



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA  
BARCELONATECH**

**Tesis Doctoral**

**METODOLOGÍA PARA EVALUACIÓN RÁPIDA  
DE SUSCEPTIBILIDAD DE PÉRDIDA DE FUNCIÓN  
POR SISMOS EN INFRAESTRUCTURA HOSPITALARIA**

Autora  
**Alicia Rivera Rogel**

Director  
Albert Albareda Valls

Barcelona, julio 2020





UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

# *Metodología para evaluación rápida de susceptibilidad de pérdida de función por sismos en infraestructura hospitalaria*

**Alicia Rivera Rogel**

**ADVERTIMENT** La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del repositori institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) i el repositori cooperatiu TDX (<http://www.tdx.cat/>) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual **únicament per a usos privats** emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei UPCommons o TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a UPCommons (*framing*). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

**ADVERTENCIA** La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del repositorio institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) y el repositorio cooperativo TDR (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=es>) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual **únicamente para usos privados enmarcados** en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio UPCommons No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a UPCommons (*framing*). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

**WARNING** On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the institutional repository UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) and the cooperative repository TDX (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=en>) has been authorized by the titular of the intellectual property rights **only for private uses** placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading nor availability from a site foreign to the UPCommons service. Introducing its content in a window or frame foreign to the UPCommons service is not authorized (*framing*). These rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

*"El análisis debe hacerse tan simple como sea posible, pero no más simple"*

Albert Einstein



UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

## TESIS DOCTORAL

# Metodología para evaluación rápida de susceptibilidad de pérdida de función por sismos en infraestructura hospitalaria

**Autora**  
**Alicia Rivera Rogel**

**Director**  
Albert Albareda Valls, PhD., Arq.

Tesis presentada al  
Programa Tecnología de la Arquitectura, de la Edificación y del Urbanismo de la  
Universitat Politècnica de Catalunya  
En cumplimiento parcial de los requisitos para el  
Grado de Doctora

Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona  
Departamento Tecnología de la Arquitectura

Barcelona, julio 2020





Este proyecto de investigación fue posible gracias a la beca de estudios doctorales otorgada a la autora por parte del Gobierno de la República del Ecuador a través de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT).



Todos los derechos reservados  
Alicia Rivera Rogel  
2020

Las fotos contenidas en esta investigación se encuentran referenciadas en  
“Créditos de fotos”

*A mi familia:*

*Enrique y Marieta*

*Sandra, Diana y Guisella.*

*Danielito, Sofía, Mathías y Luciana*





## Agradecimientos

Mi más sincero reconocimiento a mi director, Dr. Albert Albareda Valls por su apoyo incondicional y motivación durante toda la investigación. Aprecio mucho su esfuerzo y compromiso para materializar esta investigación. Me gustaría agradecerle también por la oportunidad de participar en diferentes proyectos de investigación durante los estudios doctorales. Además, me gustaría agradecer la ayuda brindada al comienzo del presente estudio al Dr. Jaume Avellaneda y Dr. Francesc López Almansa. Asimismo, agradezco por las sugerencias a los Profesores del Departamento Tecnología de la Arquitectura y a los Profesores de la Escuela de Caminos del Campus Nord de la Universitat Politècnica de Catalunya.

Un especial agradecimiento al Ing. Ángel Sánchez Vaqué, parte del grupo JG Ingenieros, por su apoyo durante mis estudios de doctorado en lo que respecta a la función de los edificios hospitalarios.

Mi más profundo agradecimiento al Dr. Rodrigo Retamales Saavedra por la ayuda brindada en el momento más importante de la tesis doctoral. Agradezco las recomendaciones y correcciones como revisor experto en el tema, las cuales han permitido profundizar y completar la investigación.

Asimismo, me gustaría agradecer por las valiosas sugerencias en la revisión de la investigación al Dr. Pablo Parra Torres en calidad de revisor experto en el tema, así como a la Comisión Académica de la Universitat Politècnica de Catalunya.

Adicionalmente, me gustaría agradecer al Dr. Andrè Filiatrault y al Dr. Daniele Perrone por la oportunidad de adquirir y mejorar el conocimiento sobre el diseño sísmico de los componentes y sistemas no estructurales en la Scuola Universitaria Superiore IUSS - Pavia, Italia durante cuatro meses, quienes ayudaron a mejorar la propuesta metodológica para anticipar la pérdida de función en infraestructuras hospitalarias a partir del daño probable.

Además, me gustaría agradecer a todos los que contribuyeron en la obtención de información de los casos de estudio, así como la información de edificios hospitalarios en general.

Agradezco a mis amigos y colegas que brindaron su apoyo de diferentes maneras y ofrecieron sus manos durante la investigación, especialmente a Esteban, Paquita, Aleda, Juan Pablo, Caio, Güizide, Melisa, Mary, Caridad, Daniela, Cristina, Joan María, Johnny, Danilo, Carlos, Luz, Fernando, Robin, Doda, Yuliana, Johanna y Luis.

Por último, deseo expresar mi sincero agradecimiento a mi familia por su inestimable apoyo y amor.



# CONTENIDO

|   |           |
|---|-----------|
| Agradecimientos.....  | i         |
| CONTENIDO.....  | iii       |
| RESUMEN.....  | vii       |
| ABSTRACT.....   | ix        |
| LISTA DE FIGURAS.....   | xi        |
| LISTA DE TABLAS.....  | xiii      |
| LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS.....   | xv        |
| <b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Antecedentes y motivación.....  | 1         |
| 1.1.1 Componentes y sistemas no estructurales de edificios hospitalarios.....       | 3         |
| 1.1.2 Discusión de conceptos estadísticos.....                                      | 7         |
| 1.1.3 Curvas de fragilidad.....   | 8         |
| 1.1.4 Alcance de esta investigación.....  | 9         |
| 1.2 Objetivos.....  | 10        |
| 1.2.1 Objetivo principal.....   | 10        |
| 1.2.2 Objetivos específicos.....  | 11        |
| 1.3 Metodología.....  | 11        |
| 1.4 Organización de la tesis.....   | 14        |
| <b>2 ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO.....</b>  | <b>17</b> |
| 2.1 Edificios hospitalarios.....  | 17        |
| 2.1.1 Definición de hospital.....   | 18        |
| 2.1.2 Clasificación de hospitales.....  | 18        |
| 2.1.3 Principales elementos arquitectónicos.....                                    | 18        |
| 2.1.3.1 Materiales de acabados de fachadas.....                                     | 19        |
| 2.1.3.2 Particiones.....  | 19        |
| 2.1.3.3 Acabados en particiones.....  | 20        |
| 2.1.3.4 Falsos techos.....  | 20        |
| 2.1.3.5 Pavimentos.....   | 21        |
| 2.1.3.6 Puertas.....  | 21        |
| 2.1.4 Instalaciones.....  | 22        |
| 2.1.4.1 Instalación de energía eléctrica.....                                       | 23        |
| 2.1.4.2 Instalación de comunicaciones.....  | 25        |
| 2.1.4.3 Ascensores.....   | 27        |
| 2.1.4.4 Instalaciones de fontanería.....  | 28        |
| 2.1.4.5 Instalación de saneamiento.....   | 29        |
| 2.1.4.6 Instalaciones de extinción y detección de incendios.....                    | 29        |
| 2.1.4.7 Instalación de climatización.....   | 30        |
| 2.1.4.8 Instalación de combustible gaseoso.....                                     | 33        |
| 2.1.4.9 Instalación de combustible líquido.....                                     | 34        |
| 2.1.4.10 Instalación de transporte neumático de muestras, ropa sucia y basuras..... | 34        |
| 2.1.4.11 Instalación de seguridad.....  | 34        |
| 2.1.4.12 Instalaciones de sistemas de gestión.....                                  | 35        |
| 2.1.5 Equipamiento médico y contenidos.....   | 35        |
| 2.1.5.1 Unidad de cuidados intensivos (UCI).....                                    | 36        |
| 2.1.5.2 Neonatología.....   | 37        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.1.5.3  | Hospitalización.....   | 38        |
| 2.1.5.4  | Consulta externa.....  | 38        |
| 2.1.5.5  | Urgencias .....  | 39        |
| 2.1.5.6  | Hospital de día .....  | 40        |
| 2.1.5.7  | Bloque quirúrgico .....  | 41        |
| 2.1.5.8  | Recuperación post-operatoria.....  | 42        |
| 2.1.5.9  | Sala de partos .....   | 43        |
| 2.1.5.10 | Unidad de diálisis .....   | 44        |
| 2.1.5.11 | Diagnóstico por imágenes .....   | 45        |
| 2.1.5.12 | Medicina Nuclear .....   | 47        |
| 2.1.5.13 | Hemodinámica .....   | 48        |
| 2.1.5.14 | Radioterapia .....   | 49        |
| 2.1.5.15 | Endoscopia.....  | 50        |
| 2.1.5.16 | Laboratorio.....   | 50        |
| 2.1.5.17 | Farmacia.....  | 51        |
| 2.1.5.18 | Central de esterilización.....   | 53        |
| 2.1.5.19 | Unidad de rehabilitación .....   | 53        |
| 2.1.5.20 | Morgue y autopsias .....   | 54        |
| 2.1.5.21 | Cocina .....   | 55        |
| 2.1.5.22 | Lavandería.....  | 56        |
| 2.1.5.23 | Residuos .....   | 56        |
| 2.1.5.24 | Almacenes.....   | 57        |
| 2.1.5.25 | Mantenimiento .....  | 57        |
| 2.1.5.26 | Zonas administrativas.....   | 57        |
| 2.1.5.27 | Archivo de historias clínicas .....  | 57        |
| 2.1.5.28 | Enseñanza.....   | 58        |
| 2.1.5.29 | Gases medicinales .....  | 58        |
| 2.1.6    | Relación funcional entre instalaciones y equipamiento médico .....                                 | 60        |
| 2.2      | Aspectos básicos de ingeniería sísmica para edificios .....  | 62        |
| 2.2.1    | Movimientos sísmicos .....   | 62        |
| 2.2.1.1  | Generación y propagación de terremotos.....  | 62        |
| 2.2.1.2  | Cuantificación de la sismicidad.....   | 63        |
| 2.2.1.3  | Influencia del tipo de suelo .....   | 66        |
| 2.2.2    | Proyecto sismorresistente de edificios .....   | 68        |
| 2.2.3    | Revisión de literatura .....   | 69        |
| 2.2.3.1  | Metodologías de evaluación rápida de edificios en general .....                                    | 70        |
| 2.2.3.2  | Metodologías de evaluación rápida de edificios hospitalarios .....                                 | 74        |
| 2.2.3.3  | Fragilidades sísmicas .....  | 78        |
| <b>3</b> | <b>FORMULACIÓN PROPUESTA PARA ANTICIPAR DAÑOS SÍSMICOS.....</b>                                    | <b>81</b> |
| 3.1      | Análisis de componentes y sistemas no estructurales de edificios hospitalarios.....                | 82        |
| 3.1.1    | Descripción de los principales equipos médicos.....  | 82        |
| 3.1.2    | Agrupación de equipos médicos .....  | 84        |
| 3.2      | Gradación del daño .....   | 86        |
| 3.2.1    | Daño estructural .....   | 86        |
| 3.2.2    | Daño no estructural .....  | 87        |
| 3.2.3    | Relación entre los estados de daño y la pérdida de función en infraestructuras hospitalarias ..... | 87        |
| 3.2.4    | Identificación de la vulnerabilidad sísmica en elementos estructurales .....                       | 88        |
| 3.2.5    | Identificación de la vulnerabilidad sísmica en componentes y sistemas no estructurales .....       | 89        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 3.2.5.1  | Categoría de elementos arquitectónicos .....   | 89         |
| 3.2.5.2  | Categoría de instalaciones .....   | 91         |
| 3.2.5.3  | Categoría de equipamiento médico .....   | 93         |
| 3.2.5.4  | Categoría de contenidos .....  | 94         |
| 3.3      | Cuantificación de la solicitación sísmica.....   | 95         |
| 3.3.1    | Estimación de la deriva de entrepiso .....   | 96         |
| 3.3.2    | Estimación de la aceleración máxima de piso .....  | 98         |
| 3.4      | Evaluación del daño probable.....  | 100        |
| <b>4</b> | <b>CASOS DE ESTUDIO .....</b>  | <b>101</b> |
| 4.1      | Aspectos relevantes considerados en el estudio de casos reales .....   | 102        |
| 4.1.1    | Criterios de selección de casos de estudio.....  | 102        |
| 4.1.2    | Registros sísmicos seleccionados.....  | 107        |
| 4.2      | Análisis de casos reales .....   | 111        |
| <b>5</b> | <b>IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN UNA HERRAMIENTA AUTOMATIZADA .....</b>  | <b>147</b> |
| 5.1      | Estructura de la herramienta automatizada propuesta .....  | 148        |
| 5.1.1    | Estructura de la herramienta automatizada para estimar el desempeño sísmico estructural .....  | 149        |
| 5.1.2    | Estructura de la herramienta automatizada para estimar el desempeño sísmico en componentes y sistemas no estructurales .....                                       | 149        |
| 5.1.3    | Demandas sísmicas de los casos de estudio en el escenario de sismo registrado .....  | 154        |
| 5.2      | Calibración y validación de la herramienta automatizada .....  | 154        |
| 5.2.1    | Metodología de calibración de la herramienta automatizada propuesta .....  | 155        |
| 5.2.2    | Pesos de ponderación de entrada.....   | 156        |
| 5.2.3    | Proceso de calibración de la herramienta automatizada con los daños observados en los casos de estudio .....   | 156        |
| 5.2.4    | Validación de la herramienta automatizada propuesta .....  | 157        |
| 5.3      | Empleo de la herramienta automatizada para anticipar daños en infraestructura hospitalaria con diseño convencional y no convencional bajo escenarios sísmicos..... | 158        |
| 5.3.1    | Demandas sísmicas de acuerdo al escenario de la norma.....   | 159        |
| 5.3.2    | Demandas sísmicas esperadas en caso de diseñar o rehabilitar con aislación sísmica de base.....  | 160        |
| 5.3.3    | Aplicación de la herramienta automatizada en infraestructuras hospitalarias bajo escenarios sísmicos.....  | 164        |
| 5.3.3.1  | Uso de la herramienta automatizada en el escenario de sismos registrados en infraestructuras hospitalarias con base fija .....                                     | 164        |
| 5.3.3.2  | Uso de la herramienta automatizada en el escenario normativo en infraestructuras hospitalarias con base fija .....   | 166        |
| 5.3.3.3  | Uso de la herramienta automatizada en el caso de rehabilitar o diseñar con aislación sísmica de base .....   | 168        |
| 5.4      | Análisis y discusión de resultados .....   | 170        |
| 5.4.1    | Análisis de la calibración y validación de la herramienta automatizada .....   | 170        |
| 5.4.2    | Análisis del poder predictivo de la herramienta automatizada en la pérdida de función en infraestructuras hospitalarias .....                                      | 175        |
| 5.4.2.1  | Análisis del uso de la herramienta automatizada en infraestructuras hospitalarias existentes en el escenario de sismos registrados.....                            | 175        |
| 5.4.2.2  | Análisis del uso de la herramienta automatizada en infraestructuras hospitalarias con base fija en el escenario normativo .....                                    | 176        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.4.2.3  | Análisis del uso de la herramienta automatizada en el caso de rehabilitar o diseñar infraestructura hospitalaria con aislación sísmica de base ..... | 178        |
| 5.4.3    | Análisis del nivel de demanda sísmica que genera pérdida de función en infraestructura hospitalaria con base fija y con base aislada .....           | 180        |
| 5.4.3.1  | Análisis de las demandas sísmicas que generan pérdida de función en infraestructuras hospitalarias con base fija .....                               | 180        |
| 5.4.3.2  | Análisis de las demandas sísmicas que generan pérdida de función en infraestructuras hospitalarias con base aislada .....                            | 183        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSIONS .....</b>   | <b>187</b> |
| 6.1      | Summary and conclusions .....  | 187        |
| 6.2      | Recommendations for future research .....  | 190        |
|          | <b>REFERENCIAS .....</b>   | <b>193</b> |
|          | <b>CRÉDITOS DE FOTOS .....</b>   | <b>207</b> |
|          | <b>ANEJOS .....</b>  | <b>217</b> |

## RESUMEN

Los hospitales constituyen una parte fundamental del sistema de salud de un país y se consideran instalaciones esenciales para afrontar desastres naturales. No obstante, pueden ser en gran medida vulnerables. La pérdida de función, incluso por un corto período de tiempo, puede ser crítica para las personas que se encuentran dentro del hospital, así como las que necesitan atención médica urgente. A pesar de la importancia de estos edificios, muchos hospitales han resultado severamente dañados y algunos de ellos han perdido su capacidad de operación después de eventos sísmicos moderados. Recientes acontecimientos sísmicos, como el terremoto de Ecuador  $M_w$  7.8 de 2016, enfatizó el papel estratégico de los componentes y sistemas no estructurales después de un determinado evento sísmico. Las observaciones de campo mostraron que la pérdida de función de la mayoría de los edificios hospitalarios fue causada principalmente por los daños producidos en falsos techos, particiones interiores y fachadas, daños en los sistemas de suministro de agua y vuelco de equipos mecánicos y médicos, entre otros. Sin embargo, solo unos pocos estudios han discutido las consecuencias del daño no estructural en la pérdida de función por sismos en infraestructura hospitalaria.

En este estudio, se presenta una metodología para la evaluación rápida de la susceptibilidad de pérdida de función por sismos en infraestructura hospitalaria mediante el uso de una herramienta automatizada. En particular, la herramienta permite evaluar la vulnerabilidad operativa de la infraestructura de salud después de eventos sísmicos severos o excepcionalmente severos. Los componentes y sistemas no estructurales son clasificados según los procedimientos de FEMA y de la Organización Mundial de la Salud como elementos arquitectónicos (exteriores e interiores), instalaciones (equipos y sistemas distribuidos), equipamiento médico (servicios y gases médicos) y contenidos (mobiliario, estanterías, accesorios, etc.). Se consideran las posibles pérdidas físicas causadas por las derivas de entrepiso y las aceleraciones de piso. La estimación del daño se efectúa utilizando curvas de fragilidad disponibles en bases de datos como las de FEMA P-58, HAZUS y reportes de pruebas experimentales o métodos analíticos. La herramienta se calibra considerando los daños observados durante eventos sísmicos recientes. Las acciones sísmicas que generaron estos daños se estiman a partir de acelerogramas registrados en las estaciones sismológicas más cercanas a los hospitales estudiados. La calibración efectuada se basa en comparar el daño observado con el estimado usando la herramienta propuesta, obtenido de evaluar las curvas de fragilidad disponibles para las demandas sísmicas estimadas.

Se espera que esta herramienta automatizada para evaluación rápida de susceptibilidad de pérdida de función por sismos contribuya a una mejor comprensión de la importancia del desempeño sísmico de componentes y sistemas no estructurales en infraestructura hospitalaria. Este trabajo será útil a los gerentes y al personal del hospital, así como a los encargados de la toma de decisiones en los ministerios de salud de un país, para anticipar la pérdida de función en infraestructuras de salud o en una red de hospitales, en un área administrativa local, regional o de país. En consecuencia, la herramienta permitirá determinar las acciones y medidas requeridas para mejorar la seguridad necesaria para alcanzar la continuidad de operación de los componentes y sistemas no estructurales, y en consecuencia de la infraestructura hospitalaria, ante un evento sísmico.





## ABSTRACT

Hospitals are a fundamental part of a country's health system and are considered essential facilities for dealing with natural disasters. Nevertheless, hospitals may be highly vulnerable structures. Loss of functionality, even for a short period of time, may be critical for people inside the hospital, as well as for those who may need urgent medical attention following a natural disaster. Despite the importance of these buildings, many hospitals have resulted severely damaged, and some have lost functionality after moderate earthquakes. Recent seismic events, such as the 2016 Ecuador  $M_w$  7.8 earthquake, highlighted the role of nonstructural components and systems after a seismic event. The damage observed showed that the loss of functionality of most hospital buildings was mostly related to damage of ceilings, partitions, water supply systems, and overturning of mechanical and medical equipment, among others. However, only a few studies have addressed the consequences of nonstructural damage in the functionality loss of health facilities.

In this study, a methodology for rapid visual assessment of susceptibility of functional loss due to earthquakes in health infrastructure by using an automated tool is presented. In particular, the tool allows estimating the operational vulnerability of the infrastructure following strong ground motions. The nonstructural elements are classified according to FEMA and World Health Organization procedures as architectural components (exterior and interior), building utility systems (equipment and distributed systems of critical support services), medical equipment (medical services and medical gases), and contents (cabinets, furniture, fixtures, and similar). Potential physical losses caused by story drifts and floor accelerations are considered. The prediction of damage is determined by using fragility curves taken mainly from the FEMA P-58 database, HAZUS, test reports and analytical methods. The tool is calibrated using damage observed during recent earthquakes affecting 17 case studies. The seismic actions that generated these damages are estimated from accelerograms recorded by the closest seismological stations. The calibration is based on comparing the observed damage with the predicted one, obtained from combining the fragility curves with the estimated actual seismic demands.

This automated tool for rapid assessment of susceptibility of functional loss due to earthquakes is expected to contribute to a better understanding of the seismic performance of nonstructural components and systems in health infrastructure. This work will be useful for hospital managers and staff, as well as decision-makers in the health ministries of a country, in order to anticipate the functional loss expected in health infrastructure or in a health care network within an administrative area local, or at regional or country-level. Consequently, the presented tool can be used to determine the actions and measures that are required in order to improve safety and achieve continuous operation of health facilities during and after seismic events.



