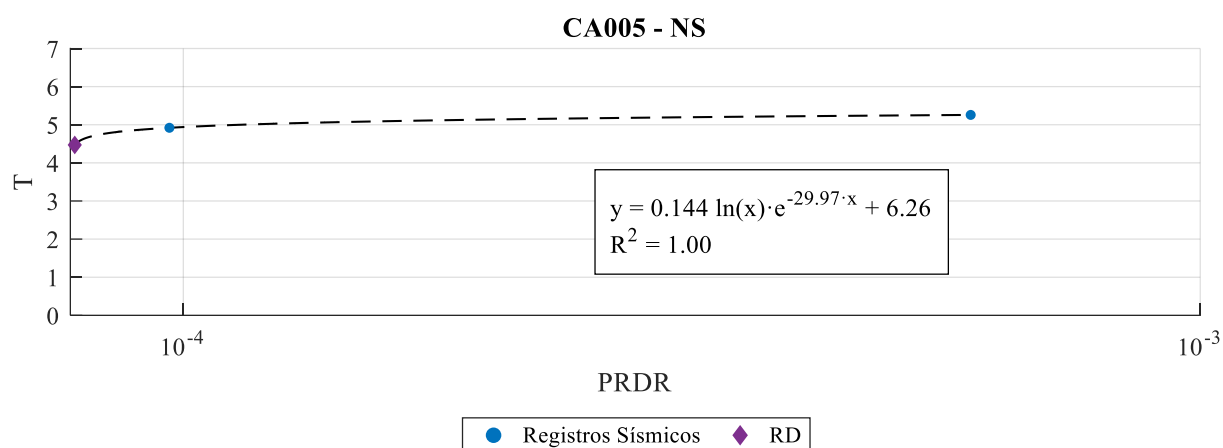


Figura A. 1: Periodo v/s PRDR – CA005 – Dirección NS.

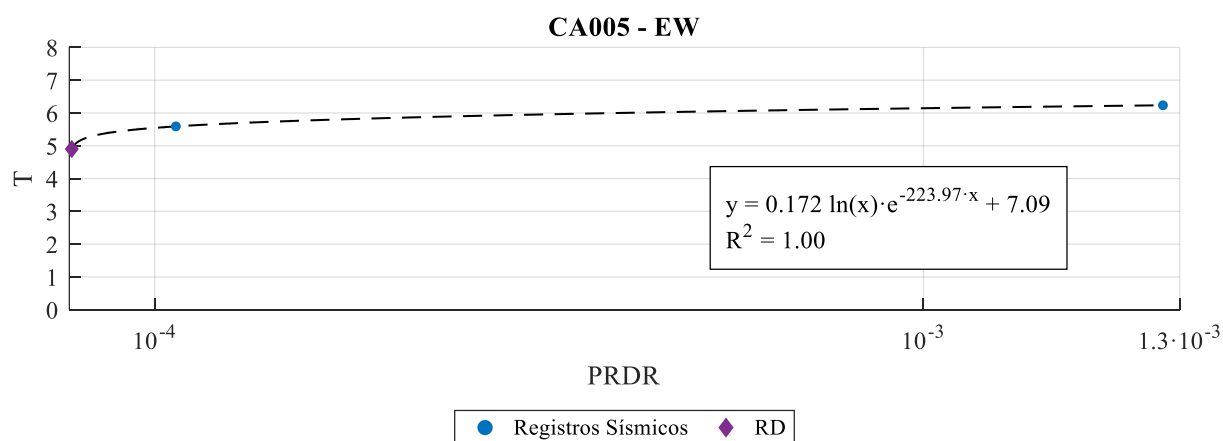


Figura A. 2: Periodo v/s PRDR – CA005 – Dirección EW.

Tabla A. 9: Resultados finales obtenidos para edificio CA006 – dirección NS.

Registro	Año	T [s]	ξ	PRDR
South Napa	24 ago 2014	3.45	1.68%	8.65E-05
RD - 2015-11-16_1259PDT	16 nov 2015	3.33	1.67%	5.47E-07

Tabla A. 10: Resultados finales obtenidos para edificio CA006 – dirección EW.

