

## Seismic response of a seismically isolated hospital with HDRBs to crustal earthquakes

J. Gallardo (1), J. de la Llera (1,2), J. Crempien (1,2), F. Freddi (3), T. Rossetto (3), J. Cembrano (1), M. Chacón (4), J. Muñoz (2), F. Gutiérrez-Urzúa (3), S. Dede (3)

(1) *Department of Structural and Geotechnical Engineering, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, jogallardo@uc.cl*

(2) *Research Center for Integrated Disaster Risk Management (CIGIDEN), Santiago, Chile*

(3) *Department of Civil, Environmental & Geomatic Engineering, University College London, London, UK*

(4) *Centro Nacional de Excelencia para la Industria de la Madera (CENAMAD), Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile*

### Resumen

El excelente desempeño observado en estructuras sísmicamente aisladas, en contraste con el desempeño de los edificios de base fija durante el terremoto de Maule 2010, motivó a las autoridades chilenas a sugerir fuertemente el uso de aislamiento sísmico para los futuros hospitales. Es por eso que la mayoría de las nuevas estructuras de gran envergadura diseñadas para brindar atención médica han utilizado aislamiento sísmico, donde los aisladores de goma de alto amortiguamiento (HDRBs, por sus siglas en inglés) han sido los dispositivos más utilizados. Debido a que los terremotos generados en la zona de subducción dominan la sismicidad en Chile, el impacto de los sismos corticales en estos edificios sísmicamente aislados es esencialmente desconocido. Estos eventos han tomado importancia ya que fallas como la de San Ramón (FSR) han sido reconocidas como potencialmente activas en años recientes. En consecuencia, este manuscrito presenta el posible impacto que un terremoto originado en la FSR podría tener sobre un hospital sísmicamente aislado con HDRBs en Santiago, Chile, el cual se encuentra a menos de 15 km de la falla. Dada la falta de datos confiables sobre la capacidad sismogénica de la FSR, se utilizan sismos sintéticos generados a partir de un modelo físico para predecir los movimientos del suelo; se definen límites superiores e inferiores para algunos parámetros clave de la fuente, como la magnitud de momento, la velocidad promedio de ruptura y frecuencia esquina. Se consideran todas las combinaciones de los tres parámetros, y se genera un conjunto de 16 simulaciones para cada una de esas combinaciones. La respuesta del edificio, considerando como métricas la fuerza cortante y desplazamiento lateral en la capa de aislamiento, las derivas entrepisos y las aceleraciones del piso, se miden para caracterizar el desempeño del hospital. Se concluye que las demandas en el hospital, debido a sismos corticales, podrían ser lo suficientemente grandes como para controlar algunos estados límite de la estructura estudiada, incluso excediendo en algunos casos las demandas ocasionadas por terremotos de subducción para los cuales fue diseñado.

*Palabras-Clave: Fallar cortical, Simulación física de terremotos, Aislamiento sísmico, Aislador de goma de alto amortiguamiento*

**Abstract**

Given the excellent performance observed in seismically isolated structures, in contrast to the performance of their counterpart fixed-to-base buildings during the Maule 2010 earthquake, Chilean authorities have strongly suggested using seismic isolation in almost every new hospital. Thus, most of the new large healthcare facilities have used seismic isolation, where High Damping rubber Bearings (HDRBs) are one of the most used isolation devices. Because subduction megathrust events highly dominate seismicity in Chile, the impact of crustal events in these seismically isolated buildings is essentially unknown. These events have taken importance since faults such as the San Ramon (SRF) have been recognized as potentially active in recent years. Consequently, this manuscript presents insights into the impact of a ground motion from an earthquake inside the SRF on a seismically isolated hospital with HDRBs in Santiago, Chile, which lies less than 15 km from the fault. Given the lack of reliable data on the seismogenic capacity of the SRF, physics-based synthetic earthquake simulations are used to predict the ground motions, an upper and lower bounds are defined for some key source parameters, such as the magnitude, average rupture velocity and corner frequency. A set of 16 simulations is generated for each parameter combination. The building response, considering quantities such as the shear force and lateral displacement of the isolation layer, inter-story drifts, and floor accelerations, is measured to characterize the performance of the hospital. It is concluded that the demands on the hospital due to crustal events could be large enough to control some limit states of the case-study hospital, even exceeding in some cases the demands of subduction megathrust events for which it was designed.

*Keywords: Crustal fault, Physics-based ground motion, Seismic isolation, High damping rubber bearing*

## 1 Introducción

Chile está ubicado junto a la zona de convergencia entre las placas de Nazca y Sudamérica, por lo que la sismicidad del país está principalmente compuesta por terremotos subductivos. Por esta razón, el desarrollo de los códigos de análisis y diseño del país [1, 2] se ha basado en este tipo de eventos sísmicos. A partir del terremoto del Maule del 2010, cuya magnitud fue de  $M_w$  8.8, las autoridades sanitarias han promovido el uso de aislamiento sísmico en el diseño de las nuevas estructuras hospitalarias [3, 4] con el fin de asegurar continuidad en las operaciones durante y después de un terremoto. Es por eso que la mayoría de los hospitales construidos después del 2010 han incorporado sistemas de aislamiento sísmico, donde el dispositivo más usado en estas estructuras ha sido el aislador de goma de alto amortiguamiento (HDRB, por sus siglas en Inglés).

Sin embargo, sismólogos chilenos recientemente han inferido que existe otra amenaza sísmica para la capital del país, Santiago. Ésta no ha sido considerada en la normativa hasta el momento, y se refiere a una falla cortical conocida como la Falla de San Ramón (FSR), la cual se extiende a lo largo de 35 km en dirección Norte-Sur (ver Fig. 1) y tiene una inclinación del ángulo de la superficie de falla de aproximadamente  $55^\circ$  en dirección Este [5]. Esta falla ha sido recientemente declarada como potencialmente activa [6], y el posible impacto de un terremoto generado en ella sobre las estructuras de la región metropolitana de Santiago es completamente desconocido.