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1-1. Daño en Hospitales durante varios eventos sísmicos [USGS, 2017; Cortesía de Servicio de Salud Concepción; Morales, 2017]..... | 2  |
| Figura 1-2. Representación conceptual de los componentes y sistemas no estructurales .....  | 3  |
| Figura 1-3. Deslizamiento y vuelco por fuerzas de inercia [FEMA, 2012a].....  | 5  |
| Figura 1-4. Daño no estructural debido a la deformación del edificio [Adaptado de FEMA, 2012a].....                                       | 5  |
| Figura 1-5. Daño no estructural en juntas [FEMA, 2012a].....  | 6  |
| Figura 1-6. Ilustración de las curvas de fragilidad [FEMA, 2012b].....  | 9  |
| Figura 2-1. Instalaciones hospitalarias .....   | 23 |
| Figura 2-2. Acometida eléctrica desde la Compañía eléctrica .....   | 23 |
| Figura 2-3. Grupo electrógeno .....   | 24 |
| Figura 2-4. Centro de procesamiento de datos .....  | 26 |
| Figura 2-5. Ascensores [FEMA, 2012a] .....  | 28 |
| Figura 2-6. Producción de frío y calor .....  | 31 |
| Figura 2-7. Distribución del agua.....  | 32 |
| Figura 2-8. Generación de aire.....   | 32 |
| Figura 2-9. Flujo laminar en quirófano .....  | 33 |
| Figura 2-10. Unidad de cuidados intensivos .....  | 36 |
| Figura 2-11. Neonatología .....   | 37 |
| Figura 2-12. Hospitalización .....  | 38 |
| Figura 2-13. Consulta externa .....   | 39 |
| Figura 2-14. Urgencias.....   | 40 |
| Figura 2-15. Hospital de día.....   | 41 |
| Figura 2-16. Bloque quirúrgico.....   | 41 |
| Figura 2-17. Recuperación post-operatoria .....   | 43 |
| Figura 2-18. Sala de partos.....  | 44 |
| Figura 2-19. Unidad de diálisis .....   | 44 |
| Figura 2-20. Equipos apoyados en el piso.....   | 45 |
| Figura 2-21. Equipos con anclaje al piso .....  | 46 |
| Figura 2-22. Equipos que se deslizan.....   | 46 |
| Figura 2-23. Sala de RMN convencional .....   | 47 |
| Figura 2-24. Sala de Medicina Nuclear.....  | 48 |
| Figura 2-25. Sala de Hemodinámica .....   | 48 |
| Figura 2-26. Sala de radioterapia .....   | 49 |
| Figura 2-27. Laboratorio .....  | 51 |
| Figura 2-28. Farmacia .....   | 52 |
| Figura 2-29. Central de esterilización .....  | 53 |
| Figura 2-30. Unidad de rehabilitación.....  | 54 |
| Figura 2-31. Morgue y autopsias .....   | 54 |
| Figura 2-32. Cocina.....  | 55 |
| Figura 2-33. Lavandería .....   | 56 |
| Figura 2-34. Depósitos de oxígeno líquido y nitrógeno líquido.....  | 58 |
| Figura 2-35. Baterías de botellas de reserva.....   | 59 |
| Figura 2-36. Sala de bombas de vacío.....   | 59 |
| Figura 2-37. Mecanismos focales [Adaptado de Kramer, 1996].....   | 62 |
| Figura 2-38. Definición de términos sísmicos [Adaptado de USGS, 2017].....  | 63 |
| Figura 2-39. Ondas internas [USGS, 2017] .....  | 63 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 2-40. Ondas superficiales [USGS, 2017].....  | 63  |
| Figura 2-41. Acelerograma .....   | 64  |
| Figura 2-42. Espectro de diseño. Eurocode 8 [CEN, 2004].....                                      | 65  |
| Figura 2-43. Espectro de pseudo-aceleración .....   | 65  |
| Figura 2-44. Primeros modos de vibración de un edificio [NCSE-02, 2002].....                      | 66  |
| Figura 2-45. Respuesta del suelo [Guevara, 2012] .....  | 67  |
| Figura 2-46. Criterios conceptuales de proyecto sismorresistente de edificios.....                | 69  |
| Figura 3-1. Metodología de cuantificación de demanda sísmica .....                                | 95  |
| Figura 3-2. Diagrama del proceso de estimación de la deriva promedio de la estructura .....       | 96  |
| Figura 3-3. Ilustración del proceso de estimación de aceleración máxima de piso .....             | 99  |
| Figura 3-4. Escenarios para anticipar el daño probable .....                                      | 100 |
| Figura 4-1. Localización de eventos sísmicos de los casos de estudio [Fowler, 1990] .....         | 102 |
| Figura 4-2. Vistas generales del Hospital Olive View .....  | 112 |
| Figura 4-3. Distancia a la fuente y a la estación sismológica de referencia para el caso 1 .....  | 112 |
| Figura 4-4. Excitación sísmica para el caso 1 .....   | 112 |
| Figura 4-5. Daños estructurales en el caso 1.....   | 113 |
| Figura 4-6. Daños no estructurales en el caso 1.....  | 113 |
| Figura 4-7. Vistas generales del Hospital Olive View - UCLA Medical Center .....                  | 114 |
| Figura 4-8. Distancia a la fuente y a la estación sismológica de referencia para el caso 2 .....  | 114 |
| Figura 4-9. Excitación sísmica para el caso 2.....  | 114 |
| Figura 4-10. Daños estructurales en el caso 2.....  | 115 |
| Figura 4-11. Daños no estructurales en el caso 2.....   | 115 |
| Figura 4-12. Vistas generales del Hospital Adazapari SSK.....                                     | 116 |
| Figura 4-13. Distancia a la fuente y a la estación sismológica de referencia para el caso 3 ..... | 116 |
| Figura 4-14. Excitación sísmica para el caso 3.....   | 116 |
| Figura 4-15. Daños estructurales en el caso 3.....  | 117 |
| Figura 4-16. Daños no estructurales en el caso 3.....   | 117 |
| Figura 4-17. Vistas generales del Hospital Shiu – Tuan.....                                       | 118 |
| Figura 4-18. Distancia a la fuente y a la estación sismológica de referencia para el caso 4 ..... | 118 |
| Figura 4-19. Excitación sísmica para el caso 4.....   | 118 |
| Figura 4-20. Daños estructurales en el caso 4.....  | 119 |
| Figura 4-21. Daños no estructurales en el caso 4.....   | 119 |
| Figura 4-22. Vistas generales del Hospital Nacional San Rafael.....                               | 120 |
| Figura 4-23. Distancia a la fuente y a la estación sismológica de referencia para el caso 5 ..... | 120 |
| Figura 4-24. Excitación sísmica para el caso 5.....   | 120 |
| Figura 4-25. Daños estructurales en el caso 5.....  | 121 |
| Figura 4-26. Daños no estructurales en el caso 5.....   | 121 |
| Figura 4-27. Vistas generales del Hospital de la comunidad de Kona.....                           | 122 |
| Figura 4-28. Distancia a la fuente y a la estación sismológica de referencia para el caso 6 ..... | 122 |
| Figura 4-29. Excitación sísmica para el caso 6.....   | 122 |
| Figura 4-30. Daños estructurales en el caso 6.....  | 123 |
| Figura 4-31. Daños no estructurales en el caso 6.....   | 123 |
| Figura 4-32. Vistas generales del Hospital Regional Ica .....                                     | 124 |
| Figura 4-33. Distancia a la fuente y a la estación sismológica de referencia para el caso 7 ..... | 124 |
| Figura 4-34. Excitación sísmica para el caso 7.....   | 124 |
| Figura 4-35. Daños estructurales en el caso 7.....  | 125 |
| Figura 4-36. Daños no estructurales en el caso 7.....   | 125 |
| Figura 4-37. Vistas generales del Hospital San Salvatore .....                                    | 126 |
| Figura 4-38. Distancia a la fuente y a la estación sismológica de referencia para el caso 8 ..... | 126 |
| Figura 4-39. Excitación sísmica para el caso 8.....   | 126 |
| Figura 4-40. Daños estructurales en el caso 8.....  | 127 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 4-41. Daños no estructurales en el caso 8 .....   | 127 |
| Figura 4-42. Vistas generales del Hospital “La Torre” .....  | 128 |
| Figura 4-43. Distancia a la fuente y a la estación sismológica de referencia para el caso 9 ....         | 128 |
| Figura 4-44. Excitación sísmica para el caso 9 .....   | 128 |
| Figura 4-45. Daños estructurales en el caso 9 .....  | 129 |
| Figura 4-46. Daños no estructurales en el caso 9 .....   | 129 |
| Figura 4-47. Vistas generales del Hospital de Curanilahue .....  | 130 |
| Figura 4-48. Distancia a la fuente y a la estación sismológica de referencia para el caso 10 ..          | 130 |
| Figura 4-49. Excitación sísmica para el caso 10 .....  | 130 |
| Figura 4-50. Daños estructurales en el caso 10 .....   | 131 |
| Figura 4-51. Daños no estructurales en el caso 10 .....  | 131 |
| Figura 4-52. Vistas generales del Hospital Rafael Méndez .....   | 132 |
| Figura 4-53. Distancia a la fuente y a la estación sismológica de referencia para el caso 11 ..          | 132 |
| Figura 4-54. Excitación sísmica para el caso 11 .....  | 132 |
| Figura 4-55. Daños estructurales en el caso 11 .....   | 133 |
| Figura 4-56. Daños no estructurales en el caso 11 .....  | 133 |
| Figura 4-57. Vistas generales del Hospital Santa María Bianca (edificio de servicios generales)<br>..... | 134 |
| Figura 4-58. Distancia a la fuente y a la estación sismológica de referencia para el caso 12 ..          | 134 |
| Figura 4-59. Excitación sísmica para el caso 12 .....  | 134 |
| Figura 4-60. Daños estructurales en el caso 12 .....   | 135 |
| Figura 4-61. Daños no estructurales en el caso 12 .....  | 135 |
| Figura 4-62. Vistas generales del Hospital Miguel H. Alcívar .....                                       | 136 |
| Figura 4-63. Distancia a la fuente y a la estación sismológica de referencia para el caso 13 ..          | 136 |
| Figura 4-64. Excitación sísmica para el caso 13 .....  | 136 |
| Figura 4-65. Daños estructurales en el caso 13 .....   | 137 |
| Figura 4-66. Daños no estructurales en el caso 13 .....  | 137 |
| Figura 4-67. Vistas generales del Hospital General de Chone Dr. Napoleón Dávila Córdova                  | 138 |
| Figura 4-68. Distancia a la fuente y a la estación sismológica de referencia para el caso 14 ..          | 138 |
| Figura 4-69. Excitación sísmica para el caso 14 .....  | 138 |
| Figura 4-70. Daños estructurales en el caso 14 (Bloque 2).....   | 139 |
| Figura 4-71. Daños no estructurales en el caso 14 (Bloque 2).....  | 139 |
| Figura 4-72. Vistas generales del Hospital IESS .....  | 140 |
| Figura 4-73. Distancia a la fuente y a la estación sismológica de referencia para el caso 15 ..          | 140 |
| Figura 4-74. Excitación sísmica para el caso 15 .....  | 140 |
| Figura 4-75. Daños estructurales en el caso 15 .....   | 141 |
| Figura 4-76. Daños no estructurales en el caso 15 .....  | 141 |
| Figura 4-77. Vistas generales del Hospital Rodríguez Zambrano .....                                      | 142 |
| Figura 4-78. Distancia a la fuente y a la estación sismológica de referencia para el caso 16 ..          | 142 |
| Figura 4-79. Excitación sísmica para el caso 16 .....  | 142 |
| Figura 4-80. Daños estructurales en el caso 16 .....   | 143 |
| Figura 4-81. Daños no estructurales en el caso 16 .....  | 143 |
| Figura 4-82. Vistas generales del Hospital de Gineco Obstetricia 3 .....                                 | 144 |
| Figura 4-83. Distancia a la fuente y a la estación sismológica de referencia para el caso 17 ..          | 144 |
| Figura 4-84. Excitación sísmica para el caso 17 .....  | 144 |
| Figura 4-85. Daños estructurales en el caso 17 .....   | 145 |
| Figura 4-86. Daños no estructurales en el caso 17 .....  | 145 |
| Figura 5-1. Propuesta conceptual de la metodología propuesta para la herramienta automatizada<br>.....   | 148 |
| Figura 5-2. Metodología de calibración de la herramienta automatizada propuesta .....                    | 155 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5-3. Comparación de respuesta sísmica de edificio sin aislación y edificio con sísmica de base [CDT-CH, 2011] .....                              | 161 |
| Figura 5-4. Representación gráfica de estimación del desplazamiento de techo en una estructura con aislación sísmica de base .....                      | 161 |
| Figura 5-5. Análisis de calibración de la categoría elementos arquitectónicos.....  | 171 |
| Figura 5-6. Análisis de calibración de la categoría de instalaciones.....   | 172 |
| Figura 5-7. Análisis de calibración de la categoría equipamiento médico.....  | 173 |
| Figura 5-8. Análisis de calibración de la categoría de contenidos .....   | 174 |
| Figura 5-9. Pérdida de función en infraestructuras hospitalarias en el escenario de sismo registrado.....   | 176 |
| Figura 5-10. Pérdida de función en infraestructuras hospitalarias con base fija en el escenario de la norma.....  | 177 |
| Figura 5-11. Pérdida de función en infraestructuras hospitalarias en el caso de rehabilitar con aislación sísmica de base.....                          | 179 |
| Figura 5-12. Demanda sísmica que genera distintos niveles de daño estructural .....   | 181 |
| Figura 5-13. Demanda sísmica que genera distintos niveles de daño no estructural .....  | 182 |
| Figura 5-14. Demanda sísmica que genera distintos niveles de daño no estructural sin rehabilitar en infraestructuras con aislación sísmica de base..... | 184 |

## LISTA DE TABLAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 1-1. Lista de los principales componentes y sistemas no estructurales sensibles a la aceleración y a la deriva [FEMA, 2012c] .....   | 7   |
| Tabla 2-1. Relación entre instalaciones y equipamiento médico [Adaptado de Bambarén y Alatrística, 2008] .....   | 61  |
| Tabla 2-2. Valores de los coeficientes para calcular el periodo fundamental [ASCE, 2016].....  | 66  |
| Tabla 2-3. Clasificación del suelo ASCE 7-16 [2016] .....  | 67  |
| Tabla 2-4. Constantes de la regresión para sismos interplaca $M_w \geq 6.5$ [Contreras y Boroschek, 2015].....   | 68  |
| Tabla 2-5. Escala numérica del Índice de vulnerabilidad de [Benedetti y Petrini, 1984].....  | 71  |
| Tabla 2-6. Resumen de recomendaciones de acuerdo al “índice de seguridad” [WHO/PAHO, 2015].....  | 76  |
| Tabla 2-7. Valores sugeridos para el factor de edad $AF$ y el factor de estado real $ASF$ y el aumento porcentual del índice de vulnerabilidad estructural $SVI$ [Lang et al., 2010] .....   | 77  |
| Tabla 3-1. Principales equipos médicos de Servicios Asistenciales .....  | 82  |
| Tabla 3-2. Equipos susceptibles a deslizamiento: alta relación ancho/altura .....  | 85  |
| Tabla 3-3. Equipos susceptibles a vuelco: baja relación ancho/altura .....   | 85  |
| Tabla 3-4. Relación del desempeño sísmico estructural y no estructural en la pérdida de función en infraestructuras hospitalarias [Adaptado de FEMA, 2000; Boroschek y Retamales, 2004]..... | 88  |
| Tabla 3-5. Tipos de sistemas resistentes estructurales HAZUS [FEMA, 2012c].....  | 88  |
| Tabla 4-1. Principales características de los hospitales analizados .....  | 107 |
| Tabla 4-2. Movimientos sísmicos que generaron los daños observados .....   | 109 |
| Tabla 4-3. Acelerogramas registrados.....  | 110 |
| Tabla 4-4. Daños observados en los hospitales analizados .....   | 111 |
| Tabla 5-1. Umbrales de daños RISK-EU [Milutinovic y Trendafiloski, 2003] .....   | 153 |
| Tabla 5-2. Demandas sísmicas estimadas para los casos de estudio (sismo registrado) .....  | 154 |
| Tabla 5-3. Pesos de entrada (%) para subcategorías de componentes y sistemas no estructurales .....  | 156 |
| Tabla 5-4. Calibración caso de estudio 1 .....   | 157 |
| Tabla 5-5. Resultados de la validación de la herramienta automatizada propuesta .....  | 158 |
| Tabla 5-6. Demandas sísmicas en el escenario normativo .....   | 159 |
| Tabla 5-7. Demandas sísmicas reducidas de los casos de estudio.....  | 163 |
| Tabla 5-8. Resultado del uso de la herramienta automatizada en el escenario de sismos registrados en infraestructuras hospitalarias existentes .....   | 165 |
| Tabla 5-9. Resultado del uso de la herramienta automatizada en el escenario sísmico normativo .....  | 166 |
| Tabla 5-10. Resultado del uso de la herramienta automatizada en el caso de rehabilitar o diseñar con aislación sísmica de base .....   | 168 |
| Tabla 5-11. Comparativa entre el peso de ponderación de entrada (%) y el peso de ponderación de salida para subcategorías de los componentes y sistemas no estructurales .....               | 174 |
| Tabla 5-12. Demandas sísmicas que generan pérdida de función en infraestructuras hospitalarias rehabilitadas con base fija.....  | 183 |
| Tabla 5-13. Demandas sísmicas que generan pérdida de función en infraestructuras hospitalarias con aislación sísmica de base. Componentes y sistemas no estructurales sin rehabilitar .      | 185 |





# LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

## Alfabeto latino. Minúscula

|           |   |
|-----------|---|
| $G$       | Aceleración de la gravedad.   |
| $h$       | Denominación de cada infraestructura hospitalaria.  |
| $h_i$     | Espesor de cada estrato de suelo.   |
| $i$       | Categoría de componentes no estructurales.  |
| $j$       | Subcategoría asociada a la categoría de componentes no estructurales.   |
| $k$       | Tipo de componente en su condición agrupado.  |
| $l$       | Subtipo de componente asociado al “tipo de componente”.   |
| $n_{ijk}$ | Número máximo del “tipo de componente” en su condición agrupado de la categoría asociada a la subcategoría analizada. |
| $v_i$     | Velocidad de propagación de ondas corte de cada estrato de suelo.   |
| $x$       | Coefficiente para calcular el período fundamental del edificio.   |
| $\bar{x}$ | Valor de la media.  |
| $x_m$     | Valor de la mediana.  |
| $z$       | Coordenada vertical de la ubicación a lo alto del edificio del componente o sistema no estructural.                   |

## Alfabeto latino. Mayúscula

|                            |   |
|----------------------------|---|
| $AF$                       | Factor de edad del edificio hospitalario analizado.   |
| $ASF$                      | Factor de estado real del edificio.   |
| $A_i$                      | Amenaza sísmica (Seismic Hazard).   |
| $B/B_j$                    | Índice de construcción.   |
| $DS_l$                     | Estados de daño para cada “subtipo de componente”.  |
| $DS_{ijkl}$                | Índice del estado de daño de la categoría asociado tanto a la subcategoría, al tipo de componente y al subtipo de componente. |
| $DS_{ijk}$                 | Importancia de cada “tipo de componente”.   |
| $E_0$                      | Índice sísmico básico de estructuras.   |
| $G$                        | Centro de gravedad.   |
| $H$                        | Altura del edificio.  |
| $H/H_j$                    | Índice de riesgo humano.  |
| $I_A$                      | Intensidad de Arias.  |
| $I_N$                      | Índice sísmico de elementos no estructurales.   |
| $I_{NSTR_i}$               | Índice de Vulnerabilidad de la categoría.   |
| $I_{NSTR_{ij}}$            | Índice de Vulnerabilidad para cada categoría asociada a la subcategoría analizada.  |
| $I_{NSTR_{p_{ij}}}$        | Índice de Vulnerabilidad preliminar de cada categoría asociada a la subcategoría analizada.                                   |
| $\overline{I_{NSTR_{ij}}}$ | Valor promedio del Índice de Vulnerabilidad para cada categoría asociada a la subcategoría analizada.                         |
| $I_{STR}$                  | Desempeño sísmico estructural.  |
| $I_{NSTR}$                 | Desempeño sísmico no estructural.   |
| $I_S$                      | Índice sísmico estructural.   |
| $I_{SO}$                   | Índice de demanda de estructura sísmica.  |
| $I_p$                      | Índice primario.  |
| $I_v$                      | Índice de vulnerabilidad.   |

|                 |  |
|-----------------|--|
| $I_{PVij}$      | Índice Primario de Vulnerabilidad de la categoría asociado a la subcategoría analizada.                  |
| $K_i$           | Clase de calificación de la vulnerabilidad.  |
| $L_j$           | Longitud de la pared.  |
| $MF$            | Factores de modificación.  |
| $M_L$           | Magnitud local.  |
| $M_S$           | Magnitud de superficie.  |
| $M_w$           | Magnitud de momento.   |
| $NVI$           | Índice de vulnerabilidad no estructural.   |
| $NSI$           | Índice no estructural.   |
| $PS_a$          | Espectro de pseudoaceleración.   |
| $P_{ijk}$       | Pesos iniciales correspondientes a cada “tipo de componente”.  |
| $P_{DS_{ijk}}$  | Puntuación asignada al nivel máximo posible de vulnerabilidad para el “tipo de componente”.              |
| $P_{DS_{ij}}$   | Daño máximo anticipado de la categoría asociado a la subcategoría analizada.                             |
| $P_{ijk_a}$     | Peso ajustado al caso de estudio en la calibración de la herramienta automatizada.                       |
| $P_{ijk_e}/P_e$ | Peso encontrado después de la calibración de casos reales.   |
| $P_{ijk_h}$     | Pesos que se ajustan al caso de estudio $h$ , en el proceso de calibración.                              |
| $R$             | Rigidez.   |
| $R_{ie}$        | Riesgo sísmico (Seismic Risk).   |
| $R_{epi}$       | Distancia epicentral.  |
| $R_{hypo}$      | Distancia hipocentral  |
| $R_{rup}$       | Distancia de ruptura (más cercana) es perpendicular al plano de falla.                                   |
| $S_{ax}/S_{ay}$ | Espectros de aceleración en direcciones $x/y$ .  |
| $S_d$           | Espectro de desplazamiento.  |
| $S_D$           | Índice de irregularidad.   |
| $SI$            | Índice de Seguridad Hospitalario según [WHO/PAHO, 2015].   |
| $SI$            | Índice estructural en el “Método del Consejo Nacional de Investigación de Canadá”.                       |
| $SPI$           | Puntaje final en la evaluación.  |
| $SVI$           | Índice de vulnerabilidad estructural.  |
| $T$             | Índice de tiempo.  |
| $T_1/T_e/T_i$   | Período fundamental de la estructura/ período agrietado/ período de la estructura con aislación sísmica. |
| $T_{Fx}/T_{Fy}$ | Período fundamental del edificio en las direcciones $x/y$ .  |
| $V_e$           | Vulnerabilidad (Vulnerability).  |
| $V_{S,30}$      | Velocidad de propagación de las ondas de corte ( $S$ ) en los primeros 30 m de profundidad.              |
| $W_{ij}$        | Importancia de cada categoría asociada a la subcategoría analizada.                                      |
| $\bar{W}_{ij}$  | Valor promedio de la importancia de cada categoría asociada a la subcategoría analizada.                 |
| $W_j$           | Índice de área en la Ec. (2-7).  |
| $W_i$           | Peso ponderado de cada parámetro en la Ec. (2-4).  |

### Alfabeto griego. Minúscula

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| $\alpha$                       | Relación entre la aceleración máxima del terreno y la aceleración de gravedad. |
| $\beta$                        | Desviación estándar logarítmica.   |
| $\bar{\delta}$                 | Deriva de entrepiso promedio.  |
| $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ | Derivas de planta (piso).  |

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| $\delta_{\text{global}}$        | Deriva global o de techo.  |
| $\varepsilon$                   | Desplazamiento de la estructura (estructura con aislación sísmica de base).  |
| $\varepsilon_r / \varepsilon_a$ | Error relativo/ error absoluto.  |
| $\zeta$                         | Razón de amortiguamiento.  |
| $\Phi_{ij}$                     | Factor de regulación del efecto de número de “tipo de componentes” de la categoría asociada a la subcategoría analizada. |

### Alfabeto griego. Mayúscula

|            |   |
|------------|---|
| $\Delta_r$ | Desplazamiento de techo.                                |
| $\phi$     | Función de distribución acumulativa logarítmica normal. |

### Abreviaturas

|                 |   |
|-----------------|---|
| CPD             | Centro de procesamiento de datos.   |
| EDP             | Parámetro de demanda de ingeniería (Engineering Demand Parameter).  |
| DS              | Estado de daño (Damage State).  |
| HAZUS           | Hazards – Peligro y US – Estados Unidos. Es una herramienta de análisis de peligros naturales basada en un sistema de información geográfica. Desarrollada y distribuida por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA) de los Estados Unidos. |
| IM              | Medida de intensidad (Intensity Measure).   |
| IVIM            | Método Italiano del Índice de Vulnerabilidad (Italian Vulnerability Index Method).  |
| FEMA            | Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (Federal Emergency Management Agency) de los Estados Unidos.  |
| OMS<br>(WHO)    | Organización Mundial de la Salud (World Health Organization).   |
| OPS<br>(PAHO)   | Organización Panamericana de la Salud (Pan American Health Organization).   |
| PBEE            | Ingeniería sísmica basada en el desempeño (Performance-Based Earthquake Engineering).   |
| PEER            | Centro de Investigación de Ingeniería Sísmica del Pacífico (Pacific Earthquake Engineering Research Center).  |
| P               | Ondas primarias.  |
| PGA             | Aceleración máxima del suelo (Peak ground acceleration).  |
| PFA             | Aceleración máxima de piso (Peak floor acceleration).   |
| RISK-EU         | Proyecto de la Comisión Europea.  |
| RVS             | Evaluación Visual Rápida (Rapid Visual Screening).  |
| RMN             | Resonancia Magnética Nuclear.   |
| S               | Ondas secundarias.  |
| SAI (UPS)       | Sistema de alimentación ininterrumpida (Uninterruptible power supply).  |
| SDC             | Niveles de diseño sísmico (Seismic Design Category).  |
| 1GLD<br>(SDOF)  | Sistema de un grado de libertad (single-degree-of-freedom).   |
| N-GDL<br>(MDOF) | Sistema de multi-grado de libertad (multi-degree-of-freedom).   |
| TAC             | Tomografía axial computarizada.   |
| UCI             | Unidad de Cuidados Intensivos (Intensive Care Unit).  |
| UNESCO          | Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization).  |
| VRV             | Volumen de refrigerante variable.   |



# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes y motivación

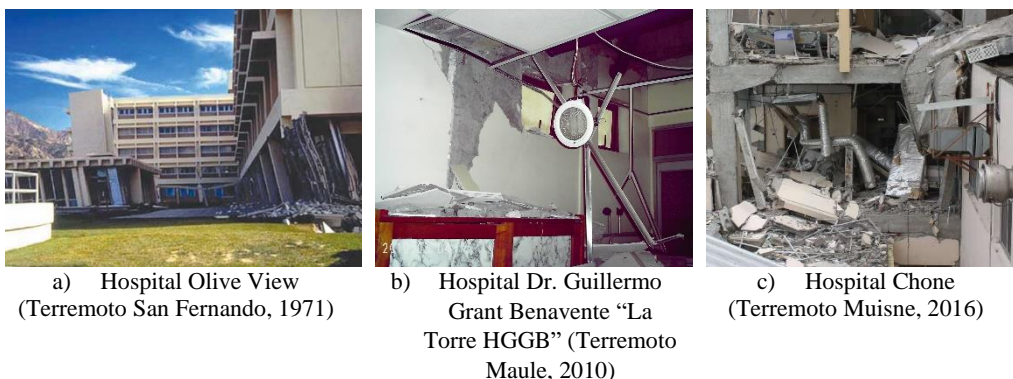
Desastres naturales ocurridos en el mundo en los últimos 20 años han cobrado la vida a por lo menos a 1.3 millones de personas y han dejado a otros 4.400 millones de heridos, entre ellos personas sin hogar o que han requerido asistencia médica de emergencia. De estos desastres naturales, los terremotos han causado 747.234 víctimas, valor que representa el 56% del total de víctimas [CRED/UNISDR, 2018]. Los terremotos han demostrado ser uno de los desastres naturales y causas más importantes de pérdidas económicas y sociales en las regiones afectadas, sin hacer distinción entre los países desarrollados y en vías de desarrollo. No obstante, sus consecuencias pueden ser muy diferentes. En este sentido, los hospitales juegan un papel vital ya que deben estar en pleno funcionamiento con una atención ininterrumpida para proteger la vida de las personas que se encuentran en su interior, así como para brindar atención médica de emergencia para el creciente número de pacientes lesionados como consecuencia del evento de la naturaleza. Cualquier pérdida de la capacidad de operación, incluso por un corto período de tiempo, en tan solo uno de sus componentes o sistemas no estructurales, elementos que no son parte del sistema estructural, puede resultar crítico para la continuidad de operación del

- 1 INTRODUCCIÓN
- 1.1 Antecedentes y motivación
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Metodología
- 1.4 Organización de la tesis

establecimiento de salud. Además, los hospitales representan más del 70% del gasto público en salud en los países [WHO/PAHO, 2015]. A pesar de la importancia que tiene este tipo de edificaciones, múltiples hospitales han experimentado daños de distinta envergadura, e incluso han presentado daños que han requerido su demolición.

Desastres naturales como los terremotos de San Fernando (1971), México (1985), Northridge (1994), Kobe (1995) y Chi-Chi (1999), han marcado un antes y un después en los criterios de diseño sísmico de hospitales, modificando las normativas sísmicas de referencia internacional. Como ejemplo se tiene al emblemático Hospital Olive View en California (1971) y el Hospital Benito Juárez en México (1985). En este último hospital se produjo la muerte de 561 personas. Dichos establecimientos de salud, situados en California y México, respectivamente, presentaron daños estructurales entre extenso y completo, respectivamente [Johnston y Strand, 1973; PAHO, 2000a]. Contrariamente, la gran mayoría de hospitales, durante los terremotos de los años 1994, 1995 y 1999, ocurridos en Estados Unidos, Japón y Taiwán, respectivamente, centraron sus daños en sus componentes y sistemas no estructurales, tales como equipos mecánicos, sistemas de suministro de agua, equipos fijos y móviles, tanto de escritorio, médicos y de laboratorio que carecían de sujeción, entre otros, siendo determinante en la pérdida de función en los edificios en mención [FEMA, 2007; PAHO, 2000a; Soong et al., 2000].