Registro	Año	T [s]	ξ	PRDR
South Napa	24 ago 2014	4.02	0.98%	1.64E-04
RD - 2015-11-16_1259PDT	16 nov 2015	3.93	0.52%	1.08E-06

Tabla A. 11: Resultados finales obtenidos para edificio CA008 – dirección NS.

Registro	Año	T [s]	ξ	PRDR
RD - 2018-03-01_075218PST	01 mar 2018	5.00	0.26%	9.34E-06

Tabla A. 12: Resultados finales obtenidos para edificio CA008 – dirección EW.

Registro	Año	T [s]	ξ	PRDR
RD - 2018-03-01_075218PST	01 mar 2018	5.11	1.20%	7.62E-06

Tabla A. 13: Edificio CA009 “San Francisco – 62 pisos – edificio residencial”, características.

Número de edificio	:	CA009
CSMIP	:	58389
Ubicación	:	San Francisco, CA
Latitud	:	37.7858 N
Longitud	:	122.3921 W
Geología del emplazamiento	:	Roca (sedimentaria).
V_{s30} [m/s]	:	873
Clase del sitio	:	B
Altura [m]	:	617.8 [ft]
Nº de pisos por encima/debajo del suelo	:	62/0
Dimensiones de la base	:	137 ft x 113 ft
Dimensiones típicas del piso	:	102 ft x 113 ft
Fecha de diseño	:	2006
Niveles instrumentados	:	2017, 72 acelerómetros en 26 niveles.
Materialidad	:	Concreto
Sistema de carga vertical	:	Losas planas de hormigón pretensado soportadas por columnas de hormigón y muros de corte centrales.
Sistema de carga horizontal	:	Muros de corte de núcleo de hormigón con columnas estabilizadoras altas suplementarias de hormigón armado en dirección transversal. El núcleo está unido a las columnas estabilizadoras mediante tirantes de acero resistentes al pandeo. Los depósitos de agua situados en la parte superior del edificio forman parte del sistema de «amortiguadores sintonizados de masa líquida» para reducir los movimientos inducidos por el viento.
Tipo de fundación	:	Cimentación de hormigón (a 3.6 metros por debajo de la torre) apoyada sobre roca madre.
Código de diseño	:	N/A
Tipo de uso	:	Residencial.
Observaciones	:	Este edificio fue equipado conjuntamente por el Servicio Geológico de California y el Servicio Geológico de los Estados Unidos. El diseño estructural del edificio se basó en un diseño sísmico basado en el rendimiento.

Tabla A. 14: Edificio CA010 “Los Angeles – 73 pisos – edificio residencial/oficinas”, características.

Número de edificio	:	CA010
CSMIP	:	24660
Ubicación	:	Los Angeles, CA
Latitud	:	34.0503 N
Longitud	:	118.2601 W
Geología del emplazamiento	:	Aluvión superficial sobre roca (sedimentario).
V_{S30} [m/s]	:	500
Clase del sitio	:	C
Altura [m]	:	-
N° de pisos por encima/debajo del suelo	:	73/5
Dimensiones de la base	:	408 ft x 339 ft
Dimensiones típicas del piso	:	244 ft x 112 ft
Fecha de diseño	:	2014
Niveles instrumentados	:	2017, 36 acelerómetros en 11 niveles.
Materialidad	:	Concreto
Sistema de carga vertical	:	Vigas y losas de hormigón dentro de los muros centrales. Fuera de los muros centrales: hormigón ligero sobre cubierta metálica soportada por vigas de acero, columnas perimetrales de acero rellenas de hormigón y muros centrales de hormigón. Losas planas de hormigón en la primera planta y niveles inferiores. En la parte superior del edificio hay una estructura acristalada con arriostramiento de acero (vela) que se eleva 97 pies por encima del techo principal en el nivel 73. La aguja tubular de acero en voladizo, de 295 pies de largo, se extiende por encima del techo.
Sistema de carga horizontal	:	Muros de corte con núcleo de hormigón (1,2 metros de espesor en la base y 0,6 metros en la parte superior) con estabilizadores y vigas de cintura. En dirección transversal, los estabilizadores con contrafuertes resistentes al pandeo (BRB) se colocan en tres puntos a lo largo de la altura de la estructura (niveles 28 a 31, niveles 53 a 59 y niveles 70 a 73). Dos vigas de cinturón de tres pisos de altura rodean el perímetro en los niveles inferior y superior de los estabilizadores.
Tipo de fundación	:	La torre se apoya sobre una base de hormigón de 5,5 metros de espesor. La base se apoya sobre roca madre.
Código de diseño	:	N/A
Tipo de uso	:	Oficina/Residencial.
Observaciones	:	El diseño estructural se basó en un diseño sísmico basado en el rendimiento y en el Código de Construcción de la Ciudad de Los Ángeles de 2011 (2010 CBC). La ciudad de Los Ángeles exigió una instrumentación exhaustiva. La financiación para la instrumentación corrió a cargo del propietario. CSMIP prestó asistencia en la instrumentación. Con la aguja, este es el edificio más alto de California, con una altura de 1100 pies.