Por esa razón, este artículo presenta el estudio sobre el impacto de un sismo en la FSR sobre uno de los hospitales con aislamiento sísmico en el centro de Santiago (la localización de la falla y el hospital se muestra esquemáticamente en la Fig. 1). Se eligió un hospital como caso de estudio debido a la importancia de estas estructuras durante y después de un terremoto. Sin embargo, debido a la falta de datos sobre la capacidad sismogénica y los parámetros de una posible ruptura en la FSR, el estudio se aborda bajo un marco de incertidumbre. La FSR presenta una segmentación a lo largo de su traza además de un comportamiento cinemático complejo, por lo que el tamaño máximo esperado de un sismo depende del número de segmentos que pueden participar en dicho evento [6]. Esto implica que la magnitud del evento es variable, así como otros parámetros como la frecuencia esquina y velocidad de ruptura.

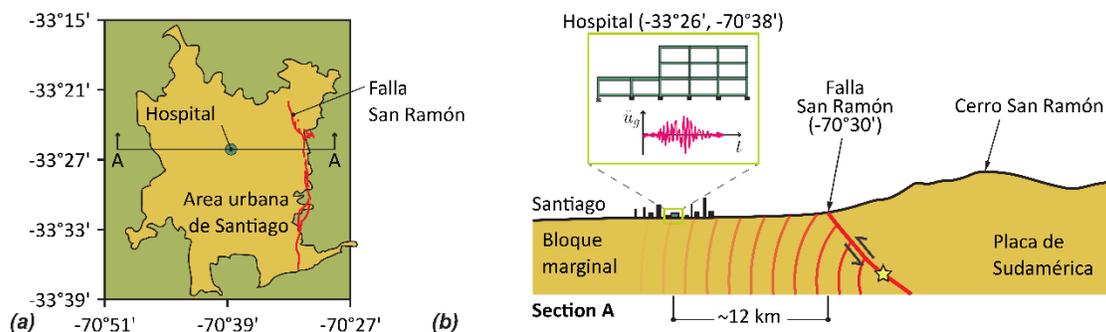


Fig. 1 – (a) Vista en planta de la región Metropolitana; y (b) sección transversal esquemática de Este a Oeste, incluyendo una representación esquemática de la Falla de San Ramón.

Debido a que la mayoría de los nuevos hospitales con aislamiento sísmico en Chile han sido diseñados para una amenaza definida a partir de eventos de subducción anteriores, se desconoce la respuesta que estas estructuras puedan tener bajo la acción de un terremoto cortical producido en la FSR. Este

estudio se basa en la hipótesis de que la probabilidad de un evento en la FSR es mayor a cero, pero no se proporciona ninguna evidencia adicional sobre la probabilidad de ocurrencia de dichos eventos. Asumimos que la hipótesis es verdadera y estudiamos la respuesta sísmica de este hospital sujeto a dicha hipótesis. Naturalmente, el impacto de un sismo en la FSR afecta a todas las estructuras, no solo a los hospitales; sin embargo, nuestro estudio se enfoca en investigar la respuesta de un hospital sísmicamente aislado con HDRB cercano a la falla. Dada la corta distancia entre la estructura y la falla, es intuitivo pensar que la respuesta de la estructura podría no ser la estimada durante el diseño. Los terremotos corticales pueden controlar algunos estados límite de la estructura y el sistema de aislamiento, lo que puede condicionar el rendimiento esperado del hospital.

Debido a la falta de información sobre la FSR, este estudio se enfoca en la sensibilidad de la respuesta estructural del hospital, utilizando registros sintéticos generados a partir de una modelación física de una ruptura en la FSR. Para tener en cuenta la incertidumbre existente en el escenario de un terremoto, se consideran valores medios, superiores e inferiores para tres parámetros clave de la fuente sismogénica: la magnitud del evento, velocidad promedio de ruptura en la falla y la frecuencia esquina. Estos tres parámetros controlan aspectos importantes de las señales sísmicas generadas sintéticamente.

## 2 Descripción del caso de estudio

### 2.1 Falla de San Ramón

La Falla de San Ramón (FSR) se encuentra ubicada en el borde oriental de la ciudad Santiago, al pie de la cordillera de los Andes [5]. Es una falla inversa que se orienta hacia el norte, converge hacia el oeste, y forma parte del sistema de fallas más largo de la región andina occidental [7]. La traza de la FSR ha sido definida por zonas escarpadas alineadas topográficamente por al menos 35 km de longitud, siguiendo el pie de la cordillera, extendiéndose desde el río Mapocho en el norte hasta el río Maipo en el sur [6, 8]. Su traza se divide en cuatro segmentos, con una longitud promedio de 10 km por segmento [9]. Utilizando excavaciones a lo largo de la falla e información de isótopos cosmogénicos, se encontró que dos grandes eventos (correspondientes a terremotos de  $M_w 7.5$ ) ocurrieron en la falla en los últimos 8000-19000 años, con desplazamientos de ~5 m en cada uno de ellos [10].

Además de su segmentación a lo largo de la traza, la falla también tiene una gran complejidad cinemática local que incluye subfallas normales, de deslizamiento lateral e inversas, así como potenciales regiones de arrastre, lo que reduce la magnitud del máximo evento esperado. La magnitud máxima esperada del evento que puede generar una falla inversa es de magnitud  $M_w \sim 7.5$  [10], mientras que para una falla normal y de desplazamiento lateral, el terremoto máximo probable es de magnitud  $M_w 5.8$ . En este último caso, el deslizamiento esperado de la falla estaría en un rango entre 20-80 cm.