Asimismo, por citar otros casos como el terremoto de Hawái de 2006 [Chock et al., 2006], el terremoto de Chile de 2010 [Minsal, 2010], el terremoto de Nueva Zelanda de 2011 [EERI, 2011; Jacques et al., 2014] y eventos sísmicos recientes, como el terremoto de Ecuador de 2016 [Nikolaou et al., 2016] y el terremoto de México de 2017 [ROMACO, 2017] se evidenció que, a pesar que los elementos estructurales alcanzaron un desempeño sísmico satisfactorio; en la mayoría de los hospitales, la limitación de la función fue causada por daños en los componentes y sistemas no estructurales, puntualmente en el falso techo, particiones, revestimientos, caída de escombros, colapso de sistemas de instalaciones y vuelco de equipos, entre otros. En consecuencia, la evidencia empírica resalta la importancia que tienen los componentes y sistemas no estructurales en el desempeño sísmico de edificios hospitalarios. La Figura 1-1 muestra tres ejemplos de hospitales que han experimentado daños por sismo.



**Figura 1-1.** Daño en Hospitales durante varios eventos sísmicos [USGS, 2017; Cortesía de Servicio de Salud Concepción; Morales, 2017]

En este contexto, existen varios estudios sobre el desempeño estructural de edificios en general e incluso de hospitales en particular. Ciertamente, se ha alcanzado un nivel aceptable de conocimiento del comportamiento de los elementos estructurales, los que se ven reflejados en los códigos de diseño sísmico actuales. Sin embargo, para los componentes y sistemas no estructurales, existe información limitada sobre su desempeño ante un evento sísmico y aún más,

acerca de la pérdida de capacidad de operación de éstos después de terremotos. De acuerdo al estudio realizado por Taghavi y Miranda [2003], los componentes y sistemas no estructurales representan aproximadamente el 92% de la inversión económica total en edificios hospitalarios; mientras que, el 82% y el 87% en oficinas y hoteles, respectivamente. Además, el daño a los componentes y sistemas no estructurales ocurre a intensidades sísmicas relativamente más bajas que las requeridas para ocasionar daños estructurales. Asimismo, se ha publicado un número considerable de estudios sobre el comportamiento sísmico de componentes y sistemas no estructurales [Soong, 1995; Filiatrault y Christopoulos, 2002; Filiatrault y Sullivan, 2014], trabajos que examinan los primeros estudios y realizan una comparación de regulaciones existentes para el diseño sísmico. Además, describen el desempeño de los componentes y sistemas no estructurales durante eventos sísmicos pasados, entre otras consideraciones importantes. Para su mejor comprensión en el siguiente subapartado se explica en detalle las principales características de los componentes y sistemas no estructurales.

### 1.1.1 Componentes y sistemas no estructurales de edificios hospitalarios

En esta investigación, la clasificación de los componentes y sistemas no estructurales de hospitales se basa principalmente en la propuesta de FEMA E-74 [FEMA, 2012a] y del documento “Hospital safety index: guide for evaluators” de la Organización Mundial de la Salud [WHO/PAHO, 2015] en elementos arquitectónicos, instalaciones, equipamiento médico y contenidos. La Figura 1-2 ilustra conceptualmente las cuatro categorías de los componentes y sistemas no estructurales en una infraestructura hospitalaria.



1. Elementos arquitectónicos; 2. Instalaciones;
3. Equipamiento médico; 4. Contenidos.

**Figura 1-2.** Representación conceptual de los componentes y sistemas no estructurales



A continuación, se detalla cada una de las cuatro categorías:

1. **Elementos arquitectónicos.** Corresponden a elementos y sistemas no estructurales que pertenecen intrínsecamente al edificio, incluidos falsos techos, particiones, revestimientos, parapetos, acristalamientos, marquesinas, puertas y escaleras, entre muchos otros. Se clasifican en interiores y exteriores, según su ubicación en el edificio.
2. **Instalaciones.** Esta categoría incluye equipos de sistemas críticos y sistemas distribuidos. Los equipos de sistemas críticos corresponden a equipos eléctricos y de comunicaciones, ascensores, también incluye equipos de climatización como calderas, hornos, bombas y enfriadores, entre otros. Los sistemas distribuidos incluyen sistemas de extinción de incendios y otros elementos como tuberías (agua potable, aguas residuales, etc.), bandejas de cables (para electricidad, comunicación, etc.) y conductos de climatización.
3. **Equipamiento médico.** Comprende un gran número de aparatos, instrumentales, accesorios, material u otro artículo similar para el diagnóstico, prevención, control y tratamiento, utilizados en todas las especialidades de un hospital. En otras palabras, abarca todos los elementos destinados a uso médico, incluyendo servicios médicos y gases médicos. Servicios médicos tales como: (i) Servicios Asistenciales (Unidades de Cuidados Intensivos UCI, Hospitalización, Hospital de Día, Emergencias, Quirófanos, etc.); (ii) Servicios Centrales de Diagnóstico y Tratamiento, Diagnóstico basado en imágenes (Rayos X, Tomografía Computarizada, Resonancia Magnética, Ecografía, Endoscopia, Diálisis, Radioterapia, etc.); (iii) Servicio de Análisis y Medicación (Laboratorios, Farmacia, almacenamiento refrigerado como Bancos de Sangre y medicamentos); y (iv) Servicios Generales y de Apoyo (Esterilización, Morgue y Autopsias, Cocina, Lavandería, etc.).  
Gases médicos comprende los sistemas de suministro y reserva de gas médico a la infraestructura hospitalaria como oxígeno, aire médico, vacío médico, óxido nítrico, nitrógeno y dióxido de carbono, entre otros.
4. **Contenidos.** Elementos no médicos ubicados dentro del edificio (incluso de forma permanente) y que no son instalaciones. Se incluyen en esta categoría estanterías pesadas, estanterías ligeras, materiales peligrosos, equipos informáticos y de comunicación, mobiliario, accesorios, adornos y similares.

De acuerdo a FEMA E-74 [FEMA, 2012a], los eventos sísmicos causan daños a los componentes no estructurales de cuatro maneras principales:

- i. Efectos inerciales. El daño de los componentes y sistemas no estructurales **sensibles a la aceleración de piso** es ocasionado principalmente por las fuerzas de inercia causadas por aceleraciones de piso de las estructuras. Las fuerzas de inercia pueden causar deslizamiento, cabeceo y/o volcamiento de los sistemas no anclados. Ejemplos de elementos no estructurales sensibles a la aceleración son los sistemas de falso techo, sistemas de tuberías y bandejas de cables, entre otros. La Figura 1-3 (a) muestra conceptualmente objetos no esbeltos, con alta relación ancho/altura, que son sensibles al deslizamiento; y (b) objetos esbeltos sensibles al vuelco, con baja relación ancho/altura.

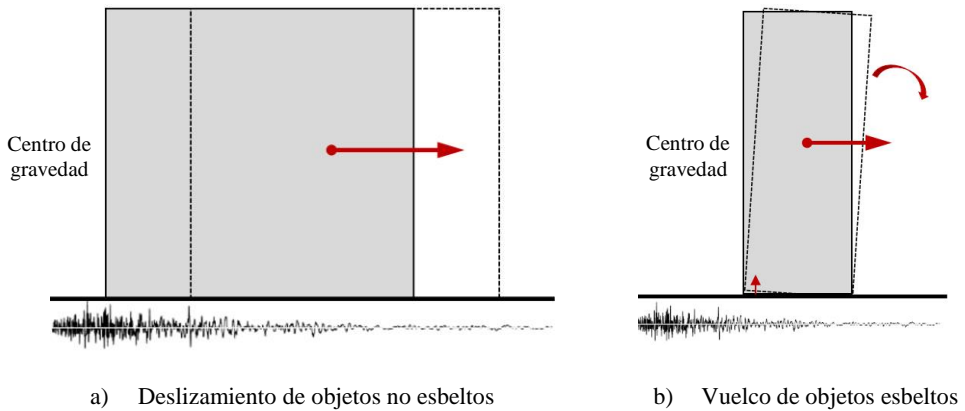


Figura 1-3. Deslizamiento y vuelco por fuerzas de inercia [FEMA, 2012a]

- ii. Distorsiones impuestas a elementos no estructurales. Los daños sísmicos de elementos no estructurales **sensibles a la deriva**, se producen básicamente cuando el edificio se deforma (los elementos estructurales de los edificios pueden deformarse en respuesta a las fuerzas del terremoto) causando distorsiones en elementos no estructurales que son “sensibles a la deriva”. En otras palabras, es causado principalmente por desplazamientos entre pisos o desviaciones en la estructura de soporte, causando distorsiones en los elementos estructurales y no estructurales. Por ejemplo, cualquier ventana o partición rígidamente unida a la estructura también debe deformarse conjuntamente con la estructura. Los materiales frágiles como el vidrio y la mampostería, entre otros, no pueden tolerar ninguna deformación significativa, presentando consecuentemente agrietamiento y otros daños. Una vez agrietados, las fuerzas de inercia en la dirección “fuera del plano” (out-of-plane) pueden producir el vaciamiento de estos elementos arquitectónicos. La Figura 1-4 ilustra este tipo de daño sísmico.

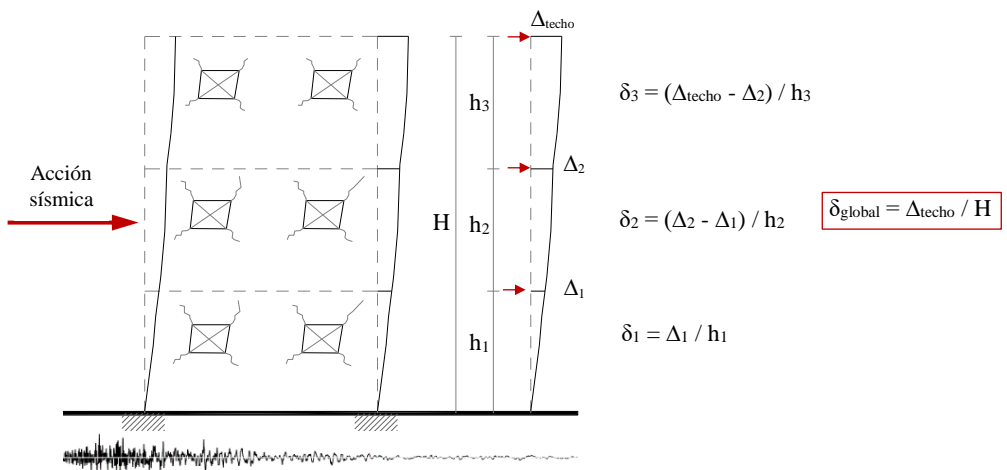


Figura 1-4. Daño no estructural debido a la deformación del edificio [Adaptado de FEMA, 2012a]

Además, la Figura 1-4 explica el concepto de derivas de entrepiso: se conoce como el desplazamiento relativo entre plantas de pisos sucesivos dividido por la altura de entrepiso. De tal manera, que cada planta tiene una deriva ( $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ ) y la deriva máxima de entrepiso ( $\delta$ ) es el valor máximo o mayor de entre ellas. Deriva global ( $\delta_{\text{global}}$ ) o de techo es la relación entre el desplazamiento de techo ( $\Delta_{\text{techo}}$ ) y la altura total del edificio ( $H$ ).

- iii. **Riesgo de impacto** entre las estructuras adyacentes. Durante el terremoto puede producirse impacto entre edificios adyacentes. Dicho efecto causa daños a los componentes no estructurales sensibles a la aceleración y a la deriva que cruzan la separación. Por ejemplo, parapetos, tuberías, conductos, etc. La Figura 1-5 ilustra este tipo de daño sísmico.

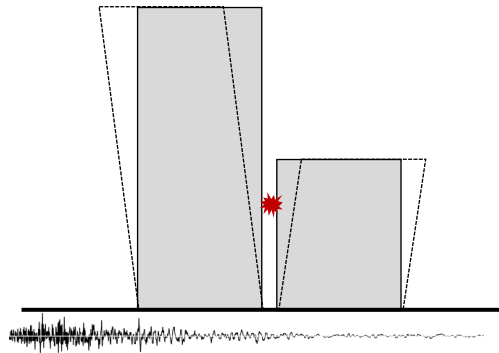


Figura 1-5. Daño no estructural en juntas [FEMA, 2012a]

- iv. **Interacción entre elementos no estructurales.** Pueden compartir la misma ubicación, no obstante, se mueven de manera diferente entre sí. Dichos componentes pueden tener diferentes formas, tamaños, características dinámicas y diferentes dispositivos de anclajes y/o arriostres, por ejemplo:
- Las tuberías de distribución de rociadores interactúan con el falso techo haciendo que los cabezales se rompan, en consecuencia, provocando dispersión de agua en dicho espacio.
  - Las tuberías adyacentes de diferentes formas o tamaños, cuando no están reforzadas, pueden impactarse entre sí o con objetos adyacentes.
  - El equipo mecánico suspendido se balancea y puede impactar contra otro sistema, por ejemplo, una ventana, partición, etc.

Para fines de evaluación de daños sísmicos, se consideran los elementos no estructurales “sensibles a la aceleración” o “sensibles a la deriva” [FEMA, 2012a]. La Tabla 1-1 describe algunos ejemplos de componentes y sistemas no estructurales sensibles a la aceleración y a la deriva.

**Tabla 1-1.** Lista de los principales componentes y sistemas no estructurales sensibles a la aceleración y a la deriva [FEMA, 2012c]

| Componentes y sistemas no estructurales | Descripción   | Sensibles a la aceleración | Sensibles a la deriva |
|---|---|----------------------------|-----------------------|
| Elementos arquitectónicos               | Muros no portantes y/o particiones                            | ◦                          | •                     |
|   | Elementos en voladizos y parapetos                            | •                          |                       |
|   | Sistemas de acristalamiento                                   | ◦                          | •                     |
|   | Revestimientos y acabados                                     | ◦                          | •                     |
|   | Falso techo   | •                          |                       |
|   | Marquesinas   | •                          |                       |
| Instalaciones                           | Sistemas de climatización (máquinas de frío, calderas, etc.)  | •                          |                       |
|   | Electricidad general (transformador, grupo electrógeno, etc.) | •                          |                       |
|   | Depósitos de almacenamiento                                   | •                          |                       |
|   | Ascensores  | •                          | ◦                     |
|   | Sistemas de tuberías  | •                          | ◦                     |
| Equipamiento médico                     | Equipos médicos en general                                    | •                          |                       |
| Contenido                               | Racks y gabinetes   | •                          |                       |
|   | Archivadores, estanterías, etc.                               | •                          |                       |
|   | Equipamiento de oficina y mobiliario                          | •                          |                       |
|   |   |                            |                       |

• Indican la causa principal del daño

◦ Indican la causa secundaria del daño

Para la evaluación de la repercusión de los desastres en las actividades humanas, se emplean conceptos estadísticos tales como: riesgo, amenaza o peligro y vulnerabilidad. El siguiente subapartado discute más profundamente este tema.

### 1.1.2 Discusión de conceptos estadísticos

Se ha publicado un número considerable de estudios sobre los efectos de los desastres naturales en las actividades humanas. En este subapartado se informan los conceptos que más han influido en este trabajo. De acuerdo a lo citado en [PAHO, 2000a], documento basado en [Cardona, 1999], los siguientes conceptos fueron establecidos en una reunión de expertos promovida por “La Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas para Casos de Desastres” (UNDRO actualmente “Oficina de las Naciones Unidas para Asuntos Humanitarios ONU/DHA”) conjuntamente con la “Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura” (UNESCO). Dicha reunión unificó los conceptos en el reporte “Desastres Naturales y Análisis de Vulnerabilidad” ampliamente aceptada en el campo científico y técnico.

Lo expuesto en el párrafo anterior permite discutir los conceptos definitivos mediante la siguiente expresión (1-1):

$$R_{ie} = A_i \cdot V_e \tag{1-1}$$

donde  **$R_{ie}$  riesgo** (Risk), se entiende como la probabilidad de una pérdida para el elemento  $e$ , debido a la ocurrencia de un evento con una intensidad mayor o igual a  $i$ ;  **$A_i$  amenaza o peligro** (Hazard), es la probabilidad de que ocurra un evento con una intensidad mayor o igual a  $i$  durante un período de exposición  $t$ ; y  **$V_e$  vulnerabilidad** (Vulnerability), corresponde a la predisposición

intrínseca de un elemento expuesto  $e$  a ser afectado o de ser susceptible a sufrir una pérdida por la ocurrencia de un evento con una intensidad  $i$ .

Por otro lado, en los últimos 15 a 20 años, se han masificado los procedimientos de evaluación sísmica en un marco totalmente probabilístico, que consideran herramientas como las curvas de fragilidad discutidas a continuación.

### 1.1.3 Curvas de fragilidad

Las curvas de fragilidad representan la probabilidad condicional de alcanzar o exceder un estado de daño (leve, moderado, extenso y completo) en los elementos estructurales o no estructurales de un edificio, en función de un estimador de la acción sísmica o parámetro de demanda de ingeniería (EDP), como por ejemplo deriva de entrepiso y aceleración de piso, entre otras; y medida de intensidad (IM) como aceleración del suelo o aceleración espectral para un determinado período, etc.

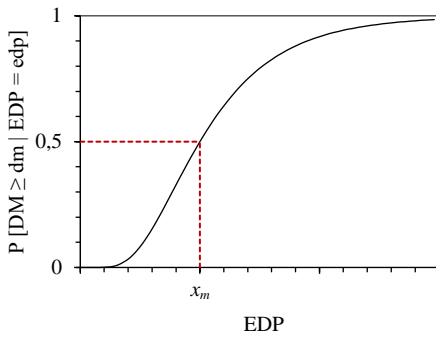
En la Ec.(1-2) se presenta la definición funcional de una curva de fragilidad, que proporciona información sobre la probabilidad de alcanzar o exceder varios estados de daño.

$$F_{ds}(edp) = P [DS \geq ds | EDP = edp] \quad (1-2)$$

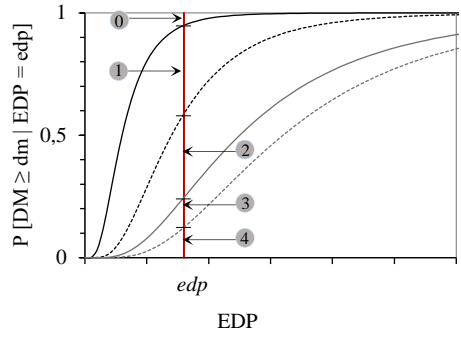
Así, dicha función de fragilidad se puede escribir en forma matemática como se indica en la Ec. (1-3):

$$F_{ds}(edp) = \Phi \left( \frac{\ln(edp/x_m)}{\beta} \right) \quad (1-3)$$

donde  $\Phi$  es la función de densidad de probabilidad acumulada logarítmica normal (lognormal);  $x_m$  es el valor de la mediana, que corresponde al valor de la demanda asociado a un 50% de probabilidad de que un componente alcance o exceda el estado de daño  $ds$ ; y  $\beta$  es la desviación estándar logarítmica, que indica la incertidumbre de que el estado de daño se inicie en dicho valor de demanda. La desviación estándar logarítmica refleja la incertidumbre asociada a la variabilidad de la construcción y la calidad de los materiales. Cuando el valor de  $\beta$  aumenta, la forma de la curva se aplanan, es decir, existe una amplia gama de demandas sobre las cuales existe una probabilidad significativa de que el estado de daño se inicie. Tanto  $x_m$  como  $\beta$  se establecen para cada tipo de componente y estado de daño. Dichos valores son obtenidos de observaciones de daños, análisis teóricos, simulaciones computacionales, estudios experimentales, observaciones de campo y opinión de expertos, entre otros [Milutinovic y Trendafiloski, 2003; Porter et al., 2006; FEMA, 2012b; FEMA, 2012c]. En la Figura 1-6 se muestra ejemplos de curvas de fragilidad para su mayor comprensión.



a) Curva de fragilidad



b) Probabilidades del estado de daño (DS): 0. No daño (DS<sub>0</sub>); 1. Daño leve (DS<sub>1</sub>); 2. Daño moderado (DS<sub>2</sub>); 3. Daño extenso (DS<sub>3</sub>); y 4. Daño completo (DS<sub>4</sub>)

**Figura 1-6.** Ilustración de las curvas de fragilidad [FEMA, 2012b]

La Figura 1-6b muestra cómo a partir de las curvas de fragilidad se pueden calcular las probabilidades de ocurrencia de cada estado de daño. La probabilidad que el componente esté en un estado de daño  $ds$ , dado que se alcanzó una demanda  $EDP = edp$ , se muestra en la Ec. (1-4):

$$\begin{aligned}
 P [DM = dm | EDP = edp] = & \quad 1 - F_1(edp) & \quad dm = 0 \\
 & F_{dm}(edp) - F_{dm+1}(edp) & \quad 1 \leq dm < N \\
 & F_{dm}(edp) & \quad dm = N
 \end{aligned}
 \tag{1-4}$$

donde,  $N$  denota el número de posibles estados de daño para el componente. Asimismo, considera la medida de daño "dm damage measures"  $dm = 0$  como no daño.

Además, en la Figura 1-6b para un componente con un estado de daño de  $N = 4$ , se tiene las siguientes relaciones para estimar la probabilidad de cada estado de daño, como se muestra en la Ec.(1-5):

|  |               |                 |       |
|--|---------------|-----------------|-------|
| $P [DM = 0   EDP = X] = 1 - F_1(X)$      | Sin daño      | DS <sub>0</sub> |       |
| $P [DM = 1   EDP = X] = F_1(x) - F_2(X)$ | Daño leve     | DS <sub>1</sub> |       |
| $P [DM = 2   EDP = X] = F_2(x) - F_3(X)$ | Daño moderado | DS <sub>2</sub> | (1-5) |
| $P [DM = 3   EDP = X] = F_3(x) - F_4(X)$ | Daño extenso  | DS <sub>3</sub> |       |
| $P [DM = 4   EDP = X] = F_4(x)$          | Daño completo | DS <sub>4</sub> |       |

### 1.1.4 Alcance de esta investigación

Actualmente, con el creciente interés en la implementación de la ingeniería sísmica basada en desempeño (Performance-Based Earthquake Engineering, PBEE), desarrollada por el Centro de Investigación de Ingeniería de Terremotos del Pacífico (Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER), la armonía del desempeño sísmico entre elementos estructurales y no estructurales resulta vital. PBEE es un marco probabilístico que considera las incertidumbres en variables tales como el peligro sísmico, la respuesta estructural, la estimación de daños y la

estimación de pérdidas (ejemplo, físicas y económicas). Este procedimiento enfatiza aún más la importancia de los componentes y sistemas no estructurales. Los daños de estos elementos pueden reducir el nivel de desempeño de todo el edificio después de un evento sísmico, incluso si los elementos estructurales alcanzan un nivel de desempeño de ocupación inmediata. Esta estrategia se describe principalmente en estas referencias [SEAOC, 1995; FEMA, 1997; ATC, 1996A; ATC, 1996b; FEMA, 2000]. Asimismo, se ha resumido en varias publicaciones [Moehle, 2003; Porter 2003; Günay and Mosalam, 2013; entre otros] y se han realizado varios estudios de referencia en [Miranda and Aslani, 2003; Moehle and Deierlein, 2004; Comerio 2005; Krawinkler, 2005; Goulet et al., 2007; FEMA, 2012b], entre otros.

Por los motivos señalados anteriormente, a pesar de la existencia de algunos estudios orientados a la evaluación rápida de vulnerabilidad sísmica de componentes y sistemas no estructurales, existe limitada información respecto de la influencia en la pérdida de función de una infraestructura hospitalaria ante un determinado evento sísmico. En este contexto, este estudio propone una metodología innovadora para la evaluación rápida de susceptibilidad de pérdida de función por sismos en infraestructura hospitalaria, mediante el uso de una herramienta automatizada.