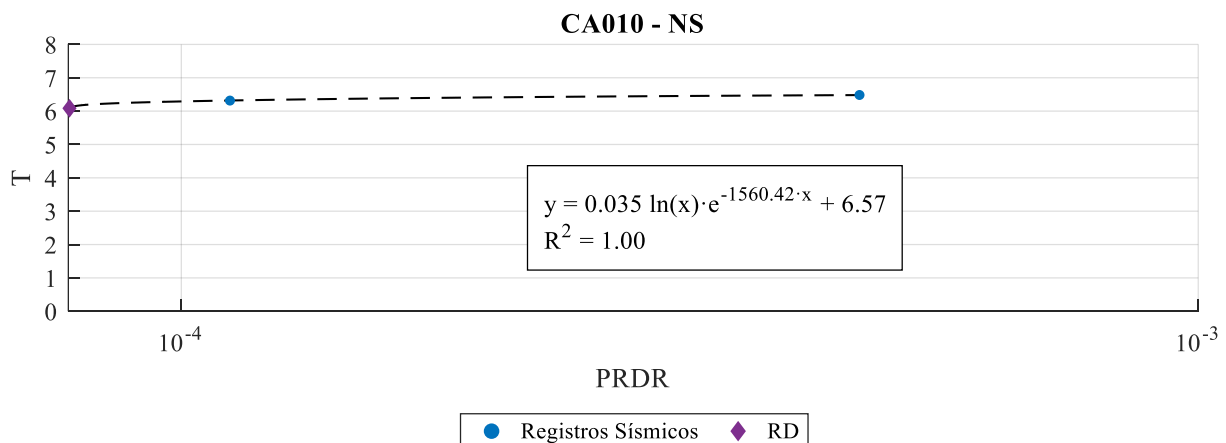


Figura A. 3: Periodo v/s PRDR – CA010 – Dirección NS.

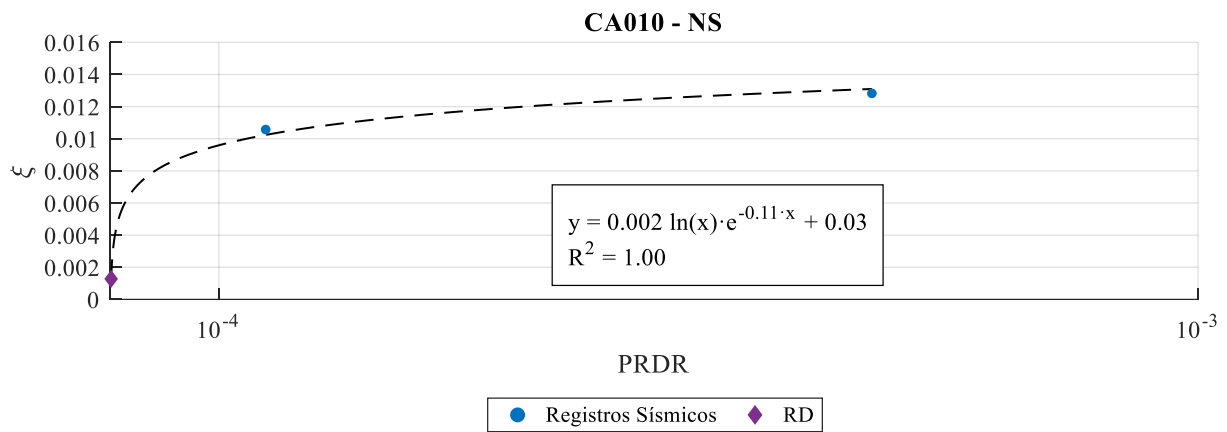


Figura A. 4: Fracción de amortiguamiento v/s PRDR – CA010 – Dirección NS.