### 2.2 Hospital HUAP

En 2013-2014, se llevó a cabo una renovación del denominado Hospital de Urgencia Asistencia Pública (HUAP). La nueva estructura consideró dos edificios contiguos de Hormigón Armado (HA); el principal con 2 sótanos y 3 pisos, cuyo sistema estructural se basa en marcos resistentes a momentos y un

sistema de aislamiento sísmico que incluía aisladores elastoméricos y deslizadores friccionales, losas de piso convencionales coladas in situ de 18 cm de espesor en el primer sótano y losas postensadas en el segundo sótano. La superestructura y subestructura de este primer edificio tienen una malla ortogonal regular de marcos resistentes a momentos espaciados a 8.00m; la subestructura está enterrada y tiene muros de retención de HA a lo largo del perímetro, los cuales tienen una gran rigidez. El segundo edificio es una estructura de base fija, tiene un sótano y 7 pisos, con un helipuerto en la parte superior de la estructura. Las losas de piso del edificio tienen 15 cm de espesor, la estructura se basa en muros y vigas de HA, y elementos de acero para el helipuerto. Las estructuras están ubicadas en la Zona Sísmica 2, y se cimienta en un suelo compuesto de grava densa, típica de Santiago, clasificada como suelo tipo 2 [1]. El hormigón utilizado en el diseño fue de grado C25, con una resistencia a compresión de 25 MPa, se utilizaron barras de acero de refuerzo grado A630-420H, con un límite elástico de 420 MPa. Este estudio se centra solo en el desempeño sísmico del edificio principal, el cual está sísmicamente aislado.

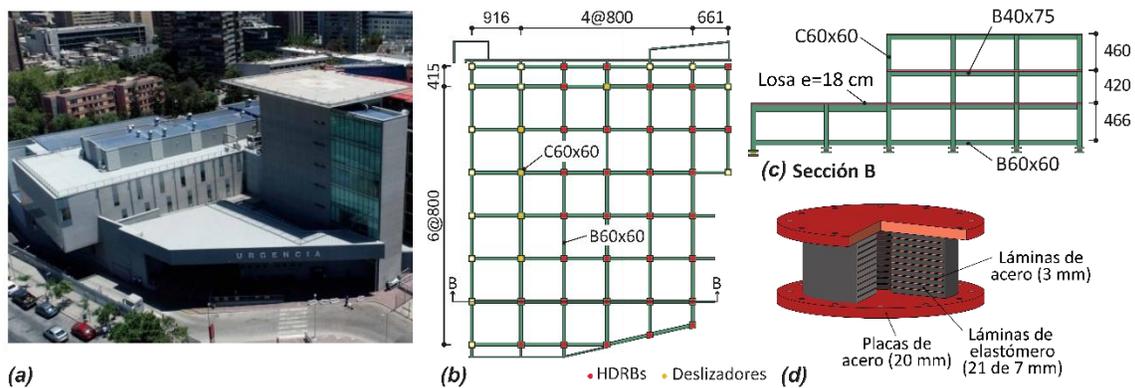


Fig. 2 – Edificio del hospital de estudio: (a) vista aérea; (b) vista en planta del sistema de aislamiento; (c) elevación típica de la estructura aislada; y (d) esquema de los HDRBs.

El sistema de aislamiento sísmico está ubicado en la parte superior de los sótanos. Este consta de 33 HDRBs, con una rigidez nominal a corte del material elastomérico ( $G$ ) de  $4 \text{ kgf/cm}^2$ , diámetro externo de 65 cm e interno de 10 cm; y 19 deslizadores friccionales (SL) de 35 y 45 cm de diámetro, el sistema completo tiene una altura de 28 cm. El coeficiente de fricción nominal para los deslizadores a velocidades superiores a 15 cm/s está entre el 5-7%. El desplazamiento de diseño para el sistema de aislación es de 23.9 cm, y el desplazamiento total máximo es de 24.9 cm. La compresión axial máxima para los deslizadores es de 15 y 22 MPa para las cargas a largo y corto plazo, respectivamente. Para el desplazamiento de diseño, la fracción amortiguación crítica para los HDRBs debe ser superior al 9%, y la rigidez a corte estar entre 0.78 y 1.05 tonf/cm. La Fig. 2 muestra una fotografía de la estructura aislada, la distribución en planta de los dispositivos de aislación, una vista en elevación de la estructura y la geometría de los HDRBs.

### 3 Modelo numérico

Esta sección describe el modelado de la ruptura en la FSR, su propagación hasta el sitio de la estructura, y el modelo estructural utilizado para el análisis del caso de estudio. Se consideraron un total de 27 diferentes combinaciones para los parámetros de la fuente sísmica, que, dadas las 16 realizaciones para

cada combinación de parámetros, dan un total de 432 registros sintéticos, cada uno con sus tres componentes traslacionales.

### 3.1 Simulación de la ruptura en la FSR

Los registros sintéticos en la ubicación del hospital se generaron utilizando el método UCSB [11, 12, 13, 14], que implica simular una fuente de terremoto sintética con un deslizamiento temporal y espacial específico en la falla. Para calcular las funciones de Green apropiadas para la propagación de las ondas desde de la falla, se emplea la técnica de número de onda discreto [15], que tiene en cuenta una estructura de velocidad estratificada en 1D.

Las frecuencias esquina de los espectros de tasa de momento  $f_c$  y las velocidades de ruptura promedio  $V_r$  varían, siendo la primera forzada a tener valores consistentes con la escala la magnitud considerada según lo propuesto por Aki [16] y las velocidades de ruptura se asumen como independientes de la magnitud. Las características espaciales del deslizamiento final, tiempo de ascenso, el tiempo al valor máximo y la velocidad de ruptura en la falla se prescriben basándose en una estructura correlacionada del espectro de potencia de von Kármán, con los parámetros propuestos por Crempien & Archuleta [13] guiando dicha estructura de correlación. Las dimensiones de la falla se escalan utilizando la relación propuesta por Leonard [17], resultando en longitudes de 20, 30 y 50 km, y anchos de 10, 16 y 25 km, para  $M_w$  6.5,  $M_w$  6.9 y  $M_w$  7.2, respectivamente.

Tabla 1 – Casos considerados en los análisis con magnitud de momento variable  $M_w$ , velocidad de ruptura  $V_r$  en km/s y frecuencia esquina  $f_c$  en Hz.