Para este fin, las principales contribuciones de esta investigación incluyen: i) la comprensión de los aspectos fundamentales de la operación y relación funcional de los diferentes componentes y sistemas no estructurales de las infraestructuras hospitalarias, para entender su comportamiento y efectos durante eventos sísmicos severos; ii) el desarrollo de una metodología para la estimación de demandas sísmicas consistentes con el daño sísmico esperado dentro de un edificio de hormigón armado y la aplicación de estas demandas sísmicas en las curvas de fragilidad tanto para elementos estructurales como componentes no estructurales; iii) implementación de la propuesta metodológica en una herramienta automatizada mediante formulación matemática para luego ser calibrada y validada con el daño observado de un número importante de hospitales representativos seleccionados en distintos países (17 casos de estudio) durante eventos sísmicos con magnitudes  $M_w$  entre 5.1 y 8.8; y iv) la evaluación de la variación de curvas de fragilidad sísmica teniendo en cuenta medidas de rehabilitación, es decir, considerando en la aplicación de la herramienta automatizada cualidades sismorresistente superiores a las actuales tanto del sistema estructural como de los componentes y sistemas no estructurales del edificio hospitalario con diseño convencional y no convencional (aislación sísmica de base). A fin de comprobar con qué medidas se logra una armonía en el desempeño sísmico de los elementos estructurales y componentes no estructurales tanto en el sismo registrado como en el escenario normativo. En este contexto, se consideran doce casos de estudio de los diecisiete hospitales analizados en el escenario de sismo de diseño, asociado, típicamente, a períodos de retorno de 475 años, y de sismos con mayor intensidad sísmica, asociados, por ejemplo, a períodos de retorno de 2500 años.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo principal**

El objetivo principal de este trabajo es proponer una metodología para la evaluación rápida de la susceptibilidad de pérdida de función por sismos en infraestructura hospitalaria existente y en desarrollo. La metodología propuesta es implementada en una herramienta automatizada que será calibrada y validada con información proporcionada de casos reales observados. Asimismo, se espera que las conclusiones obtenidas permitan a autoridades y administradores de establecimientos de salud facilitar la toma de decisiones respecto a la necesidad de rehabilitar o proteger sísmicamente la infraestructura hospitalaria evaluada.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo principal antes mencionado, se establecen los siguientes objetivos específicos:

1. Comprender la importancia y la función de los edificios hospitalarios.
2. Revisar aspectos relevantes de ingeniería sísmica para edificios, incluyendo una revisión concisa de la literatura empleada en el estudio.
3. Describir características generales de los principales equipos médicos de una infraestructura hospitalaria.
4. Identificar las principales vulnerabilidades sísmicas tanto para el sistema estructural y componentes no estructurales de la infraestructura hospitalaria.
5. Establecer una propuesta simplificada para cuantificar la solicitación sísmica sobre la estructura y componentes no estructurales en términos de desplazamiento espectral, deriva de entrepiso y aceleración máxima de piso o aceleración máxima del suelo.
6. Analizar las probabilidades de daños mediante curvas de fragilidad sísmica del sistema estructural y componentes no estructurales en función de la demanda sísmica real.
7. Estudiar casos reales de hospitales afectados por eventos sísmicos severos.
8. Formular una herramienta automatizada.
9. Calibrar y validar la herramienta automatizada propuesta.
10. Evaluar la idoneidad de la herramienta automatizada propuesta en el escenario de sismo registrado y escenario normativo tanto para infraestructura hospitalaria con diseño convencional y no convencional.

### 1.3 Metodología

Este apartado describe en detalle los pasos realizados en esta investigación para alcanzar cada uno de los objetivos específicos mencionados anteriormente.

| Objetivos  | Metodología  |
|--|--|
| <p><b>Comprender</b> la importancia y la función de los edificios hospitalarios.</p>   | <p>Análisis crítico de la problemática general de los edificios hospitalarios.</p> <p>Revisión de referencias bibliográficas, visitas de campo a diferentes hospitales en Ecuador, Barcelona y Chile, y entrevistas con un especialista que cuenta con una amplia experiencia en el ámbito hospitalario.</p> |
| <p><b>Revisar</b> aspectos relevantes de ingeniería sísmica para edificios, incluyendo una revisión concisa de la literatura empleada en el estudio.</p> | <p>Explicación general de conceptos empleados en el desarrollo de la investigación, incluidos aspectos de caracterización de movimientos sísmicos, diseño sismorresistente de edificios, y revisión crítica de literatura empleada en el estudio.</p>  |
| <p><b>Resultado:</b> Estado actual del conocimiento. Capítulo 2</p>  |  |



**Describir** características generales de los principales equipos médicos de una infraestructura hospitalaria.

Descripción general de las principales características de equipos médicos como geometría, peso operativo, tipo de instalación y material. Esta información se considera vital para asignar curvas de fragilidad sísmica más adecuadas, debido a la escasa o nula información de curvas de fragilidad sísmica para equipamiento médico.

**Identificar** las principales vulnerabilidades sísmicas tanto para el sistema estructural y componentes no estructurales de la infraestructura hospitalaria.

Para el sistema estructural resistente del edificio se consideran 21 curvas de fragilidad sísmica específicas para edificaciones esenciales, clasificadas según la tipología estructural, el diseño sísmico y la altura del edificio.

Para los componentes y sistemas no estructurales se consideran 125 curvas de fragilidad sísmica para elementos “sensibles a la deriva” y “sensibles a la aceleración”, de acuerdo a características generales, tipo de material y condiciones sísmicas, entre otras variables. En situaciones puntuales se conoce la aceleración máxima causante de un determinado daño en equipamiento médico; en esta situación, se asume un valor de la desviación estándar logarítmica de acuerdo a referencias bibliográficas.

**Establecer** una propuesta simplificada para cuantificar la sollicitación sísmica sobre la estructura y componentes no estructurales en términos de desplazamiento espectral, deriva de entrepiso y aceleración máxima de piso o aceleración máxima del suelo.

Obtención de registros sísmicos de estaciones sismológicas para cada caso de estudio.

Evaluación de tipos de software de procesamiento de registros sísmicos, más ampliamente reconocidos, capaces de derivar una serie de parámetros para el cálculo de la demanda sísmica. Se usa el programa “SeismoSignal 2016” [SeismoSoft, 2016], con licencia estudiantil. Además, se tiene en cuenta dos consideraciones: i) cuando la estación sismológica corresponde a un tipo de suelo diferente o tiene una profundidad de lecho rocoso distinta a la del hospital en estudio, los acelerogramas registrados se modifican convenientemente con el uso del programa DeepSoil [Hashash et al., 2017]; y ii) cuando la estación más cercana está ubicada a una distancia del origen del terremoto significativamente diferente a la del hospital, es decir, una distancia mayor de 20 km, el acelerograma se corrige considerando leyes de atenuación consistentes con el lugar y mecanismo focal.

Revisión y empleo de referencias bibliográficas especializadas para la caracterización de eventos sísmicos. El daño a los componentes no estructurales “sensibles a la deriva” es principalmente una función de la deriva de entrepiso. El daño a los componentes no estructurales “sensibles a la aceleración” es principalmente una función de la aceleración máxima de piso donde se encuentra el componente. Se presenta una formulación alternativa para la estimación de los parámetros de demanda sísmica.

**Analizar** las probabilidades de daños mediante

Las curvas de fragilidad están definidas por una función densidad de probabilidad lognormal acumulada con parámetros

curvas de fragilidad sísmica del sistema estructural y componentes no estructurales en función de la demanda sísmica real.

$x_m$  y  $\beta$ , correspondientes a la mediana y desviación estándar logarítmica, respectivamente. Se considera dos escenarios para anticipar el daño: i) cuando un determinado componente y sistema no estructural tiene varias curvas de fragilidad, se considera el estado de daño que exhibe la mayor probabilidad de ocurrencia para un determinado nivel de demanda sísmica real; ii) cuando el componente y sistema no estructural tiene una sola curva de fragilidad se considera que si la demanda sísmica alcanza o excede el valor de la demanda media (50%) que detona el daño, se producirá el daño, en caso contrario, se considera que no se ha alcanzará el nivel de daño caracterizado por la curva de fragilidad

**Resultado:** Formulación propuesta para anticipar daños sísmicos. Capítulo 3

**Estudiar** casos reales de hospitales afectados por eventos sísmicos severos.

Investigación exhaustiva de informes y/o reportes técnicos, tesis doctorales y contacto con una cantidad considerable de personas que han tenido experiencias reales en un evento sísmico.

Se han elegido diecisiete hospitales localizados en diez países durante trece eventos sísmicos con magnitudes de momento  $M_w$  entre 5.1 y 8.8 para caracterizar la mayor cantidad de tipos de daños y su repercusión en las normativas de referencia internacional. Los casos de estudio comprenden el período de 1971 a 2017, localizados en países como Estados Unidos (California 1971 y 1994, Hawái 2006), Turquía 1999, Taiwán 1999, El Salvador 2001, Perú 2007, Italia 2009 y 2012, Chile 2010, España 2011, Ecuador 2016 y México 2017. La materialidad predominante de los edificios hospitalarios es hormigón armado.

Revisión de la normativa ASCE/SEI 7-16 [ASCE, 2016] con la finalidad de lograr una misma lectura en la información de cada caso de estudio. Por ejemplo, tipo de suelo tanto de la estación sísmológica como del hospital y el período fundamental de la estructura. Análisis cualitativo de las principales características y daños de los casos de estudio.

**Resultado:** Casos de estudio. Capítulo 4

Implementación de un nuevo enfoque de metodología para la evaluación rápida del Riesgo Sísmico (Índice de Seguridad Hospitalario) de un edificio hospitalario en relación a la pérdida de función después de un evento sísmico severo. La evaluación se realizará para cada bloque independiente (a nivel estructural) del hospital.

Respecto a las probabilidades de daño en el sistema resistente de la estructura, se considera el resultado directo del análisis de la anticipación del daño por medio de las curvas de fragilidad sísmica.

Para anticipar el daño en los componentes y sistemas no estructurales, la estrategia propuesta consiste en obtener como primer paso la vulnerabilidad sísmica cuantificada mediante un

**Formular** una herramienta automatizada.

**Calibrar** y validar la herramienta automatizada propuesta.

**Evaluar** la idoneidad de la herramienta automatizada propuesta en el escenario de sismo registrado y escenario normativo tanto para infraestructura hospitalaria con diseño convencional y no convencional.

índice de vulnerabilidad (uso de las curvas de fragilidad, que dependen de las características sismorresistente del edificio), combinada con “factores de modificación”. Los factores de modificación incluyen dos aspectos: i) relación entre el año de construcción y/o diseño y el año del evento sísmico; y ii) el estado de conservación del edificio, que comprende infraestructura nueva, infraestructura recién rehabilitada, infraestructura que necesita ser rehabilitada, e infraestructura deteriorada. Posteriormente, se combina con la amenaza, es decir, el espectro obtenido a partir del acelerograma registrado en la estación sismológica más cercana al hospital analizado, proporcionando de esta manera el “Índice de desempeño no estructural”. El valor obtenido del desempeño no estructural se normaliza para evitar sesgo matemático en los valores numéricos de cada variable, es decir, se ajusta los valores medidos en diferentes escalas respecto a una escala común, considerando el valor máximo de 1 (peor condición, color rojo) y un mínimo de 0 (mejor condición, color verde), los umbrales de daño se consideran de acuerdo a lo citado en RISK-UE [Milutinovic y Trendafiloski, 2003].

Para obtener el grado de pérdida de función en infraestructuras hospitalarias ante un determinado evento sísmico se relaciona el daño estructural con el daño no estructural. Los grados de pérdida de función se expresan como: i) 1-A Pérdida de función baja y/o nula; ii) 2-B Pérdida de función temporal; y iii) Pérdida de función permanente.

La herramienta automatizada propuesta será calibrada comparando el daño observado de cada caso de estudio con el daño estimado usando la herramienta propuesta, obtenido de evaluar las curvas de fragilidad sísmica disponibles para las demandas sísmicas estimadas. Además, la herramienta será validada de acuerdo a la metodología propuesta en este estudio.

Después de la validación de la herramienta automatizada, se empleará para verificar su idoneidad en el caso de realizar una rehabilitación convencional tanto en elementos estructurales y no estructurales. Asimismo, en el caso de diseñar o rehabilitar una infraestructura hospitalaria con aislación sísmica de base, en los escenarios con y sin rehabilitación sísmica de componentes no estructurales.

**Resultado:** Implementación de la metodología en una herramienta automatizada. Capítulo 5

## 1.4 Organización de la tesis

El contenido de este documento está organizado en seis capítulos y cuatro anejos, donde el primer capítulo es esta introducción. En el Capítulo 2 se resume el estado actual del conocimiento, comprende dos secciones. La primera parte hace referencia a los edificios hospitalarios y la segunda parte se enfoca en ingeniería sísmica para edificios. Además, se presenta una breve introducción en materias de sismología como ingeniería sísmica y una revisión concisa de

literatura. El Capítulo 3 describe la formulación propuesta para anticipar los daños sísmicos, comprende la descripción general de las principales propiedades de equipos médicos, curvas de fragilidad sísmica empleadas en el estudio, definición de cada “estado de daño”, cuantificación de la sollicitación sísmica y evaluación del daño probable mediante curvas de fragilidad sísmica del sistema estructural y de los componentes y sistemas no estructurales en función de la demanda sísmica real. En el Capítulo 4 se presenta un análisis de los casos de estudio. El Capítulo 5 comprende la implementación de la metodología en una herramienta automatizada, incluye calibración, validación, y empleo de la herramienta automatizada en el escenario de sismo real como en el escenario normativo. En este contexto, se considera infraestructura hospitalaria en su condición actual y rehabilitada (elementos estructurales y no estructurales). Asimismo, se considera el uso de la herramienta en el caso de rehabilitar o diseñar infraestructura hospitalaria con aislación sísmica de base. Conjuntamente, se presenta la discusión de los principales resultados de la propuesta metodológica presentada en este estudio. Finalmente, el Capítulo 6 presenta un resumen y conclusiones de esta investigación y recomendaciones para futuras líneas de investigación (en inglés). Además, se incluye seguidamente una lista de la bibliografía consultada y créditos de fotos.

En la sección de Anejos, el Anejo A proporciona información complementaria de edificios hospitalarios tales como evolución histórica de los tipos de hospitales y detalles arquitectónicos tipo de las principales instalaciones, así como del equipamiento médico en general (sin consideraciones sísmicas). El Anejo B resume las principales características de los equipos médicos (para otorgar fragilidades sísmicas con mayor similitud posible). Asimismo, contiene un ejemplo de un caso de estudio de las figuras de las curvas de fragilidad sísmica, y describe los estados de daño de cada curva de fragilidad sísmica. El Anejo C describe de manera general información de apoyo de los casos de estudio y proceso de calibración de la herramienta automatizada con daños reales. Finalmente, el Anejo D presenta información de la herramienta automatizada propuesta, incluye valor de los pesos iniciales y los pesos encontrados. Además, presenta el formulario físico de la herramienta propuesta.



## 2 ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

Este capítulo comprende dos secciones. La primera parte, hace referencia a los edificios hospitalarios, proporciona una descripción general de la actividad hospitalaria. La segunda parte, se enfoca aspectos básicos de ingeniería sísmica para edificios, presenta una breve introducción tanto en sismología como en ingeniería sísmica y una revisión de literatura.

### 2.1 Edificios hospitalarios

Este apartado discute la problemática general de hospitales. La descripción en los subapartados 2.1.2, 2.1.3 y subapartado 2.1.4, es el resultado de la experiencia conseguida durante las visitas efectuadas a diferentes hospitales en Ecuador, Barcelona y Chile, entrevistas con un experto en el tema de JG Ingenieros (Despacho de Ingeniería en Barcelona), así como, de las siguientes referencias [JG Ingenieros, 2001; Balaras et al., 2007; Department of Health/Estates and Facilities Division, 2007a, b; Sacyl, 2010; ASHRAE, 2013; Farmacia Hospitalaria et al., 2018; PAHO, 2018; NHS Estates, 2005; Rousseau and Bare, 2007; Bambarén y Alatrística, 2008]; entre otros documentos. A continuación, se discute definición de hospital, clasificación de hospitales, principales elementos arquitectónicos, instalaciones, equipamiento médico y contenidos, respectivamente.

- 2 ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO
- 2.1 Edificios hospitalarios
- 2.2 Aspectos básicos de ingeniería sísmica para edificios

### 2.1.1 Definición de hospital

El hospital, según la Organización Mundial de la Salud (OMS) es “parte integrante de una organización médica y social cuya misión consiste en proporcionar a la población una asistencia médico-sanitaria completa, tanto curativa como preventiva y cuyos servicios externos irradian hasta el ámbito familiar; el hospital es también centro de formación del personal médico-sanitario y de investigación biosocial” [OMS, 1957]. El hospital brinda una atención ininterrumpida durante 24 horas y durante los 365 días del año; dispone de tecnología, equipamiento e instalaciones médicas complejas e innovadoras. Además, es el establecimiento al cual acuden las víctimas en forma masiva ante una emergencia o catástrofe natural.

### 2.1.2 Clasificación de hospitales

Es difícil encontrar una clasificación única de los hospitales. Sin embargo, para fines de la presente investigación, a partir de una amplia lectura bibliográfica en [MSSSI, 2007; MSP, 2014; MSSSI, 2016], se presenta una clasificación en tres grupos según:

- **La Administración**, de acuerdo a la cual el hospital puede ser público, privado, mixto y otros, tales como hospitales de las fuerzas armadas, hospitales universitarios, etc. Es importante mencionar la diferencia con una clínica, la cual es casi siempre privada, brindando un servicio más personalizado hacia el paciente.
- **El tipo de prestaciones**, que puede incluir una o varias de las siguientes denominaciones: Hospital general, que comprende las cuatro especialidades básicas de la medicina como cirugía general, gineco-obstetricia, medicina interna, pediatría y otras especialidades complementarias. Asimismo, incluye hospital geriátrico, hospital materno-infantil (ginecología y pediatría), hospital militar (hospital de sangre, hospital de campaña, etc.), hospital pediátrico, hospital universitario, entre otros.
- **La complejidad**, que considera tres niveles de atención: i) alta complejidad, que corresponde al tercer nivel de atención y cuenta con especialidades avanzadas y con enfoques multidisciplinarios; ii) mediana complejidad, que pertenece al segundo nivel de atención y se caracteriza por tener especialidades avanzadas dando cobertura a la población que forma parte de su jurisdicción, más la derivada de otros establecimientos de su red sanitaria, y que además cuenta con hospitalización y el control para el recién nacido; y finalmente iii) baja complejidad, que corresponde al primer nivel de atención, que cuenta con especialidades básicas como medicina general, cirugía, pediatría y obstetricia.

En el presente estudio se hace referencia únicamente a los hospitales pertenecientes al segundo y tercer nivel de atención médica (casos de estudio).

### 2.1.3 Principales elementos arquitectónicos

Este subapartado, resume el conocimiento adquirido en las visitas de campo realizadas a diferentes hospitales, además, de la revisión de la guía de acabados interiores para hospitales [DNISEYM, 2013]. A continuación, se describe de forma general los principales elementos arquitectónicos tanto exteriores como interiores existentes en un hospital.

### 2.1.3.1 Materiales de acabados de fachadas

Las fachadas de los hospitales presentan numerosas variantes de soluciones constructivas y de materiales de acabados tales como:

- **Paredes dobles** de ladrillo visto con aislamiento interior en la cámara o paredes de ladrillo con posterior acabado de estuco o pintura.
- **Paredes de ladrillo** con revestimiento posterior de piedra natural, artificial o piezas cerámicas de gres con diversas soluciones de sujeción y agarre.
- **Piezas prefabricadas de grandes dimensiones** formadas por paneles de hormigón aligerado, polímeros o plancha metálica esmaltada con diversas soluciones de sujeción.
- **Muros cortinas** para formar fachadas simples o dobles con elementos separadores de sectores de incendio entre plantas.
- **Las ventanas** (cada vez de mayores dimensiones) formadas por carpinterías que pueden ser de aluminio, acero o PVC. Las hojas de las ventanas pueden ser abatibles o correderas y los vidrios (dos o tres vidrios con cámaras de aire en función del nivel de aislamiento térmico y acústico empleado) son de seguridad en la parte en contacto con los pacientes y personas. En las zonas de pacientes el grado de apertura está limitado en dimensiones o con mecanismos de apertura. Además, las ventanas suelen disponer de una serie de accesorios (persianas y cortinas de accionamiento manual o motorizado) para el control de la apertura y opacidad.
- Muchas fachadas en función de su orientación disponen de **accesorios para el control del soleamiento** como aleros o lamas verticales u horizontales de diversos materiales y que pueden ser fijas o motorizadas.

### 2.1.3.2 Particiones

Para la construcción de las paredes se emplean los siguientes materiales:

- **Ladrillos** de diferentes espesores en función de la resistencia al fuego que se desee y del tamaño de la pared. Pueden ser paredes simples o dobles con aislamiento térmico y acústico entre las dos paredes. Permiten hacer regatas para el paso de las instalaciones, por lo general, siempre se hacen perpendiculares al piso, para no debilitar las paredes.
- **Piezas prefabricadas de hormigón** de diferentes espesores en función del tamaño y altura de la pared. Casi siempre son paredes simples, pero permiten también paredes dobles con aislamiento intermedio, sin embargo, presentan muchas dificultades para hacer regatas para el paso de instalaciones.
- **Sistemas de paneles de cartón yeso** con diferentes geometrías y espesores de perfiles de soporte en función de la altura de la pared y peso de las instalaciones y mobiliarios que deban contener o soportar. En la cámara entre las dos paredes se sitúa el aislamiento térmico y acústico. Cada una de las dos paredes puede estar formada por una sola placa de cartón yeso de diferentes espesores o por varias placas superpuestas.
- Además, de las placas normales existen placas resistentes a la humedad, placas resistentes al fuego y placas que incorporan plomo para la protección radiológica de las salas de los departamentos de diagnóstico por imágenes, hemodinámica y medicina nuclear.



### 2.1.3.3 Acabados en particiones

Los acabados más habituales de las paredes son los siguientes:

- **Enyesado o revocado** de las paredes de ladrillo u hormigón para un posterior acabado. Con todos los tipos de materiales, en las salas de alta asepsia se debe disponer de vinílicos con retornos en los rincones de las paredes y en la unión con el falso techo.
- **Pintado con pintura epóxica** de las paredes enyesadas o de las paredes de cartón yeso, previo encintado o pintura epoxi en las zonas con mayor exigencia microbiológica (bloque quirúrgico, reanimación post-operatoria, UCI, neonatología, urgencias, hemodinámica, etc.) ambas con velo de fibra de vidrio.
- **Revestimiento vinílico lavable** existe variedad de texturas y colores.
- **Tablero fenólico** que puede montarse en toda la altura de las paredes o solamente hasta cierta altura, completando el acabado de la pared hasta el falso techo con un acabado más sencillo, con placas de la mayor anchura posible y juntas verticales. Los tableros deben presentar un comportamiento al fuego según las exigencias de la normativa de incendios especialmente en las vías de evacuación y los locales de riesgo especial. En las zonas con mayor exigencia microbiológica (bloque quirúrgico, reanimación post-operatoria, UCI, neonatología, urgencias, hemodinámica, entre otras) las juntas deberán estar selladas con material fungicida y bactericida. En zonas propensas a los golpes de camas, camillas y carros se dispone de barras o bandas de protección.
- **Revestimiento cerámico con azulejos** empleados fundamentalmente en locales húmedos.
- **Revestimiento cerámico con gres** de diferentes dimensiones o **gres porcelánico** de grandes dimensiones empleados fundamentalmente en locales húmedos o de servicio y últimamente en vías de circulación por su buena respuesta a los golpes.

### 2.1.3.4 Falsos techos

Los falsos techos empleados más habitualmente son:

- **Placas de cartón yeso encintadas y pintadas** formando un falso techo no registrable con registros puntuales estancos para acceso a alguna instalación donde sea necesario. Se utilizan en los espacios que precisan mayor asepsia como bloque quirúrgico, reanimación post-operatoria, bloque obstétrico, UCI, neonatología, urgencias, diagnóstico por la imagen y hemodinámica. Además, en las dependencias donde el usuario dispone de un sistema de cierre como las habitaciones de las unidades de enfermería (hospitalización), en vestuarios y en aseos. También se emplean por criterios decorativos en zonas del hospital como el vestíbulo general, la cafetería y el salón de actos.
- **Placas de escayola registrables** con juntas vistas, ocultas o semiocultas y pintado posterior. Para utilizar un conjunto de placas enteras se puede disponer de un perímetro estanco de placas de cartón yeso. Todos los techos formados por placas de los diferentes materiales se emplean masivamente en los hospitales especialmente en zonas de paso de las distribuciones horizontales de las instalaciones del edificio, que precisan accesos habituales para labores de mantenimiento.

- **Placas de fibra mineral** con juntas vistas, ocultas o semiocultas que se pueden pintar. Para utilizar un conjunto de placas enteras se puede disponer de un perímetro estanco de placas de cartón yeso.
- **Placas metálicas esmaltadas** con juntas vistas, ocultas o semiocultas. Existen tipos de falsos techos que cuando se abren las placas pueden quedar colgadas y desplazarse por el perfil. Para utilizar un conjunto de placas enteras sin tener que cortarlas se puede disponer de un perímetro estanco de placas de cartón yeso.

### 2.1.3.5 Pavimentos

Los pavimentos más empleados habitualmente son los siguientes:

- **Piezas de terrazo** con diferente tamaño de grano. Antiguamente se empleaban terrazos in situ con juntas metálicas. Las piezas de terrazo, constituyen el tipo de pavimento más empleado con pulido y abrigantado con diferentes grados de resbaladidad según las zonas del hospital. En las zonas con instalación eléctrica aislada con transformadores separadores y vigiladores de aislamiento como bloque quirúrgico, reanimación post-operatoria, bloque obstétrico, UCI, neonatología, urgencias, hemodinámica, entre otras, se emplean terrazos semiconductivos. Admite el empleo de zócalos de terrazo, resinas, aluminio anodizado o acero inoxidable, y las zonas de alta asepsia y locales húmedos se deben emplear medias cañas en la unión del pavimento y las paredes.
- **Pavimento de revestimiento vinílico** en rollos o en losetas con uniones soldadas. El material de unión debe ser fungicida y bactericida en los recintos de alta asepsia. En las zonas con instalación eléctrica aislada el pavimento debe ser semiconductor. El mismo pavimento permite realizar las medias cañas de unión a las paredes. Se emplea en las zonas más asépticas del hospital y donde el paciente pueda tocar el pavimento estando descalzo.
- **Piezas de baldosas de gres esmaltado** con diferentes grados de resbaladidad para locales húmedos como aseos de las habitaciones de las unidades de enfermería, vestuarios, cocina, etc. Se dispone de media caña en la intersección de la pared y el piso.