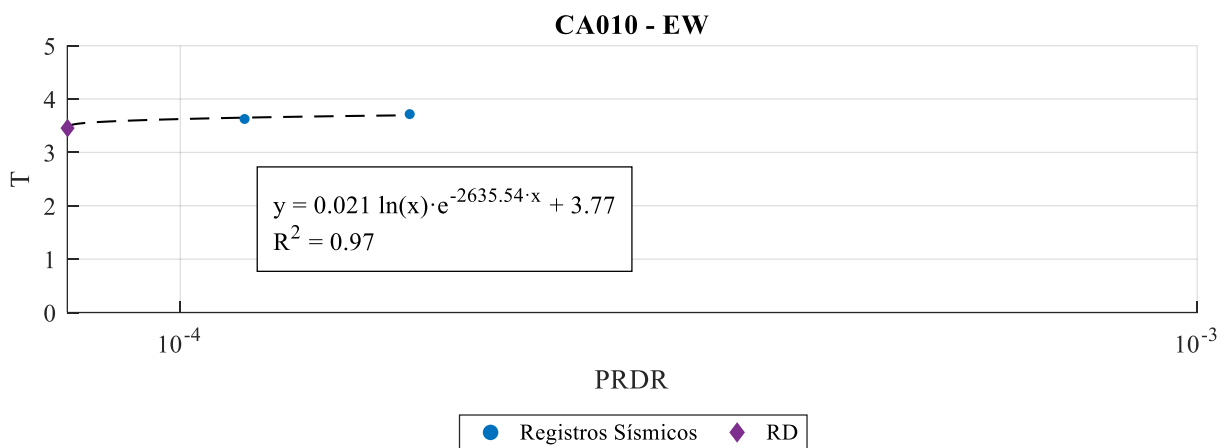


Figura A. 5: Periodo v/s PRDR – CA010 – Dirección EW.

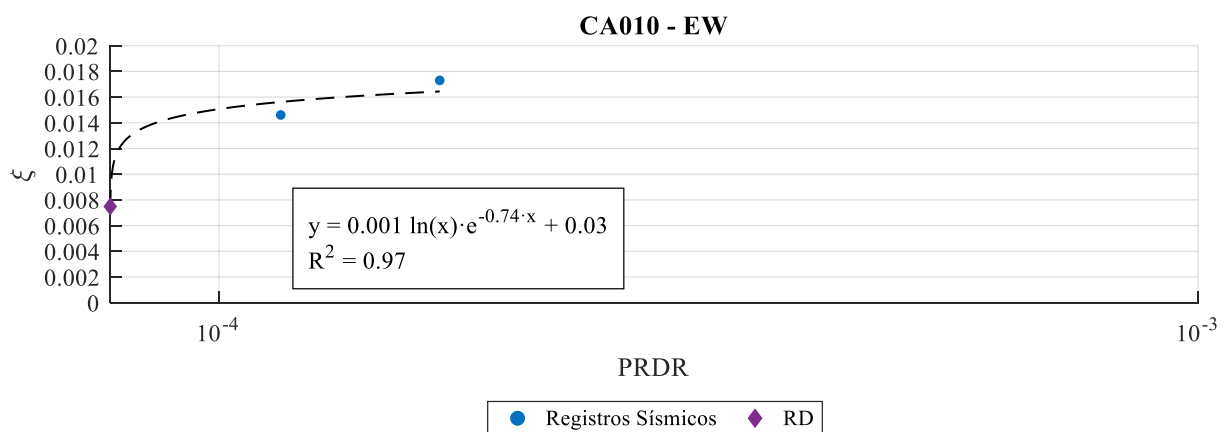


Figura A. 6: Fracción de amortiguamiento v/s PRDR – CA010 – Dirección EW.