Caso	$M_w$	$V_r$	$f_c$	Caso	$M_w$	$V_r$	$f_c$	Caso	$M_w$	$V_r$	$f_c$
1	6.5	2.5	0.12	10	6.9	2.5	0.07	19	7.2	2.5	0.05
2	6.5	2.5	0.14	11	6.9	2.5	0.09	20	7.2	2.5	0.07
3	6.5	2.5	0.16	12	6.9	2.5	0.11	21	7.2	2.5	0.09
4	6.5	3.0	0.12	13	6.9	3.0	0.07	22	7.2	3.0	0.05
5	6.5	3.0	0.14	14	6.9	3.0	0.09	23	7.2	3.0	0.07
6	6.5	3.0	0.16	15	6.9	3.0	0.11	24	7.2	3.0	0.09
7	6.5	3.5	0.12	16	6.9	3.5	0.07	25	7.2	3.5	0.05
8	6.5	3.5	0.14	17	6.9	3.5	0.09	26	7.2	3.5	0.07
9	6.5	3.5	0.16	18	6.9	3.5	0.11	27	7.2	3.5	0.09

La Tabla 1 muestra los 27 casos considerados en el análisis paramétrico. Cada columna representa los 9 casos correspondientes a una magnitud del evento sísmico  $M_w$ , que varía de 6.5 a 7.2. Los casos en las filas están organizados en orden ascendente de velocidad de ruptura  $V_r$ , que varía de 2.5 a 3.5 km/s, y frecuencia esquina  $f_c$ , varía entre 0.05 a 0.16 Hz.

### 3.2 Modelo estructural

Se desarrolló un modelo de Elementos Finitos (EF) tridimensional del caso de estudio utilizando el software OpenSees [18]. El modelo incluye todos los elementos estructurales del sistema de aislamiento sísmico y la superestructura; no se incluye la subestructura debido a su gran rigidez proporcionada por grandes muros perimetrales de HA y a que está enterrada. Otras consideraciones del modelo son: (i) empotramiento en la base de la capa de aislador; (ii) masa sísmica igual al peso

propio más el 25% de las cargas vivas según lo especificado por el código chileno [1]; y (iii) una malla compatible entre todos los elementos estructurales con un tamaño máximo de 1.5 m por elemento.

Se asumió que todos los elementos en la superestructura tenían un comportamiento elástico, al igual que la respuesta de los deslizadores. Las vigas y columnas de HA se modelaron utilizando elementos tipo *frame* de 2 nodos (*elasticBeamColumn*); las losas utilizaron un elemento tipo *shell* de 4 nodos (*ShellMITC4*) con sección isotrópica (*ElasticMembranePlateSection*); los deslizadores se modelaron utilizando elementos *link* de 2 nodos (*twoNodeLink*) con materiales elásticos uniaxiales (*Elastic*) en cada dirección, y los HDRBs se modelaron utilizando un elemento *HDR* de 2 nodos, que considera el modelo propuesto por Grant et al. [19] para simular la respuesta a corte, y el de Kumar et al. [20] para cavitación. Se consideró que la respuesta de los otros tres grados de libertad y la respuesta axial eran lineales y no acopladas. La Fig. 3 muestra el modelo de EF con las principales consideraciones y un ejemplo ilustrativo de la curva fuerza cortante-deformación de los HDRBs.

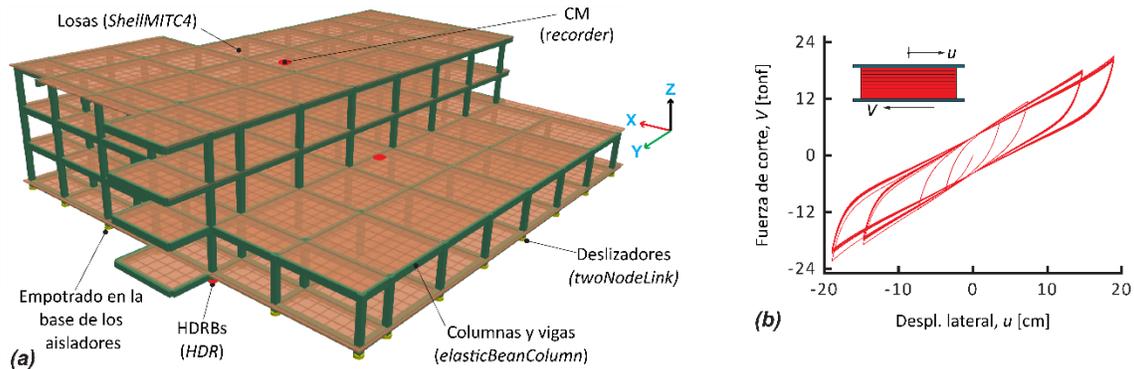


Fig. 3 – Caso de estudio: (a) vista 3D del modelo de EF y (b) curva fuerza de corte-desplazamiento lateral del modelo para HDRBs.

El amortiguamiento de la superestructura se consideró mediante el modelo de amortiguamiento de Rayleigh, y ignorando la contribución del componente de masa para evitar el fenómeno denominado *damping leakage* [21]. Este amortiguamiento representa la disipación de energía de la superestructura debido a ligeras incursiones en el rango inelástico de los elementos estructurales modelados como elásticos. Se eligió una fracción de amortiguamiento crítico del 2% en la frecuencia natural de la superestructura. Este amortiguamiento se aplica utilizando el comando *region* y seleccionando todos los elementos de la superestructura.

## 4 Resultados

La variabilidad debido a los parámetros de la fuente se caracteriza en dos niveles diferentes. Primero, se presentan diferentes Medidas de Intensidad (MIs) para las distintas combinaciones de los parámetros considerados como variables. En segundo lugar, se presentan las respuestas globales y locales de la para los diferentes parámetros de la fuente. Estas últimas respuestas muestran la propagación de la incertidumbre desde los parámetros de la fuente a la respuesta del edificio.