### 2.1.3.6 Puertas

En los hospitales existen numerosos tipos de puertas y accesorios, tales como:

- **Puertas batientes** (la mayoría) y **puertas correderas**; éstas últimas se utilizan fundamentalmente en los quirófanos y en los boxes de UCI y se deslizan por carriles sujetos al techo o a las paredes. También se utilizan hojas correderas en las puertas automáticas de los accesos generales al hospital.
- Por su accionamiento las **puertas** pueden ser **manuales** (las más habituales), automáticas con accionamiento mediante pulsador (quirófanos, boxes, etc.) o **por radar** (puertas de accesos a servicios o puertas de entrada al hospital).
- Las puertas de los quirófanos además deben ser estancas para facilitar el mantenimiento de las sobrepresiones. Hay puertas en los hospitales que están permanentemente abiertas **con electroimanes retenedores** que liberan la puerta mediante una orden desde la central de detección automática de incendios cuando un detector o pulsador manual de alarma de la planta o de la zona detectan un conato de incendio. Todas las puertas que

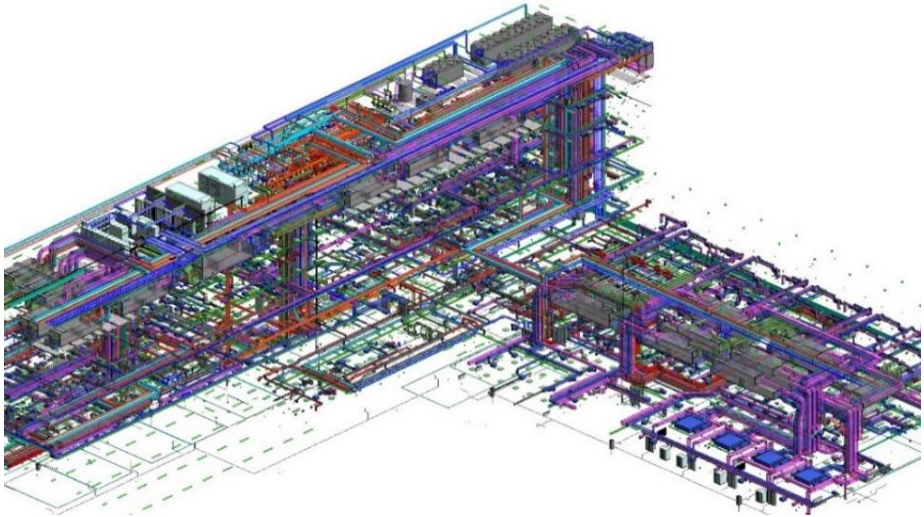
deben estar habitualmente cerradas suelen **disponer de un muelle para el cierre de la puerta** que precisa mucha atención de mantenimiento. En los hospitales es conveniente que el **sistema de apertura (manetas)** sea de fácil accionamiento. Las barras antipánico (de difícil accionamiento) deben reservarse solamente para las salidas de evacuación y no deben emplearse para puertas de uso habitual.

- Por el material constructivo las **puertas** pueden ser de **madera** (pintada o apanelada), **metálicas** (acero o aluminio) **o de vidrio**. Se emplean por lo general puertas de material metálico resistentes al fuego en todas las paredes delimitadoras del sector de incendio, acceso a escaleras protegidas y especialmente protegidas y en las entradas a los locales de riesgo especial y sus vestíbulos de independencia. Los marcos de las puertas pueden ser de madera, de acero o de inoxidable y deben estar protegidos contra golpes de camas y carros móviles hospitalarios.
- Existen **puertas con protecciones contra rayos X** mediante plancha de plomo en hojas y marcos, así como **puertas con relleno de parafina** en el acceso a los bunkers de radioterapia. Muchas de las puertas situadas en zonas de gran afluencia de paso disponen de **mirillas de pequeñas dimensiones**.
- Las puertas de los vestíbulos de independencia de acceso a zonas restringidas como laboratorios de bioseguridad, laboratorio de fecundación in vitro, animalario con animales SPF (libres de gérmenes patógenos específicos, por sus siglas en inglés Specific Pathogen Free) y muchas veces en los quirófanos, disponen de **sistemas de enclavamiento** para que no puedan estar abiertas simultáneamente las dos puertas.

## 2.1.4 Instalaciones

Los avances en medicina y tecnología en los últimos años han dado como resultado la modernización en los servicios de salud. Así, los diseños de los hospitales en la actualidad presentan estructuras más complejas, pero a su vez innovadoras para cumplir con los requerimientos de las instalaciones mecánicas, eléctricas, de comunicación y sistemas distribuidos.

Para entender toda la complejidad de las diferentes instalaciones que intervienen en un hospital. A continuación, se describe las principales características y función de las instalaciones de una manera ordenada con la finalidad de facilitar su comprensión, de acuerdo al conocimiento adquirido en las visitas a diferentes hospitales, entrevista con un experto en el tema de JG Ingenieros (Despacho de Ingeniería en Barcelona), así como de las siguientes referencias [AIA and Facilities Guidelines Institute, 2001; JG Ingenieros, 2001; Balaras et al., 2007; Department of Health/Estates and Facilities Division, 2007a, b; Sacyl, 2010; Sánchez et al., 2011; ASHRAE, 2013; Farmacia Hospitalaria et al., 2018; PAHO, 2018]. La referencia de las figuras de instalaciones corresponde a lo especificado en la sección “Créditos de fotos” al final de este documento. En la Figura 2-1 se ilustra la complejidad y densidad de las instalaciones de un hospital general.



**Figura 2-1.** Instalaciones hospitalarias

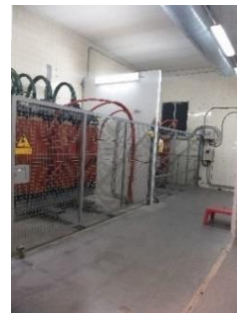
#### 2.1.4.1 Instalación de energía eléctrica

Es una instalación compleja y de gran importancia, debido a que la mayoría de los equipos médicos funcionan con energía eléctrica. Respecto a las dimensiones espaciales, la instalación eléctrica es mucho menor en comparación con la instalación de climatización.

La instalación se inicia con la **acometida eléctrica** generalmente en media tensión que puede ser aérea o subterránea, mediante cables enterrados en zanja entrando al edificio o la pantalla de límite del edificio a través de pasamuros hasta la celda de entrada del centro de transformación. La **estación transformadora** está típicamente situada en la planta baja del hospital y en grandes recintos puede instalarse en un edificio exterior independiente. A la estación transformadora pueden llegar una o dos acometidas eléctricas del exterior e incluye cabinas de protección y seccionamiento apoyadas directamente sobre el piso y transformadores secos o de aceite montados sobre ruedas y rieles con sistema de frenado. La unión entre los elementos se realiza mediante cables eléctricos los cuales están formados por varios hilos (fases, neutro y tierra) aislados individualmente y con un aislamiento global para todos ellos. La Tabla 2-2 muestra el recinto de una estación transformadora.



a) Acometida eléctrica



b) Estación transformadora

**Figura 2-2.** Acometida eléctrica desde la Compañía eléctrica

Asimismo, junto al centro de transformación se encuentran los espacios independientes para los **grupos electrógenos**, los cuales suministran la corriente eléctrica de emergencia cuando se interrumpe el suministro normal, proveen aproximadamente ocho a doce horas de autonomía. Se pueden situar en el interior de recintos aislados acústicamente sobre bancadas de hormigón con capas de aislamiento antivibratorio o en el exterior dentro de contenedores. La alimentación de combustible a los grupos electrógenos se efectúa generalmente a partir de un depósito enterrado, situado en la planta sótano o en el exterior del edificio. La Figura 2-3 muestra un ejemplo de los grupos electrógenos.



a) Recinto del grupo electrógeno



b) Grupo electrógeno

**Figura 2-3.** Grupo electrógeno

En algunos hospitales, dentro de la sala del grupo electrógeno, se ubica el **cuadro general de baja tensión** y en otros casos se dispondrá de una sala aparte. Dicho cuadro es el centro neurálgico de la distribución eléctrica del hospital, con las protecciones de todas las líneas principales de alimentación a los cuadros secundarios, apoyados en una bancada metálica o de hormigón. De igual manera, en la misma sala se instala el **sistema de compensación de factor de potencia**, que sirve para compensar la potencia eléctrica reactiva; el equipo está formado fundamentalmente por baterías. Desde el cuadro general de baja tensión parten las **líneas eléctricas generales** construidas con cables resistentes al fuego, no propagadores de las llamas ni productores de gases tóxicos en contacto con las llamas o con embarrados eléctricos que son conductores de corriente eléctrica constituidos de barras gruesas, las cuales conectan el cuadro general de baja tensión con los cuadros secundarios de cada uno de los servicios del hospital. Los cables están montados en el interior de bandejas de material plástico o varilla metálica sujetas al forjado mediante varilla roscada y los embarrados eléctricos se sujetan directamente al forjado con varillas roscadas. Los **cuadros secundarios** son los elementos que contienen las protecciones magnetotérmicas y diferenciales de todos los circuitos eléctricos secundarios de un servicio del hospital. En general, se instalan apoyados en el piso, aunque los de pequeñas dimensiones se instalan sujetos a una pared.

Asimismo, desde cada cuadro secundario **las bandejas y líneas eléctricas** están montadas en bandejas o bajo tubos, y efectúan una distribución horizontal hasta los aparatos de alumbrado y la toma de corriente eléctrica. Las bandejas eléctricas, normalmente de material plástico o metálico, se sujetan al forjado mediante varilla roscada. Todos los hospitales disponen de un equipo denominado SAIs (sistema de alimentación ininterrumpida, en inglés UPS, uninterruptible power supply). Por un lado, se tiene a los **SAIs generales** que suelen instalarse en el interior de la sala del cuadro general de baja tensión. Permiten suministrar corriente eléctrica (generalmente durante 10 minutos) ininterrumpida a aquellos equipos y servicios que no pueden quedarse sin suministro eléctrico durante el rango de 8 a 15 segundos (por ejemplo, informática), tiempo que

tardan los grupos electrógenos en ponerse en marcha y la sincronización, cuando falla el suministro eléctrico normal. Por otro lado, los **SAIs particulares** se instalan para cada quirófano, UCI, neonatales, centro de procesamiento de datos (CPD), etc. con diferentes niveles de autonomía (generalmente durante 10 minutos o dos horas en el caso de la lámpara quirúrgica y equipos vitales del quirófano). Los equipos normalmente están apoyados sobre el pavimento. Además, algunos edificios hospitalarios según la normativa, disponen de una instalación de energía fotovoltaica para autoconsumo con placas montadas generalmente en planta cubierta. Las placas se montan en la cubierta o en la fachada de los hospitales sujetos a soportes metálicos o de hormigón.

Respecto, al **alumbrado del edificio**, anteriormente se empleaba lámparas fluorescentes o incandescentes, últimamente se emplea leds. Se disponen de aparatos de iluminación tales como pantallas o leds, los cuales se encuentran sujetos al forjado y en algunos casos apoyados directamente en las placas del falso techo. Los diferentes aparatos de iluminación se encuentran distribuidos por todas las plantas del hospital. Asimismo, existen aparatos autónomos de alumbrado de emergencia y señalización; se encuentran sujetos de las paredes y en algunos casos colgados del falso techo. En el exterior del hospital (accesos viales y aparcamiento) disponen un alumbrado mediante lámparas montadas en columnas verticales o báculos sujetos de paredes del edificio. Además, los hospitales disponen de puntas de pararrayos y una red de tierras enterrada a la que se conectará la estructura del edificio.

Finalmente, existen dos elementos importantes que funcionan con energía eléctrica. Por una parte, existen cabeceros de cama sujetos a las paredes localizados en las habitaciones de las unidades de enfermería y los boxes de hospital de día, urgencias, etc. Además, otros servicios como UCI o neonatología disponen de cabeceros colgados, denominados “pontas” (elemento que se cuelga del techo formando un puente) que incluye todas las tomas eléctricas, de gases medicinales, de la red integrada de voz-datos y aparatos de iluminación. Por otra parte, el **cuadro de control del quirófano** situado en la pared contigua al pasillo sucio contiene una pantalla de visualización, relojes, tomas de corriente eléctrica, interruptores, control de luces, tomas de la red integrada de voz-datos, equipos de comunicación, tomas de gases medicinales, etc.

#### 2.1.4.2 Instalación de comunicaciones

Instalación centralizada responsable de la administración del sistema informático en todas las áreas del hospital, la cual asegura el flujo de información para el desarrollo de las diferentes actividades dentro del edificio hospitalario. Asimismo, es la encargada de mantener la comunicación a nivel exterior con los otros edificios hospitalarios o unidades de emergencia.

La **acometida de las comunicaciones** al hospital se realiza habitualmente de dos maneras: mediante cables enterrados bajo tubos procedentes desde el exterior, y mediante comunicación aérea mediante unas antenas situadas en planta cubierta montadas sobre bancada o sujetas a un poste y muchas veces a pared. El **centro de procesamiento de datos (CPD)** es el corazón de las comunicaciones del hospital. Está formado por un conjunto de racks verticales montados sobre soportes de falso piso, que albergan los servidores, switch, etc., que controlan todo el funcionamiento de la red integrada de voz y datos. Los **racks secundarios de la red integrada de voz y datos** se encuentran distribuidos en todas las plantas del hospital y en el interior de una dependencia dedicada exclusivamente a este uso. Cuentan con la electrónica necesaria para el funcionamiento de la red integrada de voz y datos de un sector del hospital. La Figura 2-4 muestra un ejemplo.



Figura 2-4. Centro de procesamiento de datos

Las bandejas y líneas de la red integrada de voz y datos y otras instalaciones de comunicaciones parten desde el CPD hasta los racks secundarios. La conexión se realiza con cables de fibra óptica montadas en bandejas y desde los racks secundarios con cables multipares y apantallados. Asimismo, desde el patio vertical de las comunicaciones se conectan las líneas de la red integrada de voz-datos, megafonía e interfonía, las que se encuentran montadas en bandejas o bajo tubos, y efectúan una distribución horizontal hasta las tomas o altavoces. Las bandejas eléctricas (normalmente de material plástico o metálico) se sujetan al forjado mediante varilla roscada. Las **tomas de la red integrada de voz y datos** pueden estar montadas en torretas (quirófanos), pontas (UCI o neonatos), cabeceros de camas (habitaciones, boxes de urgencias o de hospital de día) o directamente empotradas en las paredes. En todas las plantas del hospital se instalan **antenas Wifi** para las comunicaciones inalámbricas.

Las antenas suelen apoyarse en las placas del falso techo o directamente al forjado cuando la sala no dispone de falso techo. La **central telefónica** se monta en uno de los racks del CPD, la cual permite la recepción de llamadas exteriores al hospital. La **central de megafonía** es muy importante en un hospital en caso de una situación de emergencia porque desde ella se transmiten las instrucciones de actuaciones a realizar en caso de una alarma o evacuación de una parte o de todo el hospital. La central de megafonía con sus amplificadores se instala normalmente en el centro de seguridad del hospital junto al mostrador de urgencias, que es el centro de control de toda la instalación.

Los **altavoces** se ubican en todas las plantas del hospital para los avisos de emergencia. Los altavoces suelen apoyarse en las placas del falso techo o directamente al forjado cuando la sala no dispone de falso techo. En todos los ascensores y montacamillas del hospital, se dispone normativamente, de un **interfono de emergencia** para las personas del interior de la cabina, conectados al centro de seguridad del hospital y normalmente a una central de recepción de alarmas del exterior.

Respecto al sistema de gestión de colas (turnos) de las consultas externas y urgencias, se dispone de unas pantallas de información ubicadas en las salas de espera de las zonas de consultas externas, de diagnóstico por la imagen, boxes de extracción y de urgencias. Estas pantallas de gran formato disponen de un soporte al forjado. Estos soportes no suelen estar arriostrados.

**Instalaciones de audiovisuales**, situadas en la sala de actos, aulas de docencia y algunas salas de reuniones se disponen de un conjunto de elementos de audiovisuales que, según la tecnología empleada, pueden ser pantallas, video proyectores colgados, pantallas de proyección y elementos de mando. Los videos proyectores suelen disponer de un soporte tipo bandeja sujeto al forjado (no arriostrado) y las pantallas están sujetas a las paredes. Los elementos de mando son de sobremesa. Finalmente, la **instalación de antena de TV** sirve de receptora para la señal aérea de TV y FM disponiendo de una antena parabólica situada en planta cubierta montada sobre una bancada.

### 2.1.4.3 Ascensores

En los hospitales el desplazamiento de personas y el transporte de material deben conjugarse con las actividades propias de las instalaciones médicas. Existen dos tipos de ascensores comúnmente instalados en los hospitales como ascensor de tracción e hidráulico, que funcionan dentro de una cabina. Los ascensores de los hospitales poseen características específicas tanto en seguridad como en capacidad. En los hospitales existen ascensores para las visitas y personal, montacamillas o montacargas para el traslado de pacientes entre servicios y montacarga limpio y sucio para personal y carros de la logística del hospital. En los grandes hospitales puede haber también escaleras mecánicas.

A continuación, se explican algunos de los elementos primordiales que caracterizan el sistema. Las **guías** sirven para mantener la verticalidad y soportar los esfuerzos de los frenos de seguridad y son de perfiles metálicos en T. Su alineación correcta es el factor fundamental para el correcto funcionamiento del sistema. La **cabina**, se desplaza por medio de las guías utilizando unas rozaderas o rodaderas. Se caracteriza por tener en la parte superior el cuarto de máquinas, que sobresale en la cubierta, aunque últimamente también hay ascensores sin sala de máquinas. Respecto a las **puertas** existen dos, tanto la puerta de cabina y las de la planta. Las puertas de cabina protegen a los usuarios durante el viaje y las puertas de la planta separan el hueco por donde se desplaza el ascensor del resto del edificio. Las puertas se caracterizan por tener mecanismos de reversión del cierre para evitar atrapamientos.

La descripción de los ascensores se realiza de acuerdo a los criterios de [FEMA, 2012a]. Los ascensores son sistemas complejos, en el cual la falla de cualquiera de los componentes podría interrumpir el funcionamiento de todo el sistema. Los componentes principales del sistema de ascensor de tracción son la cabina, el contrapeso, las guías, el motor eléctrico, el panel de control eléctrico, los cables, las poleas, los mecanismos de frenado de seguridad, los mecanismos de las puertas y un amortiguador en la parte inferior del eje.

Los componentes principales del sistema de elevador hidráulico son la cabina, las guías, las puertas y el mecanismo de la puerta, el pistón, el cilindro, el depósito de fluido, el fluido hidráulico, la bomba rotativa, la válvula, el interruptor de solenoide y el panel de control eléctrico. Es importante mencionar que todos los ascensores deben ser inspeccionados por técnicos calificados según la normativa vigente. Los ascensores deben tener un interruptor sísmico o características de seguridad que permitan una parada segura en caso de terremoto o incendio. La Figura 2-5 ilustra los dos tipos de ascensores.



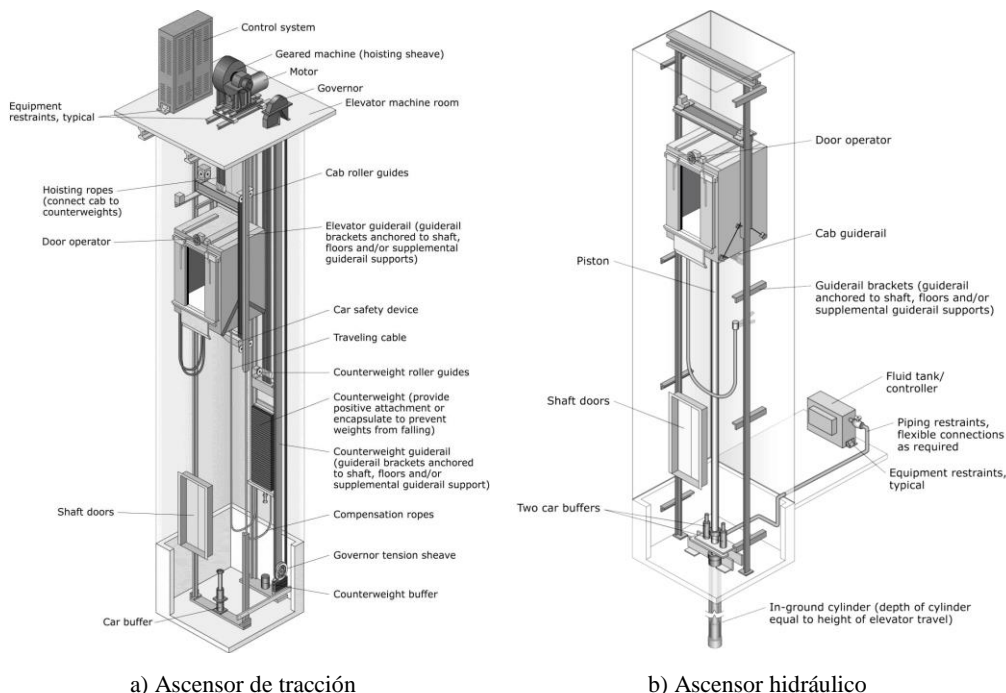


Figura 2-5. Ascensores [FEMA, 2012a]

#### 2.1.4.4 Instalaciones de fontanería

Es el conjunto de tuberías cuyo objetivo es distribuir agua hasta los puntos de consumo en el edificio hospitalario.

La **acometida de agua** es la tubería que conecta la red de abastecimiento municipal de agua al **depósito de reserva de agua** del hospital, situado normalmente en la última planta sótano para apoyarse directamente sobre la solera. Por lo general, tiene una capacidad de almacenamiento de uno o dos días para consumo del hospital (algunos hospitales con dificultades de suministro de agua o que deseen tener una reserva superior en caso de catástrofes naturales antes que se les suministre con camiones cuba pueden tener una capacidad de almacenamiento hasta cinco días). Normalmente son construidos de hormigón armado y cuentan con impermeabilización interior. Junto al depósito de reserva de agua, se ubica el **grupo de presión** que sirve para impulsar el agua mediante bombas a todas las plantas del edificio; montado sobre bancada de hormigón con capas de aislamiento antivibratorio. Respecto a los **tratamientos de agua**, los más habituales es la descalcificación y la osmotización para alimentar aparatos que no puedan funcionar con agua potable directamente tales como autoclaves de esterilización, autoanalizador del laboratorio, lavadesinfectores de instrumental, humectadores, etc. La **central de agua osmotizada** es ubicada en la unidad de hemodiálisis y sirve para alimentar a los equipos dializadores.

Para producir un porcentaje de las necesidades de agua caliente sanitaria del hospital, algunos hospitales usan **paneles solares**, los cuales son colocados en planta cubierta y se encuentran apoyados sobre la impermeabilización y con algún elemento de sujeción para evitar su desplazamiento, debido a la acción del viento. Para **acumular el agua caliente** sanitaria y el agua solar, se usan depósitos metálicos verticales. Finalmente, las **redes de tuberías** de agua fría,

caliente y retorno pueden ser horizontales y verticales ubicadas en patios de instalaciones. Cuentan con derivaciones a ambos lados formando una trama bastante compacta. Pueden emplearse tuberías de acero galvanizado (cada vez menos), cobre y materiales plásticos (polipropileno, polietileno reticulado y poli butileno, entre otros). Las tuberías horizontales se sujetan con soportes colectivos al forjado mediante varillas. También se pueden instalar en el interior de una bandeja que está sujeta al forjado; los soportes no suelen arriostrarse. No siempre hay dilatadores en el paso de las tuberías por las juntas de dilatación. Respecto a los aparatos sanitarios, actualmente es común colgar de las paredes los lavabos y montar los inodoros elevados con un soporte apoyado en piso y en la pared.

#### 2.1.4.5 Instalación de saneamiento

Tiene como finalidad evacuar de manera separativa las aguas residuales y pluviales hasta la red de saneamiento urbano.

Las **bajantes verticales** tanto para evacuación de aguas residuales y pluviales suelen estar montados en unos patios de instalaciones o sujetos directamente a las columnas de la estructura. Los **colectores colgados** circulan generalmente colgados del forjado del sótano -1 antes de salir al exterior del edificio para conectar a la red de albañales hasta la conexión con la red pública de alcantarillado. Las sujeciones suelen ser con varilla roscada al forjado y con pendientes progresivas. Cuando es necesario existen **equipos de bombeo**, que se emplean para elevar las aguas pluviales y residuales y que son recogidas en plantas por debajo de la cota del albañal público. Se encuentran montados en el interior de un depósito enterrado bajo el último forjado con una bomba de reserva. Además, muchos hospitales disponen de una **instalación de recuperación y reaprovechamiento de las aguas pluviales**, que sirven para las instalaciones de riego y para la alimentación de las cisternas de los inodoros. La instalación está formada por dos depósitos impermeabilizados interiormente, generalmente son depósitos de hormigón armado, uno para la recepción de aguas pluviales acumuladas en el edificio y otro para la acumulación de las aguas tratadas. Además, junto a los depósitos de agua existe un equipo de filtraje y un grupo de presión que alimenta a una red de tuberías.

Normalmente los hospitales vierten las aguas residuales directamente a la red de alcantarillado público sin tratamiento previo. Sin embargo, algunos hospitales disponen de **sistemas de tratamiento**, que consiste en una depuradora de aguas residuales antes de su vertido. Además, en algunos hospitales existen unos tratamientos especiales para los residuos líquidos contaminados con productos radioactivos (almacenamiento y posterior dilución), residuos de laboratorios de seguridad biológica P3 y de algunos servicios de autopsias (ebullición o hipercloración de los residuos).

#### 2.1.4.6 Instalaciones de extinción y detección de incendios

Para la extinción del incendio se tienen los siguientes elementos: los **extintores portátiles** son los elementos básicos de un primer ataque a los conatos de incendio. Se encuentran distribuidos en todas plantas de manera que cualquier punto del hospital se encuentre a menos de 15 metros de un extintor. Suelen estar colgados en paredes o en el interior de armarios junto a los equipos de manguera. Los **hidrantes exteriores** son unos elementos colocados en el exterior del hospital para suministrar agua a los equipos de extinción públicos (bomberos). Están conectados a una red de tuberías enterradas de agua. El **depósito de reserva agua** para incendios, situado normalmente en la última planta sótano para apoyarse directamente sobre la solera. Suele disponer de una capacidad de almacenamiento de agua en función de la instalación y de lo exigido por la

normativa empleada. Normalmente están contruidos de hormigón armado y cuentan con impermeabilización interior.