### 4.1 Medidas de Intensidad (MIs)

La Fig. 4 muestra dos diferentes medidas de intensidad del movimiento del suelo para cada uno de los 27 casos. Las MIs incluidas en este gráfico son la aceleración máxima del suelo (PGA por sus siglas en Inglés) y la velocidad máxima del suelo (PGV, por sus siglas en Inglés). Las MIs se calculan para el componente orientado a lo largo de la dirección X del edificio (el más fuerte). En el gráfico se muestra el segundo cuartil ( $Q_2$ ) o mediana (línea vertical naranja); la variabilidad de las MIs (caja verde), definido como el rango entre el primer ( $Q_1$ ), mediana de la mitad inferior de los datos, y tercer cuartil ( $Q_3$ ), mediana de la mitad superior de los datos; bigotes (segmento de línea negra), que extienden 1.5 veces el rango intercuartil ( $Q_3 - Q_1$ ); y los valores atípicos (círculos rojos), que son los valores más allá de los bigotes, para un caso dado.

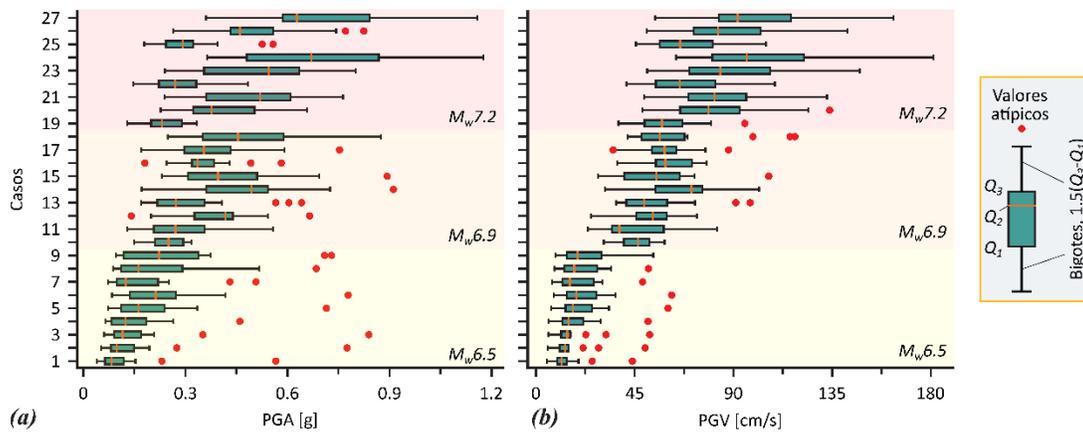


Fig. 4 – Boxplot para las diferentes MIs consideradas: a) PGA; y b) PGV.

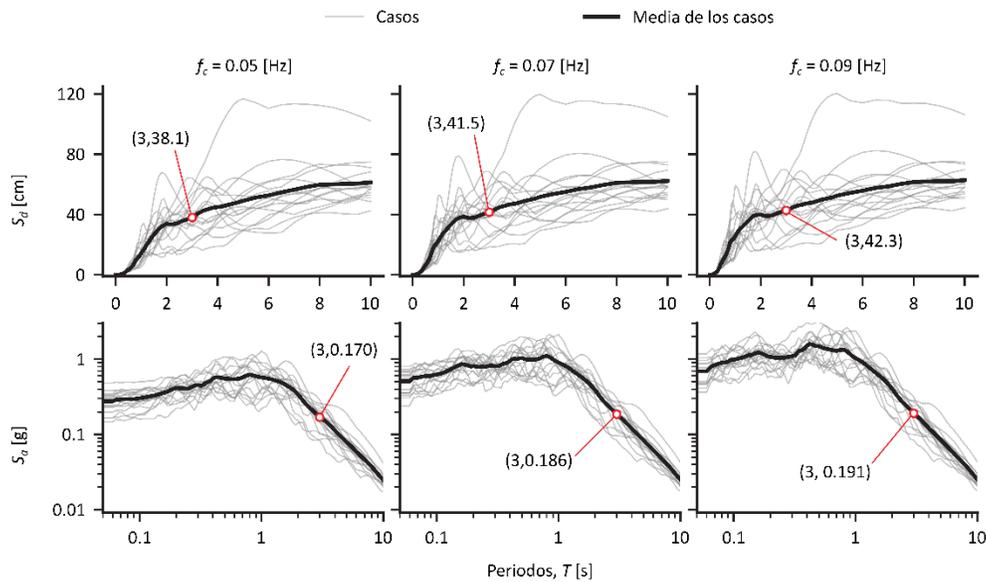


Fig. 5 – Efecto de la frecuencia esquina para espectros de movimiento del suelo con  $M_w 7.2$  y  $V_r = 3.0$  m/s.

La tendencia general para las MIs muestran un salto marcado entre  $M_w 6.5$  y  $M_w 6.9$ , mientras que la variación entre  $M_w 6.9$  a  $M_w 7.2$  es menos notoria. Como era esperable, los valores de las medianas tienden a aumentar a medida que la magnitud aumenta. El aumento en PGA es gradual y casi sigue una tendencia lineal hasta  $M_w 6.9$ . Se observan discontinuidades más fuertes para PGV, cuando la magnitud del evento cambia de  $M_w 6.5$  a  $M_w 6.9$ . La velocidad de ruptura también tiene un efecto significativo para los terremotos de mayor magnitud  $M_w 7.2$ . Para el caso  $M_w 6.5$ , las diferentes velocidades de ruptura no afectan significativamente la mediana de las medidas de intensidad, aunque sí lo hace para los valores atípicos. Para el caso  $M_w 6.9$ , el efecto de la velocidad de ruptura en el PGA y PGV es menor. Además, los efectos del valor de la frecuencia esquina son más evidentes para los terremotos de  $M_w 7.2$ . Para una velocidad de ruptura dada, una frecuencia esquina más alta tiende a producir valores de las medianas más grandes.

La Fig. 5 muestra los espectros de respuesta  $S_a$  y  $S_d$  para el caso  $M_w 7.2$ . Los valores de las medianas de  $S_a$  y  $S_d$  en el período fundamental de la estructura aumentan con el valor de  $f_c$ . Una inspección detallada de las amplitudes de las pseudo-aceleraciones muestra diferencias significativas para período cortos (frecuencias altas). El efecto es menos claro en la mediana del  $S_d$ .

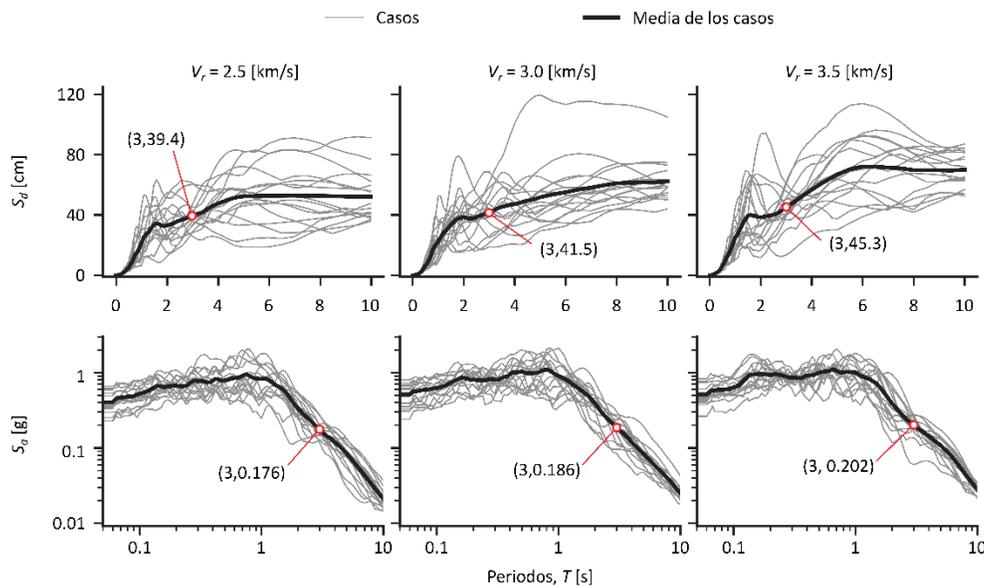


Fig. 6 – Efecto de la velocidad de ruptura para espectros de movimiento del suelo con  $M_w 7.2$  y  $f_c = 0.07$  Hz.

Análogamente, la Fig. 6 presenta resultados similares para el caso  $M_w 7.2$ , con velocidad de ruptura variable y una frecuencia esquina dada,  $f_c = 0.07$  Hz. En este caso, el efecto de aumentar la velocidad de ruptura produce un claro aumento en la demanda de desplazamiento  $S_d$  para un período de 3s. Dada la relación de frecuencia entre los valores espectrales, el efecto en  $S_a$  también existe y alcanza un aumento del 15% comparando la mayor velocidad de ruptura con la menor.

## 4.2 Respuesta estructural

Los parámetros de respuesta considerados para la interfaz del aislamiento son los desplazamientos ( $u_{\max}$ ) y la fuerza cortante total ( $V_{\max}$ ) del sistema de aislamiento. Los parámetros de respuesta del edificio también incluyen los desplazamientos de entrepiso ( $\Delta$ ) y las aceleraciones del piso ( $\ddot{u}$ ) en la superestructura. Es importante mencionar que los parámetros de respuesta se miden en el Centro de Masa (CM) de cada losa.

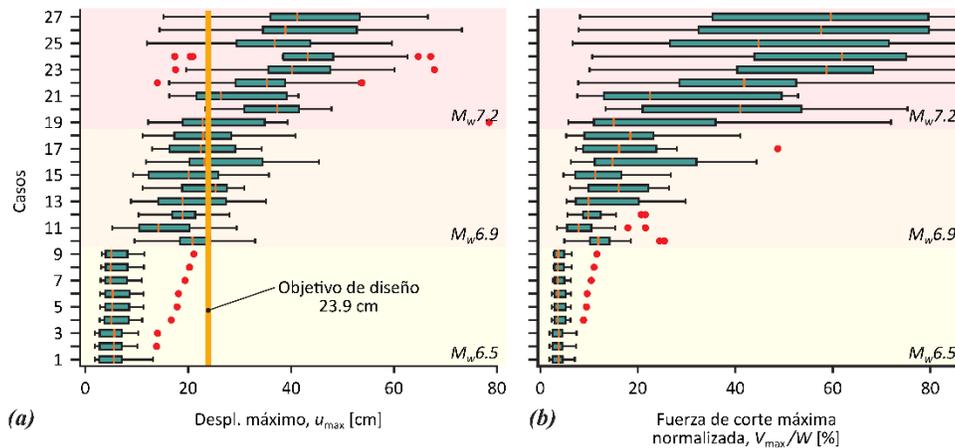


Fig. 7 – Boxplots para los parámetros de demanda del sistema de aislamiento en la dirección X: a) desplazamiento máximo  $u_{\max}$ , y b) fuerza cortante máxima normalizada  $V_{\max}/W$ .

La Fig. 7 muestra los desplazamientos máximos del sistema de aislamiento en la dirección X para los diferentes casos considerados, y la máxima fuerza cortante en la dirección X en el nivel de aislamiento normalizada por el peso sísmico de la estructura ( $W$ ). El desplazamiento objetivo de diseño es 23.9 cm, el cual se presenta como una línea vertical naranja en la figura, valor que es superado por algunos de los escenarios asociados con los sismos de magnitud  $M_w$ 6.9 y varios con  $M_w$ 7.2. En el caso de la fuerza cortante máxima normalizada en el aislamiento ( $V_{\max}/W$ ), alcanza valores de la mediana de alrededor del 20% para  $M_w$ 6.9 y alrededor del 60% para  $M_w$ 7.2. En todos los casos, las diferencias en la respuesta observadas entre los eventos  $M_w$ 6.5 y los  $M_w$ 6.9, y entre estos últimos y  $M_w$ 7.2 son grandes. Los resultados para  $M_w$ 7.2 también presentan una mayor dispersión que las otras dos magnitudes. En general, los valores medianos aumentan a medida que, tanto la frecuencia esquina como la velocidad de ruptura, aumentan.