El **grupo de presión de equipos de manguera y rociadores automáticos** (sprinklers), se encuentran junto al depósito de reserva de agua para incendios, impulsa el agua mediante bombas a todas las plantas del edificio. Está montado sobre bancada con capas de aislamiento antivibratorio. Dispone de bombas eléctricas y bomba diésel con suministro de combustible líquido. Los **puestos de control** de la instalación de rociadores automáticos controlan el paso de agua a las diferentes zonas de extinción y están sujetos a una pared. Asimismo, las bocas de incendio equipadas (equipo manguera) están repartidos por todas las plantas del hospital, de manera que cualquier punto de todas las plantas se encuentre a menos de 25 m de un equipo de manguera. Están montados en el interior de armarios empotrados o adosados en una pared.

Respecto a las **redes de tuberías de equipos de mangueras y rociadores automáticos** pueden ser horizontales o verticales y tienen muchas derivaciones a ambos lados formando una trama bastante compacta. Se emplean normalmente tuberías de acero negro soldados o roscados. Las tuberías se sujetan con soportes individuales al forjado mediante varillas; no suelen arriostrarse. Además, tampoco suelen colocarse dilatadores en el paso de tuberías por juntas de dilatación.

En algunos lugares del hospital se disponen pequeñas instalaciones de **extinción automática por gas** localizados en el CPD (Centro de procesamiento de datos) o en salas de equipos especiales de alto coste. Se emplean baterías dobles de botellas de gases extintores o inertes con sus redes de tuberías y boquillas difusoras. Las botellas y el cuadro de inversión están sujetas a la pared. El sistema de **extinción por polvo** se coloca en las campanas o en una pared cercana de la cocina del hospital.

Todas las dependencias del hospital disponen de una instalación de detección automática de incendios. La **central de detección** está situada normalmente en el centro de seguridad del hospital junto al mostrador de urgencias, la cual recibe todas las alarmas y transmite las órdenes de actuación automática sobre todas las instalaciones contenidas en el Manual de Autoprotección del edificio. La central está sujeta a una pared del edificio. Asimismo, la central dispone de alimentación eléctrica y alimentación de emergencia mediante batería autónoma. Respecto a las **bandejas y líneas de detección**, desde la central de incendios, las líneas de detección, pulsadores manuales de alarma y órdenes de actuación, se reparten en distribuciones horizontales y verticales por todas las plantas del hospital. Las bandejas de detección suelen ser compartidas con otras instalaciones de tensiones débiles (red integrada voz-datos, megafonía, seguridad y sistema de gestión). Las bandejas normalmente son de material plástico o de varilla metálica, se sujetan al forjado mediante varilla roscada. Las conexiones últimas a detectores y pulsadores se realizan con cables bajo tubo. En todas las dependencias del hospital se colocarán **detectores de incendio**, instalando detectores de tipo óptico de humos o térmicos y termovelocimétricos combinados. Los detectores suelen apoyarse en las placas del falso techo o directamente al forjado cuando la sala no dispone de falso techo. Finalmente, las **sirenas de alarma** se colocan junto a los equipos de mangueras que se encuentran sujetas a la pared.

#### *2.1.4.7 Instalación de climatización*

Su finalidad es crear condiciones adecuadas de temperatura en función de la época del año, conjuntamente con ventilación o filtrado, humedad y presión en las unidades especializadas como en quirófanos, unidad de cuidados intensivos (UCI), neonatos, urgencias, hospital de día, etc. Requiere de grandes espacios tanto en planta como en altura para la colocación de sus equipos y para la red de conductos.

Un sistema de climatización dentro de un edificio hospitalario comprende lo siguiente: la producción de frío y calor, se realiza con varias fuentes de energía como electricidad, gas natural, gasóleo y en algunos casos geotermia, aunque son pocos los hospitales que disponen de esta energía. Esta instalación está formada por un conjunto de perforaciones (pozos) a gran profundidad con redes de tuberías en el interior del pozo y debajo de la solera de la planta inferior, con equipos de bombeo.

Respecto a las necesidades de frío del hospital se obtiene mediante **máquinas enfriadoras** refrigeradas por aire o por agua y que también pueden ser bombas de calor, habitualmente montadas a la intemperie en planta cubierta sobre bancadas de hormigón armado o metálicas con capas de aislamiento antivibratorio y con silentblocks en los puntos de apoyo. La unión con las tuberías se realiza con manguitos antivibratorios. Las necesidades de calor se obtienen a través de **calderas** las cuales habitualmente se encuentran montadas en una sala localizada en planta cubierta, igualmente montadas con características similares a las máquinas de frío sobre bancadas. La unión a las tuberías de agua es directa. Sin embargo, la conexión de gas o gasóleo a los quemadores se materializa con tubos flexibles. Además, la sala de calderas dispone de una pared débil que puede ser vidrio o reja en el caso de producirse una explosión. En la Figura 2-6 se puede visualizar las máquinas de producción de frío y calor.



a) Máquina enfriadora



b) Caldera

**Figura 2-6.** Producción de frío y calor

Las **máquinas de frío** y las **calderas** producen agua fría o caliente para la climatización, pero no son elementos que muevan el agua a través de la red de tuberías. Los equipos que mueven el agua son las **bombas o electrobombas**, ubicadas sobre bancadas de hormigón o metálicas. Existen dos tipos de bombas, unas llamadas primarias y otras llamadas secundarias. Las bombas primarias hacen pasar el agua a través de las máquinas de frío o las calderas para sacarles el frío o el calor, y las bombas secundarias son responsables de enviar esa misma agua fría o caliente a todo el edificio (climatizadores, fancoils, techo radiante, entre otros). Por razones de economía de tubos (idas y retornos) conviene ubicarlas lo más cerca posible de las máquinas de frío y de las calderas. En la misma sala se ubican los depósitos verticales pulmón y vasos de expansión.

Otro sistema de producción de frío y calor es el de **volumen de refrigerante variable (VRV)** cuyas unidades exteriores se sitúan en las plantas cubiertas montadas sobre una pequeña bancada de hormigón. No acostumbran a disponer de conexiones flexibles. La Figura 2-7 ilustra los principales elementos de distribución de agua tanto fría como caliente.



Figura 2-7. Distribución del agua

La producción del aire tratado para grandes espacios y unidades se realiza con unidades climatizadoras y para dependencias pequeñas e individuales con unidades fan-coils o unidades interiores de VRV. Las **unidades climatizadoras** están ubicadas en varias salas de máquinas repartidas por el hospital. Cada unidad climatizadora está formada por varias secciones ensambladas entre ellas (filtros, ventiladores, humectadores, baterías de frío y calor, recuperadores de calor, silenciadores). Es importante destacar, que cada quirófano dispone de su climatizador y también las principales unidades del hospital, entre ellas la unidad de cuidados intensivos, neonatos, urgencias, hospital de día, etc. La unión de las baterías de agua fría y caliente a las tuberías es generalmente directa y las uniones a las redes de conductos se realizan con lonas antivibratorias.

Las **unidades de fan-coils** suelen instalarse en falso techo en la entrada a cada habitación de la unidad de enfermería (hospitalización), consulta o despacho administrativo. Están sujetas al forjado con varillas; generalmente no están arriostradas. La conexión a las tuberías de agua y de electricidad se suele hacer con tubos flexibles y la conexión a la red de conductos se realiza con lonas antivibratorias. También pueden instalarse fan-coils vistos tipo consola en los antepechos de las ventanas.

Las **unidades interiores de VRV** se instalan en algunos hospitales en el falso techo de las dependencias. Están sujetas al forjado con varillas; no están arriostradas. La conexión a las tuberías de gas refrigerante y de electricidad se suele materializar con tubos flexibles y la conexión a la red de conductos se realiza con lonas antivibratorias. También pueden instalarse unidades interiores de VRV vistas tipo consola en los antepechos de las ventanas. La Figura 2-8 ilustra los elementos de generación de aire.

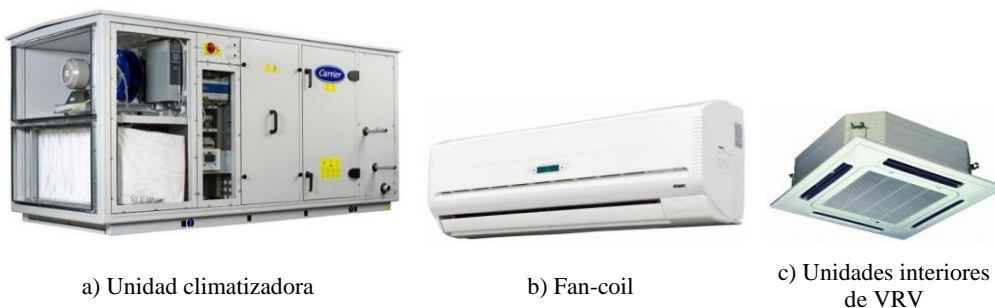


Figura 2-8. Generación de aire

Las redes de distribución de aire, agua y gas refrigerante se realizan por medio de conductos y tuberías. Las **redes de conductos** están construidas con piezas de plancha de acero galvanizado

y aislamiento exterior o plancha de fibra de vidrio con lámina metálica de protección en el interior del conducto. Los conductos se sujetan con varilla roscada y muchas veces con alambres al forjado, por lo general, no están arriostrados. Las **redes de tuberías** de frío y calor pueden ser horizontales o verticales. Tienen muchas derivaciones a ambos lados formando una trama bastante compacta. Pueden emplearse tuberías de acero negro o de materiales plásticos (polipropileno). Las tuberías se sujetan con soportes colectivos al forjado mediante varillas. Cada tubo dispone de una abrazadera con junta de goma. Los soportes no suelen arriostrarse y no siempre hay dilatadores en el paso de tuberías por una junta de dilatación. Las **redes de gas refrigerante** pueden ser horizontales o verticales y pueden tener derivaciones a ambos lados. Se emplean normalmente tuberías de cobre de pequeño diámetro muchas veces montadas en una bandeja. Las tuberías o bandejas se sujetan con soportes al forjado mediante varillas. Cada tubo dispone de una abrazadera con junta de goma. Los soportes no suelen arriostrarse y no suele haber dilatadores en el paso de tuberías por una junta de dilatación. Además, existen las **chimeneas** desde cada caldera o elemento que precise salida de humos o gases (cabinas de trabajo de laboratorio, campana de cocina) hasta la cubierta del edificio; se encuentran construidas a tramos y sujetas a paredes de patios de instalaciones o fachadas y a forjados.

Finalmente, la impulsión de aire en los diferentes espacios se realiza mediante **rejas y difusores**, montados en los falsos techos con cajones sujetos al forjado con varillas o alambres. En muchas ocasiones, son espacios con riesgo de contaminación biológica (quirófanos, UCI, fecundación in vitro (FIV), laboratorios de seguridad o contención), están conectados con conductos flexibles a la red de conductos. En lo que respecta al **flujo laminar de quirófanos** o difusores con filtro absoluto incorporado, es un cajón de grandes dimensiones ubicado en el falso techo de los quirófanos con filtros absolutos de alta eficacia. Los cajones están sujetos con varillas al forjado y están conectados directamente a la red de conductos; no suelen estar arriostrados. La Figura 2-9 muestra un ejemplo del sistema de flujo laminar.

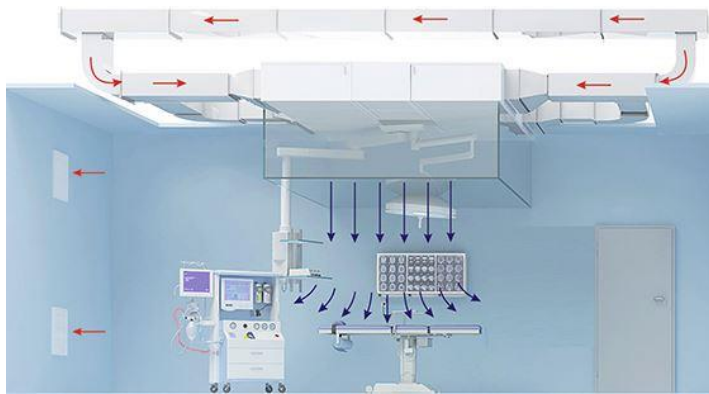


Figura 2-9. Flujo laminar en quirófano

#### 2.1.4.8 Instalación de combustible gaseoso

Se emplea para alimentar las calderas y los aparatos de la cocina, entre otros. La **acometida de gas** es la tubería de unión desde la red de la compañía suministradora hasta el edificio. Normalmente la **cámara de gas natural** se ubica en el exterior o en la cubierta del edificio, y cuando se ubica en el interior del edificio hospitalario es en un armario. Cuando no existe una red de suministro de gas natural, se dispone de un **depósito de gas propano** enterrado o de superficie. Su distribución se efectúa por medio de **redes de tuberías**, que pueden ser horizontales o

verticales hasta los puntos de consumo. Se caracterizan por ser de material de acero negro o de cobre. Las tuberías se sujetan al forjado con varillas y abrazaderas con juntas de goma. Los soportes no suelen arriostrarse y no existen dilatadores al paso de las juntas de dilatación. Todas las dependencias con instalación de gas natural o propano dispondrán de un **sistema de detección de fugas de gas**, con detectores de techo o bajos, según la densidad del gas y centralita colgada en la pared.

#### *2.1.4.9 Instalación de combustible líquido*

En general las instalaciones son enterradas y se usan para alimentar a calderas y a grupos electrógenos. Para alimentar el grupo electrógeno y en ocasiones las calderas de calefacción se disponen de un **depósito metálico enterrado**. El depósito se encuentra en el interior de una fosa de hormigón armado sobre unas cuñas de apoyo. Junto al depósito enterrado y en el interior de una arqueta registrable se coloca el **grupo de presión** para impulsar el gasóleo. Las **redes de tuberías** de gasóleo son similares a las explicadas en la instalación de combustible gaseoso.

#### *2.1.4.10 Instalación de transporte neumático de muestras, ropa sucia y basuras*

Sistemas en los cuales unos contenedores son empujados a través de una red de tubos por medio de aire comprimido o de vacío.

El sistema de tubo neumático de muestras utiliza unos cartuchos para los envíos y la central dispone de una **soplante de transporte neumático** que se monta sobre una bancada o directamente apoyada en la solera. Las redes de tubos neumáticos de bolsas de ropa sucia y basura suelen colgarse mediante soportes metálicos sujetos al forjado o en el techo de la sala de gran altura donde se ubican las soplantes y los contenedores de recogida de residuos y ropa sucia, apoyados en el piso. La **red de tuberías de transporte neumático** de muestras se realiza con tubos de PVC de 110 mm de diámetro, en algunos casos de 160 mm, con distribuciones tanto horizontales como verticales. Tienen algunas derivaciones mediante agujas derivadoras que se sujetan al forjado. Las tuberías del sistema de transporte neumático de ropa y basura son de PVC o de acero inoxidable de 450 mm de diámetro. Todas las tuberías se montan en el interior de patinejos (patios de instalaciones), procurando que el trazado horizontal se extienda lo menor posible, debido al espacio que ocupan. Las tuberías se sujetan al forjado con soportes individuales tipo varillas. Los soportes no suelen arriostrarse y no existe dilatadores en las juntas de dilatación.

Finalmente, las **estaciones de transporte neumático** de muestras se sujetan de una pared cerca de los controles de las unidades del hospital. Las estaciones del sistema de transporte neumático de ropa sucia y basura se empotran en las paredes del patinillo o patios de instalaciones por donde suben todos los tubos verticales.

#### *2.1.4.11 Instalación de seguridad*

Es vital para controlar la seguridad interior y de accesos del hospital, suelen ser instalaciones de apoyo para las funciones de vigilancia y control, abarcan diversos tipos.

Entre los principales elementos se tiene la central **anti-intrusión** que se encuentra situada en el centro de seguridad del hospital junto al mostrador de urgencias, donde se reciben todas las alarmas. La central está sujeta a una pared del edificio, dispone de alimentación eléctrica y alimentación de emergencia mediante batería autónoma. Los **contactos** están montados en las puertas exteriores y en las puertas de locales que precisen control. Los detectores bi-volumétricos

pueden estar sujetos de las paredes o sujetos de las placas del falso techo. Los **sistemas de control de accesos** están montados directamente en la cerradura de las puertas que protegen o empotradas en la pared. Las **cámaras del circuito CCTV** (circuito cerrado de televisión), se instalan en el exterior del hospital, así como en las salas de espera y pasillos de su interior. Las cámaras exteriores están sujetas en el acabado exterior de la fachada y las de los interiores están sujetas directamente a una pared o con soporte colgado sujeto al forjado.

Sobre una mesa o en una pared del centro de seguridad se instalan el conjunto de **monitores de vigilancia**. También sobre el mostrador están montados los elementos de mando de las cámaras y los sistemas de edición de tarjetas del sistema de control de accesos. El sistema de video grabación puede ser de sobremesa o estar montado en un rack de comunicaciones. Las **bandejas y líneas de los sistemas de seguridad** van desde la central de seguridad de las líneas de los sistemas anti-intrusión, control de accesos y CCTV, efectúan una distribución horizontal y vertical en todas las plantas del hospital. Las bandejas de estas instalaciones suelen ser compartidas con otras instalaciones de tensiones débiles (red integrada voz-datos, detección de incendios, megafonía y sistema de gestión). Las bandejas normalmente son de material plástico o de varilla metálica, las cuales se sujetan al forjado mediante varilla roscada. Las conexiones finales que van a los detectores de cámaras se realizan con cables bajo tubo.

#### 2.1.4.12 Instalaciones de sistemas de gestión

Es la instalación que sirve para manejar de forma automática y manual todas las instalaciones del hospital. Entre los principales elementos se tiene al **puesto de control central** formado por un ordenador y una impresora, está situado en el despacho del responsable de mantenimiento, en el taller de mantenimiento y en la central de seguridad. Las **subestaciones** se encuentran repartidas por las plantas, se dispone de armarios donde se reciben las señales de los sensores y desde donde se dan instrucciones de actuación a las instalaciones. Las subestaciones suelen instalarse colgadas en paredes o apoyadas en el piso cuando son de gran tamaño. Los **sensores y elementos de control** pueden estar montados en paredes o directamente en tuberías o conductos. Finalmente, las **bandejas y cables** de la instalación del sistema de gestión que se extienden desde las subestaciones a los elementos terminales de control, efectúan una distribución horizontal y vertical en todas las plantas del hospital. Las bandejas de las instalaciones suelen ser compartidas con otras instalaciones de tensiones débiles (red integrada voz-datos, detección de incendios, megafonía y seguridad). Las bandejas son normalmente de material plástico o de varilla metálica, se sujetan al forjado mediante varilla roscada. Las conexiones últimas a elementos de control se realizan con cables bajo tubo.

### 2.1.5 Equipamiento médico y contenidos

Equipamiento médico, comprende un gran número de aparatos, instrumentales, accesorios, material u otro artículo similar para el diagnóstico, prevención, control y tratamiento, utilizados en todas las especialidades de un hospital. En otras palabras, abarca todos los servicios destinados a uso médico. De manera similar que las instalaciones se agrupan de una manera ordenada para lograr una fácil lectura de la importancia del equipamiento médico.

A continuación, se explica cada unidad haciendo referencia a las características de sus principales servicios, de acuerdo al conocimiento adquirido en las visitas a diferentes hospitales, entrevista con un experto en el tema de JG Ingenieros (Despacho de Ingeniería en Barcelona), así como de las siguientes referencias [NHS Estates, 2005; Rousseau and Bare, 2007; Bambarén y Alatrística, 2008; Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009; JG Ingenieros, 2010; Carpmán and Grant,



2016]. La referencia de las figuras de equipamiento médico y contenidos corresponde a lo especificado en la sección “Créditos de fotos” ubicado al final de este documento.

### 2.1.5.1 Unidad de cuidados intensivos (UCI)

Es un servicio especial dentro del área hospitalaria, cuenta con servicios integrales de atención médica y de enfermería en forma permanente durante las 24 horas del día. Además, cuenta con equipos altamente especializados. La Figura 2-10 muestra un box típico de la UCI.



1. Cama eléctrica; 2. Cabecero colgado; 3. Bombas de infusión y soportes de sueros; 4. Mostrador del puesto de control de enfermería

**Figura 2-10.** Unidad de cuidados intensivos

Como se visualiza en la Figura 2-10 en los boxes de la UCI se emplean **camas eléctricas** (1) con ruedas y con freno, en casos de pacientes con riesgos de llagas se dispone de colchones conectados a la red eléctrica. En general, los boxes de la UCI disponen de un **cabecero colgado (pontas)** (2) el cual hace referencia al sistema del techo con soportes fijados al forjado que incorporan instalaciones de iluminación, tomas eléctricas, tomas de la red integrada de voz-datos, sistema de llamada a la enfermera y tomas de gases medicinales. Además, del mismo canal se sujetan unas torres con bandejas para los monitores de constantes vitales; estos soportes no se encuentran arriostrados.

Sujetos a los cabeceros colgados o a las camas y en otros casos sujetos con un soporte autoportante con ruedas, se encuentran las **bombas de infusión y soportes de sueros** (3) conectados a los pacientes. En el **mostrador del puesto de control de enfermería** (4) se encuentran instalados tanto ordenadores como múltiples monitores, necesarios para la recepción de la información de los pacientes y sus respectivas alarmas.

**Equipos y mesas móviles** corresponden a los equipos de resucitación, carros de curas, carros de material limpio, carros de residuos, carros de limpieza, etc., que se desplazan por los pasillos y por el interior de los boxes. Asimismo, la **puerta de acceso** al box puede ser de corredera automática o manual; está montada sobre guías sujetas a la pared. También cuenta con **aparatos y elementos sobre repisas** con cajones y armarios inferiores, localizados en el puesto de control de la UCI, en el oficio limpio y sucio. Además, existen **estanterías colgadas**, las cuales se encuentran sujetas a la pared para albergar material auxiliar. Sin embargo, el sistema de cierre de

las puertas suele ser por imán y baldas que no disponen de reborde. En los **almacenes** de la unidad los materiales se colocan en estanterías o en carros los repuestos, la ropa limpia, ropa sucia y residuos.

Una unidad especial dentro de la unidad de cuidados intensivos es la de grandes quemados, destinada al *tratamiento de pacientes quemados*, y que se caracteriza por tener unas **grúas** para desplazar a los pacientes desde los boxes hasta las **bañeras**. Las grúas se desplazan por carriles con soportes colgados desde el forjado. Sin embargo, los soportes no se encuentran arriostrosados. Además, cuenta con un **sistema de vigilancia por circuito cerrado de televisión con monitores (CCTV)** situados en el puesto de control de la unidad. Las cámaras por lo general se encuentran ubicadas en soportes montados y sujetos a las paredes o a los falsos techos.

### 2.1.5.2 Neonatología

Unidad encargada de brindar cuidados continuos a los recién nacidos que requieren una vigilancia especial. La Figura 2-11 ilustra una sala de neonatología convencional.



1. Incubadora; 2. Ponta colgada; 3. Bombas de infusión y soportes de sueros;  
4. Monitores colgados; 5. Equipos y mesas móviles

**Figura 2-11.** Neonatología

La unidad de neonatología presta servicios similares que la UCI. Por tanto, cuenta con elementos semejantes tales como: **ponta colgada** (2), bombas de infusión y **soportes de sueros** (3), equipos y mesas móviles, armario informatizado de medicación, monitores de puesto de control, aparatos y elementos sobre repisas, vitrinas colgadas (estanterías de vidrio con puertas) en el puesto de control y almacén. Finalmente, como se muestra en la Figura 2-11 la unidad de neonatología presenta dos tipos de variaciones en sus elementos, como se explica a continuación. Las **incubadoras** (1) las cuales disponen de ruedas y frenos y finalmente los **monitores colgados** (4) ubicados en cada incubadora, los cuales en algunas ocasiones se pueden colocar en bandejas colgadas de las pontas o en mesas auxiliares.

### 2.1.5.3 Hospitalización

Su función es prestar atención integral al paciente que permanece en el hospital, para recibir servicio médico y de enfermería. Además, es el espacio que sirve para alojar las víctimas ante emergencias o desastres naturales. La Figura 2-12 muestra una habitación representativa de hospitalización.

La unidad de hospitalización se diferencia claramente de la UCI por su mediana complejidad. No obstante, tiene elementos similares tales como: cama eléctrica (1), bombas de infusión y soportes de sueros, armario informatizado de medicación, equipos y mesas móviles (6), aparatos y elementos sobre repisas, vitrinas colgadas (estanterías de vidrio con puertas) y almacén. Asimismo, tiene **cabecero de cama** (2) con una diferencia respecto a su soporte; ya que el de hospitalización se sujeta a la pared.



1. Cama eléctrica; 2. Cabecero de cama; 3. Bombas de infusión y soportes de sueros; 4. Mesilla de noche; 5. Equipos y mesas móviles; 6. Aparatos de TV

**Figura 2-12.** Hospitalización

Además, existen dos elementos característicos de hospitalización tales como **mesilla de noche** (4) las cuales pueden estar sujetas a la pared de la habitación o ser mesillas móviles con ruedas que no disponen de freno, y los **aparatos de TV** (5) que por lo general se encuentran apoyados en repisas elevadas, sujetos con soportes a la pared opuesta a la cama, y en otros casos integrados en un brazo articulado sujeto a la pared.

### 2.1.5.4 Consulta externa

Permite el diagnóstico, asignación de tratamientos o seguimiento de un paciente, mediante la exploración física y lo señalado en la historia clínica. Asimismo, son espacios utilizados en caso de emergencias o desastres naturales. La Figura 2-13 muestra una sala de consulta externa común.

En la Figura 2-13 se exponen los principales elementos de consulta externa. A continuación, se explican cada uno de ellos. **Camilla de observación y otros aparatos** (1) se encuentran en gran variedad en las consultas de las diferentes especialidades, las cuales se caracterizan generalmente por estar articuladas, con o sin sistemas de frenado. Por ejemplo, en las consultas de odontología

se dispone de un sillón especial y de aparato de rayos X. De la misma forma, en los gabinetes de exploraciones especiales de oftalmología se disponen de múltiples aparatos autónomos sobre ruedas y otros apoyados en repisas. Asimismo, en el gabinete de otorrino se dispone de una cabina de audiometría. En el gabinete de pruebas de esfuerzo se dispone de una cinta rodante y de una bicicleta estática. **Lámpara de observación** se encuentran generalmente fija con soporte a la pared sobre la camilla o desplazable sobre soportes móviles. **Aparatos y elementos sobre repisas** (2) en todas las consultas existen repisas, con cajones y armarios inferiores. **Vitrinas colgadas** (3) sobre la repisa de la consulta externa existen vitrinas colgadas (estanterías de vidrio con puertas) en pared para albergar material auxiliar. Sin embargo, el sistema de cierre de puertas es por imán y las baldas comúnmente no disponen de reborde. En las consultas existe una mesa de atención al paciente (4).



1. Camilla de observación y otros aparatos; 2. Aparatos y elementos sobre repisas; 3. Vitrinas colgadas (estanterías de vidrio con puertas); 4. Mesa de atención al paciente

**Figura 2-13.** Consulta externa

Finalmente, otro componente importante son los **monitores colgados** para el sistema de gestión de turnos ubicados en la sala de espera de las zonas de consultas externas y gabinetes de exploraciones especiales. Generalmente están sujetos mediante soportes independientes al forjado, los cuales no se encuentran arriostrados.

### 2.1.5.5 Urgencias

Tiene como función principal la clasificación, admisión, estabilización y tratamiento inmediato de pacientes no programados. Además, es la unidad que ofrece servicio a las víctimas masivas en situaciones de emergencias o desastres naturales.

Internacionalmente los enfermos que llegan a urgencias se clasifican en cinco niveles de tipo de emergencia y necesidad de inmediata atención tales como: Nivel 1, enfermos que suelen ingresar en ambulancia, con situaciones de alto riesgo de pérdida de vida y que no pasan por el control ni por la sala de espera y a los que se les presta una atención inmediata; Nivel 2, enfermos graves, pero sin riesgo de pérdida de vida, que necesitan ser atendidos rápidamente. No pasan por la sala de espera, sin embargo, precisan de exploraciones especiales. Además, quedan ingresados en UCI u Hospitalización; Nivel 3, pacientes graves, pero sin riesgo de vida y que pueden esperar para

ser atendidos. Precisarán exploraciones radiográficas y de laboratorio y que posiblemente después de pasar por observación ingresarán en una Unidad de Enfermería (Hospitalización); Nivel 4, pacientes con un problema que pueden esperar para ser atendidos, que después de pasar por la atención y de estar un tiempo en observación regresará a su hogar; y Nivel 5, pacientes que no debieran haber acudido a las urgencias del hospital con afecciones ligeras (banales) que pueden esperar en la sala de espera y que después de ser atendidos en un box pueden regresar a su hogar sin pasar por observación. En la Figura 2-14 se ilustra un ejemplo de un box de emergencia con sus principales elementos.



1. Camilla; 2. Cabecero; 3. Bombas de infusión y soportes de sueros, 4. Carros móviles

**Figura 2-14.** Urgencias

La unidad de urgencias contiene **camillas** (1) articuladas ubicadas tanto en el box de atención inmediata, box de triage y zona de observación. Asimismo, tiene **cabeceros** (2) similares a los de hospitalización. Por otra parte, posee elementos similares a la UCI tales como bombas de infusión y soportes de sueros (3), monitores del puesto de control, carros móviles y aparatos móviles (4), vitrinas colgadas (estanterías de vidrio con puertas), aparatos y elementos sobre repisas, armario informatizado de medicación y almacén. Asimismo, existen **pantallas de visualización** ubicados en la sala de espera del servicio de urgencias, con anclajes similares a los de consulta externa.

### 2.1.5.6 Hospital de día

Presta servicio sanitario asistencial. El paciente se mantiene en la unidad por un plazo de 4 a 12 horas, durante el cual recibe todos los tratamientos específicos tales como terapias con aparatos especializados, análisis, curas, etc. La Figura 2-15 representa una sala típica de hospital de día. La mayor parte de los elementos de la unidad como **camillas** (con freno) o más frecuentemente sillón articulado (1), **cabecero** colgado de la pared que incorpora el alumbrado y las tomas eléctricas, de la red integrada voz-datos, sistema de llamada a enfermera y de gases medicinales (2), **bombas de infusión y soportes** de sueros sujetos a las camillas o a las barras portaobjetos o con un soporte autoportante con ruedas, se suelen conectar a casi todos los pacientes (3), mostrador de enfermeras (4), aparatos de TV (5), mesas móviles, aparatos de rayos X portátil, vitrinas colgadas (estanterías de vidrio con puertas), aparatos y elementos sobre repisas, armario informatizado de medicación y almacén son similares a las unidades anteriores.



1. Camilla o sillón articulado; 2. Cabecero; 3. Bombas de infusión y soportes de sueros; 4. Mostrador de enfermeras; 5. Aparato de TV

**Figura 2-15.** Hospital de día

### 2.1.5.7 Bloque quirúrgico

Servicio que agrupa todos los quirófanos, con todas las instalaciones y equipos para la realización de procedimientos diagnósticos y terapéuticos quirúrgicos; los cuales requieren de un elevado nivel de asepsia. Es importante indicar que las circulaciones al bloque quirúrgico son independientes a las circulaciones generales del hospital. Sin embargo, son de fácil acceso desde las mismas. La Figura 2-16 ilustra una sala representativa de quirófano.



1. Lámpara quirúrgica; 2. Torretas de cirujano y anestésico; 3. Pantallas de visualización; 4. Mesa de operaciones; 5. Equipo de anestesia; 6. Bistrufi electrónico y monitores; 7. Mesas de instrumental; 8. Panel técnico

**Figura 2-16.** Bloque quirúrgico

Las **Lámparas quirúrgicas** (1) están sujetas mediante soportes al forjado y montadas sobre el centro o en los laterales de la mesa de operaciones. El soporte solamente se suele arriostrear cuando

la altura del falso techo es grande (generalmente superior de 80 cm). **Torretas de cirujano y anestesista** (2) contienen las tomas eléctricas, conexión de equipotencial (pieza donde mediante una rosca puede conectarse el cable de cualquier elemento metálico situado en una dependencia del hospital con IT (transformador separador, vigilador de aislamiento) como Quirófanos, UCI, etc.), además de las tomas de comunicaciones, de gases medicinales y también pueden soportar monitores. Están sujetas mediante soportes al forjado y dispuestas cerca de la cabecera o en los pies de la mesa de operaciones. De manera similar, como la lámpara quirúrgica se suelen arriostrar cuando la altura del falso techo es grande. **Pantallas de visualización** (3) son comunes en quirófanos y muy especialmente en quirófanos dedicados a cirugía laparoscópica. Se encuentran sujetas mediante soportes independientes al forjado o sujetas a los brazos de las lámparas quirúrgicas y de las torretas. Igualmente, el soporte de las pantallas no se suele arriostrar.

**Mesa de operaciones** (4) se encuentra simplemente apoyada sobre el pavimento disponiendo de un freno, y en pocos casos existen mesas con anclaje empotrado en el pavimento. **Equipo de anestesia** (5) se ubica normalmente junto a la cabecera de la mesa de operaciones y junto a la torreta del anestesista. El equipo se caracteriza por disponer ruedas y un freno. **Bisturí electrónico y monitores** (6) sobre mesas o en las bandejas de las torretas, se coloca el bisturí y diversos monitores de medición de constantes del paciente. **Mesas de instrumental** (7) se dispone en el quirófano de un conjunto de mesas auxiliares con ruedas, alrededor de la mesa de operaciones. **Panel técnico** (8) localizado en una de las paredes del quirófano (generalmente la contigua al pasillo sucio) está empotrado el panel de control que contiene una pantalla de visualización, tomas eléctricas y de comunicaciones, reguladores de la iluminación, relojes, interfono, etc. **Equipos móviles** en el bloque quirúrgico existen equipos móviles como aparatos de rayos X portátiles, equipos de resucitación, etc., que se desplazan al lugar donde son necesarios.

En algunos quirófanos especializados, existen otros elementos importantes tales como **arco de rayos X quirúrgico colgado**, aunque lo habitual es emplear un aparato de rayos X portátil. Asimismo, el soporte solamente se suele arriostrar cuando la altura del falso techo es grande (generalmente superior de 80 cm). Existen otros equipos como, **microscopio quirúrgico** dedicado a microcirugía, por ejemplo, para operaciones de oftalmología, otorrinolaringología, ginecología, etc. El equipo se caracteriza principalmente por estar colgado y en otras ocasiones por ser móvil. Por tanto, cuando se encuentra colgado, se sujeta mediante soportes al forjado sin arriostrarse. Existen **equipos de cirugía laparoscópica o equipos de quirófanos robotizados** dispuestos en el interior del quirófano o en una sala anexa. Se caracterizan por disponer de racks, en los cuales se instalan los elementos de mando, de gestión y transmisión de imágenes quirúrgicas.

Otro componente vital en el bloque quirúrgico son las puertas de los quirófanos, su importancia radica por mantener un correcto funcionamiento del quirófano en condiciones de estanqueidad y sobrepresión. Se caracterizan por ser puertas automáticas, especialmente la que comunica con el pasillo estéril. Cuentan con un sistema de apertura eléctrica, son correderas y estancas; se desplazan sobre carriles.

### 2.1.5.8 Recuperación post-operatoria

Se localiza anexa al área quirúrgica. Atiende a los pacientes que han sido intervenidos quirúrgicamente y que aún se encuentran bajo los efectos de la anestesia. Además, es de acceso semi-restringido. La Figura 2-17 muestra una sala común de recuperación post-operatoria.

La sala de recuperación post-operatoria tiene características similares a las descritas en Hospitalización, tales como cama eléctrica (1), cabecero (2), bombas de infusión (4), equipos

móviles especialmente los de resucitación, vitrinas colgadas (estanterías de vidrio con puertas) en el puesto de control y el armario de medicación ubicado en la zona de limpio de la reanimación post-operatoria. Además, tiene **monitores colgados** (3), soportados sobre bandejas sujetas a las barras portaobjetos, los cuales son necesarios para la medición de constantes del paciente.



1. Cama eléctrica; 2. Cabecero, 3. Monitores; 4. Bombas de infusión

**Figura 2-17.** Recuperación post-operatoria

### 2.1.5.9 Sala de partos

Servicio destinado a prestar una atención integral a la mujer para la labor de parto normal o quirúrgico. De manera similar que los quirófanos, las circulaciones son independientes de las circulaciones generales del hospital. Sin embargo, son de fácil acceso desde las mismas. La Figura 2-18 muestra una sala típica de partos.

La sala de partos tiene características similares al Bloque quirúrgico, obviamente con menores prestaciones en los siguientes elementos: lámpara de techo (1), mesa de partos (3), mesas de instrumental (4) y puerta automática. No obstante, existen otros elementos similares, pero con menor dotación como la **torreta de partos o tomas de instalaciones** (2), las cuales en algunas salas se dispone de una torreta que contiene las tomas eléctricas, conexión de equipotencial (es una pieza donde mediante una rosca puede conectarse el cable de cualquier elemento metálico), de comunicaciones y de gases medicinales. Además, pueden soportar monitores, la cual está sujeta mediante soportes al forjado y colocada cerca de los pies de la mesa de partos; sin arristrar salvo cuando existe una gran altura de falso techo. Cuando no existe torreta, todas las instalaciones están empotradas en las paredes y los monitores se colocan en mesas auxiliares o en bandejas sujetas a barras portaobjetos. En lo que se refiere a la cuna de atención al recién nacido (5) se pueden agrupar dentro del grupo de carros móviles. Finalmente, para los partos



naturales y húmedos, suele disponerse de una bañera de partos (6) ubicada sobre el pavimento de la sala de partos.



1. Lámpara de techo; 2. Torreta de partos o tomas de instalaciones; 3. Mesa de partos; 4. Mesas de instrumental; 5. Cuna de atención del recién nacido; 6. Bañera de partos

**Figura 2-18.** Sala de partos

#### 2.1.5.10 Unidad de diálisis

Unidad especializada, que tiene como finalidad prestar una terapia de apoyo y sustitución parcial renal en forma integral, periódica y constante. La Figura 2-19 ilustra una unidad de diálisis.



1. Camilla/sillón; 2. Cabecero; 3. Equipos de diálisis; 4. Bombas de infusión y soporte de sueros; 5. Zona de almacenamiento; 6. Equipos y mesas móviles

**Figura 2-19.** Unidad de diálisis

La unidad de diálisis tiene características similares en algunos elementos como los descritos en el Hospital de día, se disponen en boxes o en espacios abiertos comunes en los cuales se encuentran los siguientes elementos: cama eléctrica (1), cabecero (2), bombas de infusión y soportes de sueros (4), aparato de TV, equipos y mesas móviles (6), vitrinas colgadas (estanterías de vidrio con puertas), y aparatos sobre repisas.

Los **equipos de diálisis** (3) se sitúan junto a cada cama, caracterizados por tener ruedas y están conectados a la instalación de agua osmotizada, concentrados de ácidos y básicos, desagüe y alimentación eléctrica. En la unidad de diálisis existe una **zona de almacenamiento** (5) con dializadores, repuestos, ropa limpia, productos de limpieza, ropa sucia y residuos, algunos de los almacenes contienen estanterías. La unidad cuenta con una **central de tratamiento de agua osmotizada**, que sirve para la producción de agua y de concentrados ácido y básico, formado por un conjunto de elementos apoyados en el piso, los cuales se encuentran montados sobre bancadas. Además, en algunas ocasiones se encuentran elementos sujetos a las paredes de la sala técnica como filtros de carbón activo, lámparas ultravioletas y cuadro eléctrico.

### 2.1.5.11 Diagnóstico por imágenes

Esta unidad se dedica a la exploración, diagnóstico y tratamiento de los pacientes tanto hospitalizados como ambulatorios. La unidad de imagenología es uno de los servicios más costosos debido a las particularidades de diseño y equipamiento. Habitualmente se ubican en la planta baja del hospital y en algunos casos en el primer sótano, próximos a urgencias y a otros servicios importantes. Muchos de los equipos están **apoyados en el piso** tales como tomografía axial computarizada (TAC), mamógrafo, ortopanto sobre el pavimento o con ruedas como el ecógrafo, como se visualiza en la Figura 2-20.



a) TAC



b) Mamógrafo



c) Ortopanto



d) Ecógrafo

Figura 2-20. Equipos apoyados en el piso

Otros equipos como el telemando disponen de un **anclaje al piso** con una placa fuertemente sujeta al forjado, como se ilustra en la Figura 2-21.



**Figura 2-21.** Equipos con anclaje al piso

En las salas de radiología convencional, los **equipos que se deslizan por carriles** tanto por el piso como falso techo, como se visualiza en la Figura 2-22, suelen desplazarse sobre soportes que se deslizan sobre carriles situados en el pavimento y/o en el falso techo. Los carriles situados al piso están sujetos directamente al forjado inferior y los del falso techo disponen de una estructura metálica sujeta al forjado superior y habitualmente arriostrada. Además, como complemento, en las salas de radiología convencional suele instalarse un bucky mural para hacer radiografías de tórax. El equipo está sujeto a la pared o dispone de un soporte sujeto al forjado.

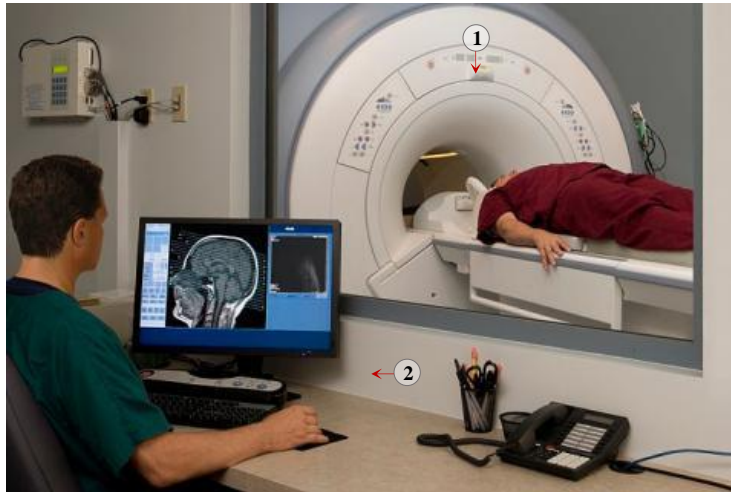


Rayos X

**Figura 2-22.** Equipos que se deslizan

Otro equipo dentro de la unidad de diagnóstico por la imagen es la **Resonancia Magnética Nuclear (RMN)** la cual utiliza un campo magnético. En la Figura 2-23 se muestra una sala de RMN convencional.

En cuanto al **equipo de RMN** (1) la camilla es deslizante y está directamente apoyada sobre el pavimento. La sala de RMN dispone de una **Jaula de Faraday** para evitar interferencias hacia el exterior y hacia el equipo. La Jaula está formada por lámina de cobre o plancha de acero inoxidable. El imán de la RMN dispone de un **tubo de quench**, que es un tubo vacío conectado al imán de la RMN hasta el exterior del hospital, generalmente hacia la planta cubierta. Tiene como objetivo conducir hacia el exterior el helio líquido a muy baja temperatura utilizado en el escáner, cuando se produzca una pérdida inesperada y accidental del líquido refrigerante.



1. Equipo de RMN; 2. Puestos de control de equipos

**Figura 2-23.** Sala de RMN convencional

En los puestos de **control de los equipos** (2) de radiología convencional, TAC y RMN disponen de una consola para mando en el exterior de la sala. Las consolas están directamente apoyadas sobre el pavimento o son de sobremesa. Es de vital importancia las consideraciones en lo que se refiere a carpinterías de ventanas. Las **ventanas de observación** son plomadas, situadas generalmente frente al operador de los equipos los cuales visualizan el interior de las salas de radiología y por medio de **ventana faradizada** con blindaje magnético en la sala RMN.

#### 2.1.5.12 Medicina Nuclear

Los equipos de la zona de Medicina Nuclear están normalmente apoyados directamente sobre el pavimento como tomografía por emisión de positrones y tomografía axial computarizada (PET-TAC), gammacámara tomográfica, tomografía computarizada por emisión fotónica y tomografía axial computarizada (SPECT-TAC) (3) como se muestra en la Figura 2-24.

En las salas de diagnóstico por imagen, existe un **puesto de control de equipos** (1) y **ventanas plomadas** (2). En los **boxes fríos y caliente** de esta unidad se dispone de camillas/sillones, cabeceros con todas las instalaciones incorporadas, equipos móviles y vitrinas colgadas (estanterías de vidrio con puertas) en el control de la unidad. En el **interior de la gammateca** se dispone de unos recipientes plomados y de gran peso para el almacenamiento de productos radioactivos. Los recipientes se encuentran directamente apoyados en el piso. Asimismo, en el interior del laboratorio de preparación de la gammateca se dispone de una cabina de trabajo directamente apoyada en el piso. Los residuos líquidos contaminados de los pacientes con

productos radioactivos se recogen con una tubería independiente y se almacenan en un depósito, durante el período de semidesintegración del producto antes de diluirlo y verterlo a la red normal de saneamiento.



1. Puestos de control de equipos; 2. Ventana plomada; 3. Interior de la sala de tratamiento

**Figura 2-24.** Sala de Medicina Nuclear

### 2.1.5.13 Hemodinámica

Contiene equipamiento de alta tecnología (sistema de fluoroscopia o rayos X). Sirve para estudiar el movimiento de la sangre a través del sistema vascular. La Figura 2-25 ilustra una sala común de Hemodinámica.



1. Mesa de tratamiento; 2. Equipos apoyados; 3. Equipos colgados; 4. Torreta colgada

**Figura 2-25.** Sala de Hemodinámica

La **mesa o camilla de tratamiento** (1) de la sala de angiografía se encuentra simplemente apoyada sobre el pavimento, disponiendo de un freno. En lo referente a la disposición de los equipos del sistema de guiado por rayos X se cuenta con **equipos apoyados** (2) directamente sobre el pavimento y otros **equipos colgados** (3) sobre soportes que se deslizan sobre carriles situados en el falso techo. Los carriles del falso techo disponen de una estructura metálica sujeta al forjado superior y habitualmente arriostrada. También se dispone de una **torreta colgada** (4) que contiene la toma eléctrica, de comunicaciones y de gases medicinales, que puede además soportar monitores y que se encuentra sujeta mediante soportes al forjado. El soporte se suele arriostrar solamente cuando la altura del falso techo es elevada. Las **tomas de instalaciones**, en caso de no existir una torreta, están empotradas en las paredes y los monitores se colocan en mesas auxiliares o en bandejas sujetas a barras portaobjetos. Respecto a las pantallas de visualizaciones se encuentran colgadas mediante soportes independientes al forjado. El soporte de las pantallas no se suele arriostrar.

El **puesto de control** dispone de una consola para mando en el exterior de la sala. La consola está directamente apoyada sobre el pavimento y también pueden ser de sobremesa y la sala dispone de **ventanas plomadas** de protección. El servicio de hemodinámica en la zona de preparación y recuperación dispone de un conjunto de **mesas auxiliares y equipos con ruedas**. Un punto a destacar es que la sala tiene una puerta automática con sistema de apertura eléctrica, que se caracteriza por ser corredera y estanca, desplazándose sobre unos carriles. En la **zona de preparación y recuperación** de los pacientes suele disponerse de un cabecero de instalaciones sujeto a la pared que incorpora el alumbrado y las tomas eléctricas, de la red integrada voz-datos y de gases medicinales. Además, en la zona de limpio del puesto de control de la zona de preparación y recuperación existen **vitrinas colgadas** (estanterías de vidrio con puertas) en pared para albergar medicación y material auxiliar. El sistema de cierre de las puertas de las vitrinas suele ser por imán y las baldas no suelen disponer de reborde.

#### 2.1.5.14 Radioterapia

Tratamiento basado en el empleo de radiaciones de electrones o protones. Unidad especializada para el tratamiento a los pacientes con cáncer. Se sitúa en el interior de un bunker instalado en el exterior o en la última planta sótano. La Figura 2-26 ilustra una sala de radioterapia común.



Figura 2-26. Sala de radioterapia

El **bunker** está apoyado directamente sobre el terreno y formado por paredes y techo de hormigón, muchas veces baritado de gran espesor (espesores muchas veces superior a 1.60 m). De igual manera, la puerta de acceso al laberinto del bunker tiene un gran espesor y por lo general se encuentra rellena de parafina.

Como se ilustra en la Figura 2-26 el interior de la sala de radioterapia se encuentra el **equipo del acelerador lineal** apoyado normalmente sobre el pavimento anclado al forjado. Asimismo, hay armarios verticales en la sala y otros elementos. En la unidad existe un almacén con estanterías robustas para almacenar las máscaras de protección de cada paciente.

En el exterior del bunker se encuentran los puestos de control de los equipos. De tal manera que toda la visión de la sala y del paciente se realiza mediante cámaras de TV. Además, todos los equipos informáticos, monitores y elementos de mando se ubican sobre una mesa de trabajo. Existe en la unidad una **sala de simulación previa a la radiación**, que sirve para la modelización y preparación de las máscaras con un **equipo de radiología** (generalmente un TAC), que se encuentra en el interior de una sala plomada, apoyado en el pavimento y con un puesto de control en el exterior con visión a través de una ventana plomada. En la zona de preparación y recuperación de los pacientes se dispone de equipos móviles tales como un conjunto de mesas auxiliares y equipos con ruedas.

#### *2.1.5.15 Endoscopia*

Es una técnica diagnóstica que permite examinar el interior del estómago. La unidad cuenta con características similares a las descritas anteriormente en lo que respecta a: mesa o camilla, torreta (que contiene las tomas eléctricas, de comunicaciones y de gases medicinales y pueden soportar monitores), equipos y mesas auxiliares móviles y vitrinas colgadas (estanterías de vidrio con puertas) ubicadas en la zona limpia del puesto de control de la zona de preparación y recuperación. Asimismo, en el interior de la sala de endoscopias suelen existir vitrinas colgadas en pared para albergar medicación y material auxiliar. El sistema de cierre de las puertas suele ser por imán y las baldas no suelen disponer de reborde.

**Equipo de endoscopia** está montado sobre ruedas, suele estar situado junto a la camilla. En la zona de lavado y desinfección de la unidad de endoscopias existen unas **lavadoras de los escopios**, directamente apoyados sobre el piso y conectados a las instalaciones de agua, desagüe y electricidad. En la zona de lavado de la unidad se dispone de unos **armarios verticales** directamente apoyados sobre el pavimento para el secado de los escopios.

#### *2.1.5.16 Laboratorio*

Centraliza todas las actividades relacionadas con la recolección, procesamiento y análisis de muestras biológicas del paciente. En la Figura 2-27 se ilustra una unidad típica de laboratorio. Las **pyatas y estanterías**, de las mesas de laboratorios simples, junto a paredes o mesas dobles (centrales), disponen de instalaciones de suministro de agua, gases comprimidos (dióxido de carbono, nitrógeno gas) y vacío, electricidad y de comunicaciones, además de desagüe. Casi todas las **mesas de laboratorio** disponen de estanterías con baldas de pequeña anchura y pantallas de iluminación local; a su vez las mesas disponen de cajones y armarios inferiores. De igual manera, en los diferentes laboratorios se disponen de **cabinas de seguridad** de distintos niveles de bioseguridad, donde se realizan las operaciones que precisan de medidas preventivas para evitar riesgos de contaminación de los operadores o de las muestras. Dichas cabinas están apoyadas en el piso y disponen de conexiones de agua, desagüe, gases comprimidos, electricidad, de comunicaciones y de conductos de extracción que se prolongan hasta la cubierta del edificio.