La Fig. 8 resume los desplazamientos máximos de entrepiso en la dirección X ( $\Delta_{\max}$ ) del primero y tercer piso, y las máximas aceleraciones de piso en la dirección X ( $\ddot{u}_{\max}$ ) en la losa de aislamiento y azotea. Los desplazamientos máximos dependen de la magnitud del sismo; en el primer piso pueden alcanzar valores superiores al 20‰, y aceleraciones en el nivel de la azotea superiores a 2g para los escenarios  $M_w$ 7.2. La tendencia general para ambos parámetros de demanda de la superestructura es similar a lo observado para las respuestas del sistema de aislamiento. Las respuestas para  $M_w$ 7.2 son mucho mayores que las de los otros dos casos, alcanzando valores sorprendentemente altos. El aumento en la frecuencia esquina y la velocidad de ruptura producen un aumento en la demanda sobre la superestructura.

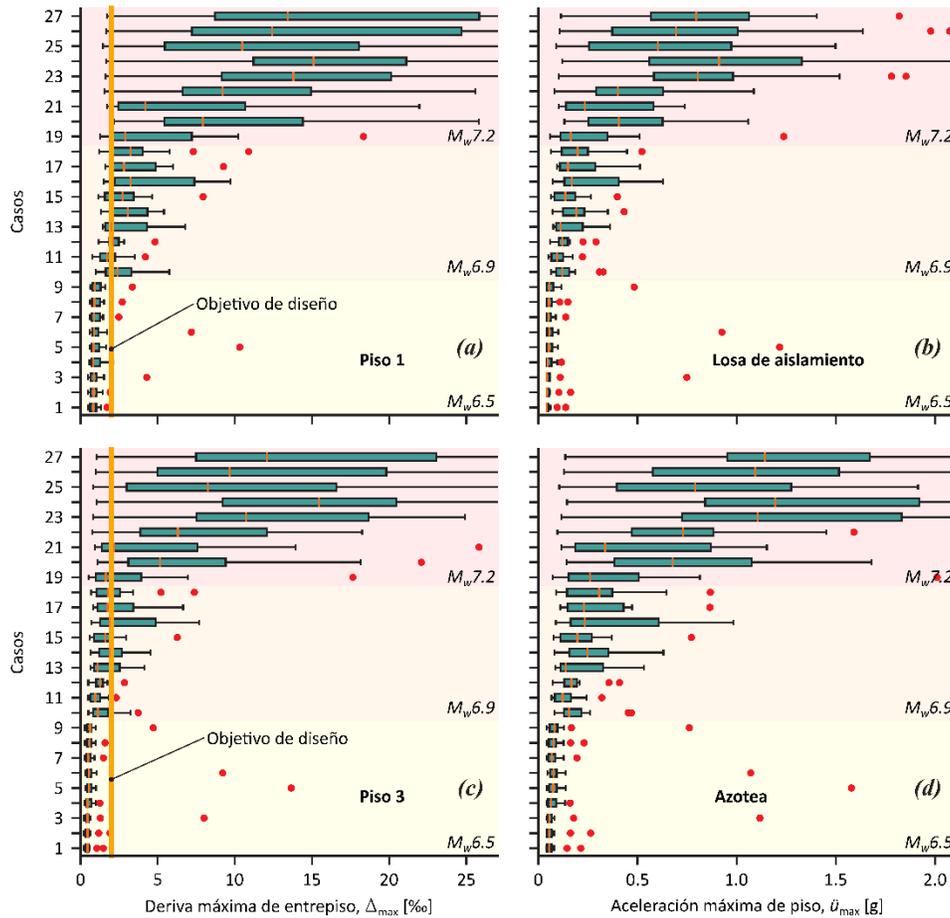


Fig. 8 – Boxplot para los parámetros de demanda de la superestructura en la dirección X: deriva máxima de entrepiso  $\Delta_{max}$  de: (a) primer piso; (b) tercer piso; y aceleraciones máximas del piso  $\ddot{u}_{max}$  de (c) losa de aislamiento, y (d) techo del tercer piso (azotea).

## 5 Conclusiones

Este artículo cuantifica la respuesta dinámica de un hospital sísmicamente aislado con HDRB, el cual se encuentra ubicado en el centro de Santiago, ante un sismo en la FSR. Dado que los parámetros de la de la falla son inciertos, se propusieron límites para la magnitud del evento, la velocidad promedio de ruptura y la frecuencia esquina, esto con el fin de considerar la incertidumbre de dichos parámetros. Esta incertidumbre se propagó a la respuesta del hospital utilizando las 27 posibles combinaciones de parámetros, con tres magnitudes, tres velocidades de ruptura y tres frecuencias de esquina, con 16 realizaciones para cada uno de los 27 casos. El efecto de los diferentes parámetros de la fuente se evaluó para diferentes MIs: PGA, PGV,  $S_a$  y  $S_d$ . En términos de respuesta estructural, se consideraron cuatro parámetros: el desplazamiento lateral máximo y la fuerza cortante de la capa de aislamiento en la dirección X, las deformaciones máximas de entrepiso en la dirección X y las aceleraciones del piso en la losa de aislamiento y la azotea.

Como se esperaba, un aumento en la magnitud del evento produce un aumento en las MIs y la demanda en la estructura. Este aumento es altamente no lineal, y se observó una gran discontinuidad entre los

distintos valores de magnitud. El aumento de magnitud también aumenta la variabilidad entre las realizaciones para cada conjunto de parámetros. También se observó que un aumento en la frecuencia esquina y velocidad de ruptura, aumenta las MIs y la demanda sísmica en la estructura.

Si se consideran como estados límite el desplazamiento lateral objetivo de diseño del sistema de aislación y la deriva de entrepiso permitida por la norma, se concluye que los sismos corticales que se podrían producir en la FSR pueden controlar estos estados límite de las estructuras a 15 km o menos de la falla. Esto implica que, bajo la hipótesis de una falla activa, estas estructuras deben ser evaluadas bajo esta nueva amenaza sísmica. La capacidad de un hospital con aislamiento sísmico como el considerado en este estudio es considerablemente mayor que la de los edificios de base fija, que en algunos casos incluso pueden estar más cerca del SRF. Estos resultados son solo un primer intento de cuantificar los efectos de un sismo en la FSR en edificios existentes, no pretenden causar alarma ya que son preliminares, pero también presentan un llamado de precaución para futuros diseños en esta zona para eventualmente evitar la necesidad de futuros reforzamientos.

Actualmente, los autores están trabajando en refinar los análisis de sensibilidad del impacto de los parámetros de la fuente del terremoto del FSR en este y otros hospitales para presentar una propuesta más completa a diferentes autoridades y reguladores. Los próximos pasos incluirán edificios residenciales a diferentes distancias del SRF para definir zonas más seguras o incluso zonas de exclusión.

## Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por FONDECYT, por medio del proyecto *Multiscale earthquake risk mitigation of healthcare networks using seismic isolation*, ANID/ FONDECYT/ 1220292, ANID/Beca de doctorado/21201370, y el Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), ANID/ FONDAP/ 1522A0005; y la iniciativa de investigación Seed Fund 2022 UCL-PUC. Los autores agradecen todo el apoyo recibido.

## Referencias

- [1] INN. NCh433: Diseño sísmico de edificios. *Instituto Nacional de Normalización*, 1996 y modificada en 2009.
- [2] INN. NCh2745: Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica. *Instituto Nacional de Normalización*, 2013.
- [3] De La Llera J. C., Mitrani-Reiser J., Rivera J., Fortuño C., Jünemann R., Poulos A. and Vásquez J. The 2010 Chile earthquake: a five-year reflection. *Proceedings of the 10th Pacific Conference on Earthquake Engineering*, AEES. 2005. P. 210.
- [4] Simpson B., Kakoty P., Ortega M. and Hassan W. Resilience reconnaissance for hospitals after the 2010 Maule earthquake. *Technical report*.
- [5] Díaz D., Maksymowicz A., Vargas G., Vera E., Contreras-Reyes E. and Rebolledo S. Exploring the shallow structure of the San Ramón thrust fault in Santiago, Chile (33.5 S), using active seismic and electric methods. *Solid Earth*. 2014, 5(2), pp.837-849.
- [6] Armijo R., Rauld R., Thiele R., Vargas G., Campos J., Lacassin R. and Kausel E. The West Andean thrust, the San Ramon fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. *Tectonics*. 2010, 29(2).
- [7] Farías M. Tectónica y erosión en la evolución del relieve de los Andes de Chile Central durante el Neógeno. *Tesis de Ph.D. (Inédito)*, Universidad de Chile, Departamento de Geología. 2007, p. 191.

- [8] Rauld R. Deformación cortical y peligro sísmico asociado a la falla San Ramón en el frente cordillerano de Santiago, Chile Central (33ºs). *Tesis de Ph.D. (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología*. 2011, p. 311.
- [9] Estay N., Yáñez G., Carretier S., Lira E. and Maringue J. Seismic hazard in low slip rate crustal faults, estimating the characteristic event and the most hazardous zone: study case San Ramón Fault, in southern Andes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2016, 16(12), p. 2511-2528.
- [10] Vargas G., Klinger Y., Rockwell T., Forman S., Rebolledo S., Baize S., et al. Probing large intraplate earthquakes at the west flank of the Andes. *Geology*. 2014, 42(12), 1083–1086.
- [11] Liu P., Archuleta R., and Hartzell S. Prediction of Broadband Ground-Motion Time Histories: Hybrid Low / High-Frequency Method with Correlated Random Source Parameters. *Bulletin of the Seismological of America*. 2006, 96, 2118–2130.
- [12] Schmedes J., Archuleta R., and Lavallee D. A kinematic rupture model generator incorporating spatial interdependency of earthquake source parameters. *Geophysical Journal International*. 2013, 192, 1116–1131.
- [13] Crempien J. and Archuleta, R. UCSB Method for Simulation of Broadband Ground Motion from Kinematic Earthquake Sources. *Seismological Research Letters*. 2015, 86, 61–67.
- [14] Crempien J. and Archuleta R. Within-Event and Between-Events Ground Motion Variability from Earthquake Rupture Scenarios. *Pure and Applied Geophysics*. 2017, 174, 3451–3465.
- [15] Zhu L. and Rivera L. A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media. *Geophysical Journal International*. 2002, 148(3), p.619-627.
- [16] Aki K. Scaling law of seismic spectrum. *Journal of Geophysical Research*. 1967, 72(4), 1217-1231.
- [17] Leonard M. Earthquake fault scaling: Self-consistent relating of rupture length, width, average displacement, and moment release. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2010, 100(5A), 1971-1988.
- [18] McKenna F., Fenves G. L. and Scott M. H. Open system for earthquake engineering simulation. *University of California, Berkeley, CA*. 2000.
- [19] Grant D., Fenves G. and Whittaker A. (2004). Bidirectional modelling of high-damping rubber bearings. *Journal of Earthquake Engineering*. 2004, 8(spec01), pp.161-185.
- [20] Kumar M., Whittaker A. and Constantinou M. An advanced numerical model of elastomeric seismic isolation bearings. *Earthquake engineering & structural dynamics*. 2014, 43(13), pp.1955-1974.
- [21] Ryan K. and Polanco J. Problems with Rayleigh damping in base-isolated buildings. *Journal of structural engineering*. 2008, 134(11), pp.1780-1784.