**Figura 2-27.** Laboratorio

Existen microscopios de simple o múltiple cabezal ubicados sobre las mesas de laboratorios o en mesas auxiliares. Asimismo, en todos los laboratorios existen **neveras y congeladores**, que son frigoríficos de temperatura positiva y congeladores o ultracongeladores de temperatura negativa, donde se conservan muestras y reactivos. Además de las **pequeñas centrifugas** de sobremesa, en los laboratorios existen grandes **ultracentrifugas** ancladas sobre bancada de hormigón instaladas en dependencia aparte (sobre bancadas de hormigón armado). Los laboratorios disponen de **incubadoras de cultivo** montadas sobre mesas con soportes y conectadas al suministro eléctrico de gases comprimidos. Además, se dispone de armarios de seguridad ventilados para almacenar los frascos de líquidos inflamables y de los productos ácidos o bases. Generalmente estos armarios están simplemente apoyados en el pavimento. Los grandes laboratorios disponen de una central donde se lavan y esterilizan todos los materiales utilizados en el laboratorio que no sean de un solo uso. Están formados por **máquinas lava desinfectadoras** con conexión de agua, desagüe, extracción de aire, electricidad y de comunicaciones y con autoclaves de vapor y de baja temperatura con conexión de agua, de vapor (con sistema de producción individual o centralizado), condensadores, desagües, aire comprimido, extracción de aire, electricidad y comunicaciones. Normalmente las lava-desinfectadoras y las autoclaves están simplemente apoyadas en bancadas de hormigón. El material lavado y autoclavado se almacena en estanterías.

Por último, son de vital importancia la **cámara frigorífica** y el **Banco de Sangre**, situados próximos al laboratorio, los cuales disponen de una cámara prefabricada para el almacenamiento y conservación de la sangre y sus componentes, utilizados posteriormente en transfusiones. Muchos laboratorios disponen de Bancos de muestras que consisten en un almacén asociado para conservación frigorífica de muestras, tejidos, tumores, etc. El almacenamiento se realiza en arcones o en recipientes alimentados eléctricamente y con una red de nitrógeno líquido (gas criogénico). Finalmente, algunos laboratorios donde se realiza investigación suelen disponer de un **animalario** preferentemente roedores para ser usados con fines científicos. Las cajas con animales suelen almacenarse en racks ventilados, es decir, puede tener dos tipos de cajas: i) cajas abiertas donde la climatización se realiza solo en la sala donde están los racks; y ii) cajas cerradas totalmente herméticas, donde la climatización es en toda la sala y en particular a cada caja de animales, por este motivo el nombre de rack ventilado.

#### 2.1.5.17 Farmacia

Se ocupa de la recepción, almacenamiento y suministro de medicamentos tanto para los pacientes hospitalizados como ambulatorios y a la formación del personal médico en la prescripción



adecuada, también es el lugar donde se preparan las fórmulas magistrales. La Figura 2-28 ilustra una unidad de farmacia.



1. Estanterías de medicación; 2. Laboratorio de fórmulas magistrales

**Figura 2-28.** Farmacia

Entre los principales elementos de farmacia se encuentran los **carruseles horizontales y verticales de medicamentos**, los mismos que son necesarios para la colocación de los medicamentos para su distribución interna del hospital dispuestos en sus cajas originales o en unidosis.

Por otra parte, en la unidad de farmacia existe un espacio para el **laboratorio de fórmulas magistrales** (2), el cual dispone de mesas de laboratorios simples, junto a paredes o mesas dobles (centrales), con suministros de aguas, desagüe, gases comprimidos y de vacío médico, electricidad e instalaciones de comunicaciones. Además, casi todas las mesas de laboratorio disponen de estanterías con baldas de pequeña anchura y pantallas de iluminación local. Asimismo, las mesas disponen de cajones y armarios inferiores. En la farmacia existe una zona de **cabinas de preparación de productos parenterales y citostáticos**; se caracteriza por ser un ambiente controlado que dispone de cabinas de trabajo, y de seguridad de tipo flujo laminar con recirculación en la propia sala en el caso de parenterales y cabina de seguridad con extracción a cubierta en la sala de preparación de citostáticos. Las cabinas están apoyadas en el piso o encima de una repisa y disponen de conexiones de las diferentes instalaciones.

La unidad cuenta con espacios para almacenar tanto productos inflamables como productos de gran volumen. Respecto al **almacén de productos inflamables** se ubican en una dependencia resistente al fuego, la cual tiene ventilación natural, instalación eléctrica antideflagrante y con un sistema de extinción automática de incendios. Los recipientes de líquidos inflamables se almacenan sobre pallets y en estanterías. En el almacén, otros productos diferentes a medicamentos y productos de gran volumen se guardan en estanterías.

### 2.1.5.18 Central de esterilización

Servicio donde se efectúan las actividades de limpieza, clasificación y autoclavado de material estéril para su uso clínico. La Figura 2-29 presenta una unidad típica de esterilización.



1. Lavadora desinfectadora; 2. Autoclaves de vapor y de baja temperatura

**Figura 2-29.** Central de esterilización

La central de esterilización se caracteriza fundamentalmente por tres elementos. **Lavadoras desinfectadoras** (1) ubicadas en la sala de recepción del instrumental sucio. En primera instancia, el instrumental pasa por una mesa de lavado con ultrasonidos, seguidamente se pasan a las máquinas lavadoras desinfectadoras, las cuales muchas veces son de doble puerta. Es importante destacar que las máquinas disponen de conexión de aguas, desagües, extracción de vapores, electricidad y comunicaciones. Se encuentran únicamente apoyadas en bancadas de hormigón.

Una vez lavado, desinfectado y secado, el instrumental se clasifica en cajas para su posterior autoclavado, junto a tallas textiles y material de un solo uso en las **autoclaves de vapor y los autoclaves de baja temperatura** (2) de doble puerta, de vapor saturado o autoclaves a baja temperatura (peróxido, acético, plasma y algunos países todavía óxido de etileno). Las autoclaves disponen de conexión de aguas de diferentes calidades, de vapor (con sistema de producción individual o centralizado), condensados, desagües a alta temperatura, aire comprimido, extracción de aire, electricidad y comunicaciones. Normalmente se encuentran apoyadas en bancadas de hormigón. Finalmente, el material una vez autoclavado se almacena debidamente protegido en unas cestas colgadas y en unas estanterías, ubicadas en un espacio denominado **almacén de material estéril**.

### 2.1.5.19 Unidad de rehabilitación

Unidad para el tratamiento a pacientes ambulatorios y hospitalizados que requieren de técnicas físicas y sociales para su recuperación. Se ubica preferentemente en la planta baja del hospital. La Figura 2-30 muestra una unidad de rehabilitación típica de un hospital.

Se dispone de **aparatos móviles, aparatos colgados del techo y otros sujetos a las paredes**, como los aparatos de gimnasia y mecanoterapia, situados en la sala de gimnasio, los cuales disponen de espalderas sujetas a paredes, jaulas de estiramientos y aparatos para mecanoterapia. También se dispone de varios **boxes con camillas y pequeños aparatos** de corrientes, termoterapia, sonoterapia, baños de parafina, etc. En la sala de hidroterapia se dispone de **bañeras**

de uso completo o aparatos de baño de extremidades superiores o inferiores. Normalmente las bañeras están simplemente apoyadas en el piso. Además, puede disponerse de duchas de alta presión. Algunos hospitales disponen de piscinas en su servicio de rehabilitación. Las piscinas pueden ser de grandes dimensiones con carriles estrechos y alargados con pasamanos y fondo de profundidad regulable. Las piscinas están empotradas en los forjados. Disponen de conexión de agua con boquillas de impulsión, rebosaderos y tomas de fondo.



**Figura 2-30.** Unidad de rehabilitación

#### 2.1.5.20 Morgue y autopsias

Unidad que sirve para el almacenamiento temporal de los cadáveres y la realización de autopsias. La Figura 2-31 muestra una sala de autopsias.



1. Mesa; 2. Lámpara quirúrgica

**Figura 2-31.** Morgue y autopsias

La **mesa de la sala de autopsias** (1) suele estar sujeta al pavimento y dispone de alimentación de agua, desagüe, aire comprimido y vacío. Además, cuando se realiza autopsias sobre cuerpos con grandes infecciones se dispone de conexión a un sistema de ebullición de los residuos líquidos contaminados.

En la sala de autopsias puede existir una **torreta de instalaciones** que contenga las tomas eléctricas, de comunicaciones, de gas comprimido y vacío, bandejas que pueden soportar bisturís, diferentes aparatos, elementos de grabación de imágenes y sonido y una **lámpara quirúrgica** (2), que está sujeta mediante soportes al forjado. También puede haber soportes para báscula. Los soportes de la torreta, lámpara y otros elementos colgados solamente se suelen arristrar cuando la altura del falso techo es grande. Las tomas de instalaciones, en el caso de no existir torreta, estarán empotradas en las paredes y los aparatos se colocan en mesas auxiliares o en bandejas sujetas a barras portaobjetos. Junto a las salas de autopsias se dispone de **armarios** para almacenar el instrumental utilizado y muestras anatómicas. Generalmente estos armarios están simplemente apoyados en el pavimento. En la morgue se dispone de una **cámara frigorífica** con compartimentos para la conservación de los cadáveres hasta su traslado fuera del hospital.

### 2.1.5.21 Cocina

Unidad de producción de comidas basadas en dietas alimenticias, las cuales se distribuyen para el consumo en áreas específicas del hospital. La Figura 2-32 ilustra una unidad de cocina común.



1. Sartén basculante; 2. Mesas de cocción

**Figura 2-32.** Cocina

En la cocina tradicional existen **numerosos aparatos** (1) de cocción, hornos, marmitas, sartenes basculantes, tren lavavajillas, etc., que se encuentran directamente apoyadas en el piso y con conexiones flexibles a las instalaciones de agua, de combustible gaseoso y desagüe, así como de rejillas lineales y sumideros en el pavimento. Sobre la **zona de cocción** (2) se dispone de campanas de extracción de humos de grandes dimensiones, que se encuentran colgadas con soportes sujetos al forjado normalmente no arristrados. Las campanas incorporan filtros modulares antigrasas, sistema de extinción automático o manual, ventilador de extractor colgado o en bancada y con conducto de extracción de aire hasta la cubierta del edificio. Las campanas pueden construirse totalmente de plancha de acero inoxidable o con bastidores metálicos y zonas vidriadas.

Asimismo, en la cocina se dispone de varias **cámaras frigoríficas** de temperatura positiva para almacenar carnes, pescados, legumbres, lácteos, etc. y una de congelación; generalmente fabricadas con paneles prefabricados. Finalmente, se dispone de **repisas y mesas de trabajo** con pequeños útiles y aparatos, con suministro de aguas fría, caliente y desagüe. También a veces hay estanterías colgadas. Las mesas y repisas muchas veces disponen de cajones y armarios inferiores. Una variante a la cocina tradicional es la cocina con cadena fría que cocina en el propio hospital o en el exterior. Los alimentos una vez cocinados se abaten de temperatura de una manera rápida y se almacenan a baja temperatura. La comida se distribuye a las plantas del hospital con carros especiales.

### 2.1.5.22 Lavandería

Es la unidad responsable del lavado, planchado y reparación de la ropa sucia, para garantizar el bienestar de pacientes y personal del hospital. La Figura 2-33 ilustra una unidad de lavandería típica.



1. Máquinas de lavado; 2. Carros con ruedas

**Figura 2-33.** Lavandería

Aunque cada vez es más habitual que la ropa de los hospitales se lave en lavanderías externas, todavía existen muchos hospitales que disponen de una central de lavandería. Las lavanderías disponen de **máquinas** (1) lavacentrífugas, centrífugas, secadoras, máquinas de planchado y plegado y máquinas especiales de planchado de uniformes. Estas máquinas generalmente están apoyadas sobre el pavimento excepto algunas lavacentrífugas de grandes dimensiones que son montadas sobre bancada de hormigón y con conexiones flexibles de agua fría, caliente, tratada y conexión a desagüe. En grandes lavanderías puede existir una instalación centralizada de vapor saturado o de fluido térmico para alimentación a toda la maquinaria. Se utilizan **carros con ruedas** (2) para el almacenamiento de ropa sucia y ropa limpia y el paso de una etapa a otra del proceso de lavado y planchado. Finalmente, a veces en las lavanderías se disponen de **estanterías** para algún tipo de ropa nueva de repuesto o para los consumibles con baldas sin reborde.

### 2.1.5.23 Residuos

Unidad responsable de la gestión y almacenamiento de los residuos sólidos, según las normas establecidas para el manejo de los residuos no peligrosos (reciclables, biodegradables, etc.) como

los residuos peligrosos o de riesgo biológico. Se utilizan carros con ruedas para el almacenamiento de los residuos asimilables a urbanos y los residuos potencialmente infectados. En los hospitales con gran producción de residuos se dispone de **contenedores compactadores** directamente apoyados al piso. La carga de la **compactadora** puede realizarse de forma manual o a través del sistema neumático de recogida de bolsas de residuos. Los hospitales disponen de **almacenes** cerrados y protegidos para productos especiales como productos radiactivos sólidos y líquidos, citostáticos, punzantes, etc., generalmente almacenados en pequeños recipientes y colocados en estanterías; muchas veces sueltas, con baldas sin rebordes. Algunos hospitales, especialmente el situado fuera o en el extrarradio de las grandes ciudades disponen de **aparatos incineradores** de los residuos. Los incineradores disponen de un quemador con combustible líquido o gaseoso y los de tipo pirolítico con un segundo quemador de los gases de salida de la cámara de combustión. El incinerador está montado sobre una bancada de hormigón con conexión flexible al combustible y a una chimenea.

#### 2.1.5.24 Almacenes

Lugar de acopio en forma ordenada de los combustibles, equipos y materiales, que son necesarios en diferentes unidades del hospital. Tienen acceso directo con el exterior del hospital, con un espacio para las maniobras de descarga de los productos. Se usa frecuentemente el almacenamiento en pallets, colocados en estanterías de gran altura. También existen productos sueltos colocados directamente en las estanterías. Las estanterías, salvo las de gran altura, no suelen estar arriostradas y no disponen de rebordes en las baldas. En la actualidad, los almacenes de los hospitales cada vez son más robotizados.

#### 2.1.5.25 Mantenimiento

Unidad responsable de ofrecer los servicios de conservación de las instalaciones, los equipos y mobiliario del hospital, para su correcta funcionalidad. Se ubica por lo general contiguo a la sala de máquinas y al almacén general. En el taller de mantenimiento existen repisas, mesas de trabajo con pequeños útiles y aparatos, además con suministro de agua fría, caliente y desagüe. Las mesas y repisas muchas veces disponen de cajones y armarios inferiores. Asimismo, en los almacenes del servicio de mantenimiento se usa frecuentemente el almacenamiento en estanterías. Las estanterías no suelen estar arriostradas y no disponen de rebordes en las baldas.

#### 2.1.5.26 Zonas administrativas

Zonas repartidas en casi todas las unidades del hospital que permiten el funcionamiento y gestión del mismo. En todas las áreas administrativas del hospital existen mesas de trabajo con sillas con ruedas. Además, en todo puesto de trabajo tanto administrativo como facultativo del hospital se disponen de ordenadores personales con la respectiva unidad, pantalla y teclado en forma compacta o suelta, así como de impresoras y escáneres. Finalmente, en cada despacho administrativo la documentación se guarda en armarios o archivadores directamente apoyados en el piso.

#### 2.1.5.27 Archivo de historias clínicas

Dado que cada vez se están usando más las historias clínicas informatizadas, los departamentos de historias clínicas se están convirtiendo en una oficina con ordenadores. Muchos hospitales todavía conservan historias clínicas en papel, actuales o antiguas a efectos clínicos o de

investigación. Se emplean muchas veces armarios compactos desplazables sobre rieles en el piso de manera manual o motorizada. Por lo general, las historias clínicas se archivan en estanterías con baldas sin reborde.

#### 2.1.5.28 Enseñanza

En las aulas de docencia y en el salón de actos del hospital se dispone de pantallas colgadas de grandes dimensiones, de video proyectores montados sobre repisas sujetas al forjado. Además, algunos hospitales disponen de una buena biblioteca para los facultativos. Muchas veces los libros y publicaciones periódicas se almacenan en armarios compactos desplazables sobre rieles en piso de manera manual o motorizada. Muchas veces los libros se guardan en estanterías sueltas con baldas sin reborde.

#### 2.1.5.29 Gases medicinales

Comprende las instalaciones de los diversos gases medicinales y vacío usados con los pacientes, laboratorios y otras áreas del hospital. Los **depósitos de oxígeno líquido o de oxígeno y nitrógeno líquido** para producir aire comprimido por mezcla están situados en el exterior del hospital, en un recinto vallado, sobre una bancada de hormigón. Los pies de los depósitos se anclan y sujetan a la bancada y la unión de la salida del evaporador no es siempre flexible. La Figura 2-34 muestra una planta típica de los depósitos.



a) Planta de depósitos



b) Detalle de conexiones

**Figura 2-34.** Depósitos de oxígeno líquido y nitrógeno líquido

En el interior del edificio o en el exterior estarán situadas las **baterías de botellas de reserva** de oxígeno, aire comprimido respirable, protóxido de nitrógeno (para anestesia) y del dióxido de carbono CO<sub>2</sub> (para operaciones laparoscópicas, incubadoras, etc.).

Las botellas de los diferentes gases se encuentran conectadas a unos colectores con conexiones flexibles que su vez se conectan a los cuadros de inversión automáticas y normativamente deben estar sujetas individualmente con cadenas a la pared. Sin embargo, las botellas llenas de repuesto y las botellas para transporte de pacientes y de gases especiales no siempre están sujetas. La unión

de las tuberías a los diferentes circuitos del hospital se realiza con tuberías rígidas. La Figura 2-35 muestra una sala de las baterías de botellas.



Figura 2-35. Baterías de botellas de reserva

En la central de producción de las bombas de vacío, se encuentran instaladas en una dependencia exclusiva a este uso denominada **sala de bombas de vacío**, montada sobre bancada de hormigón con capas de aislamiento antivibratorio o directamente apoyadas a la solera. Habitualmente disponen de silentblocks en los puntos de apoyo. En la misma sala se coloca el depósito tampón, filtros antibacterias y frasco de recogida de secreciones. La Figura 2-36 muestra una sala de bombas de vacío.



Figura 2-36. Sala de bombas de vacío

En el caso que la producción del aire comprimido respirable y neumático se realice mediante una planta de compresión, los compresores suelen estar instalados en una dependencia exclusiva a este uso denominada **sala compresores de aire**, montados sobre bancada de hormigón con capas de aislamientos antivibratorios o directamente apoyados a la solera. Habitualmente disponen de silentblocks en los puntos de apoyo. En la misma sala se coloca el depósito de acumulación de



aire, el separador, el refrigerador y los filtros directamente apoyados sobre la solera. La **distribución de gases medicinales y de vacío** puede ser horizontal y/o vertical. Pueden tener derivaciones a ambos lados, se emplean tuberías de cobre no arsenical con soldadura de pequeño o mediano tamaño. Las tuberías se sujetan con soportes al forjado mediante varillas. Cada tubo dispone de una abrazadera con junta de goma. Los soportes no suelen arriostrarse, por lo general, no existen dilatadores en el paso de las tuberías por una junta de dilatación.

Las **tomas de los diferentes gases o de vacío** están montadas en las torretas de los cirujanos y anestesiistas de los quirófanos, en las columnas y pontas de los boxes de unidad de cuidados intensivos (UCI) y neonatos, en los cabeceros de las camas de las unidades de enfermería, boxes de urgencias y del hospital de día, o directamente a la pared. En cada puesto de control de cada unidad del hospital se colocará un cuadro con alarmas ópticas y acústicas de caída de presión de alguno de los circuitos.

Finalmente, en algunos hospitales se dispone de un depósito de gases criogénico de nitrógeno líquido o de CO<sub>2</sub> líquido, necesarios para alimentar los bancos de conservación de muestras, tejidos, embriones, etc. Los depósitos están situados en el exterior del hospital, en un recinto vallado, sobre una bancada de hormigón. Los pies del depósito se anclan y sujetan a la bancada. La unión a la tubería aislada de suministro de líquido criogénico no siempre es flexible.

### **2.1.6 Relación funcional entre instalaciones y equipamiento médico**

Con el objetivo de entender los aspectos fundamentales de la función de los hospitales, a continuación, se presenta en la Tabla 2-1 la interrelación funcional y física entre componentes y sistemas no estructurales y los servicios médicos de una infraestructura hospitalaria. Estas relaciones funcionales (directa, indirecta y no existe relación) representan la integración entre la categoría de instalaciones y equipamiento médico. Esta información es necesaria para alcanzar uno de los objetivos específicos de la investigación (comprender la importancia y la función de los edificios hospitalarios).



## 2.2 Aspectos básicos de ingeniería sísmica para edificios

Con la finalidad de proporcionar una explicación general de conceptos empleados en el desarrollo de la presente investigación, este apartado presenta una breve descripción de los movimientos sísmicos, seguido de aspectos básicos de diseño sismorresistente de edificios, para finalmente presentar una revisión de literatura.

### 2.2.1 Movimientos sísmicos

Este subapartado describe conceptos básicos de sismología e ingeniería sísmica empleados en la investigación, basados en documentación tanto de libros y códigos, como de la página web del Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS [Kramer, 1996; PAHO, 2000a; NCSE 02, 2002; Bozorgnia and Bertero, 2004; CEN, 2004; Kumar, 2008; Chopra, 2012; Day, 2012; Guevara, 2012; ASCE, 2016; USGS, 2017].

#### 2.2.1.1 Generación y propagación de terremotos

Los terremotos se generan principalmente por el movimiento relativo entre las placas tectónicas. Además, existen otras fuentes que producen actividad sísmica como: volcanes, explosiones subterráneas, explosiones nucleares, colapso de minas, fractura hidráulica u otros cambios repentinos de los estados tensionales de la corteza terrestre.

Los principales tipos de interacción entre los bordes de las placas tectónicas (mecanismos focales) se describen a continuación. **Falla normal** (normal fault) se originan por esfuerzos de tensión en la placa. **Falla inversa** (reverse fault) se originan por esfuerzos de compresión en la placa. **Falla transcurсивa** (strike-slip fault) son fracturas verticales (o casi verticales) en las cuales los segmentos de placa se mueven horizontalmente. La

Figura 2-37 muestra los tipos de falla.

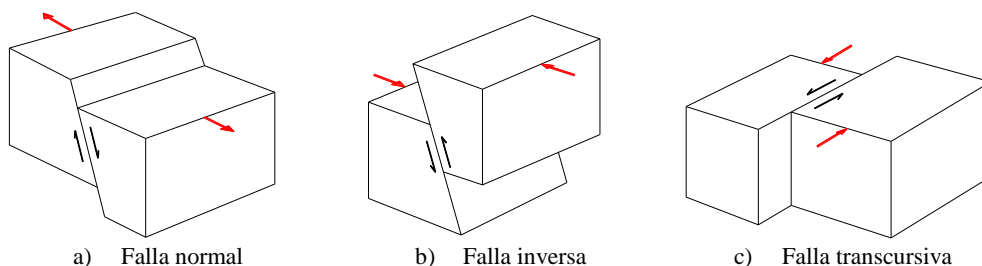


Figura 2-37. Mecanismos focales [Adaptado de Kramer, 1996]

La Figura 2-38 muestra algunos términos sísmicos comúnmente usados. **Hipocentro** (foco), es el punto en el interior de la tierra donde comienza el proceso de ruptura que da origen a un terremoto. **Epicentro** es la proyección del hipocentro en la superficie del suelo.

Existen diferentes parámetros de distancia utilizados para caracterizar la distancia entre un sitio y la fuente sísmica. Las siguientes distancias son las más relevantes:  $R_{epi}$  distancia epicentral,  $R_{hypo}$

distancia hipocentral (focal),  $R_{rup}$  distancia de ruptura (más cercana) es perpendicular al plano de falla.

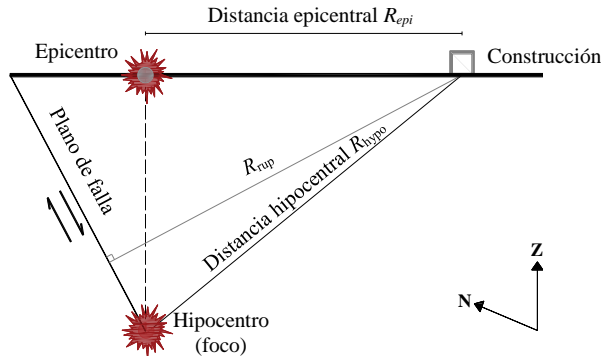


Figura 2-38. Definición de términos sísmicos [Adaptado de USGS, 2017]

Así, la propagación del movimiento sísmico se produce a través de dos tipos de ondas, a saber: las ondas internas (o de cuerpo) y las ondas superficiales. Las ondas de cuerpo viajan a través de la corteza terrestre, siguen caminos curvos debido a la variada densidad y composición del interior de la tierra. Son divididas en dos grupos: **ondas primarias P** o de compresión, y **secundarias S** o de corte. La Figura 2-39 ilustra las ondas internas.

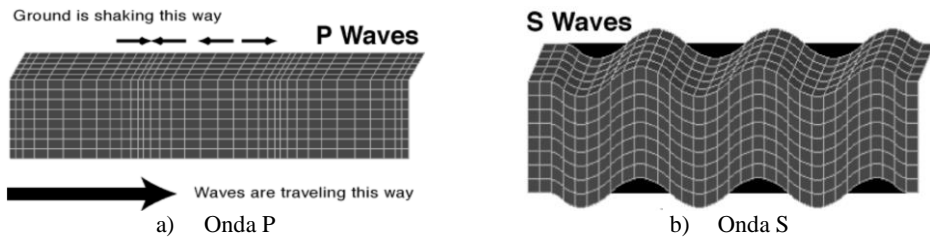


Figura 2-39. Ondas internas [USGS, 2017]

Las ondas superficiales se propagan aproximadamente paralelas a la superficie de la tierra. Son conocidas como ondas **Rayleigh** similares a las olas del océano con órbitas elípticas retrogradadas verticales y ondas **Love** con desplazamientos horizontales. La Figura 2-40 ilustra las ondas superficiales.

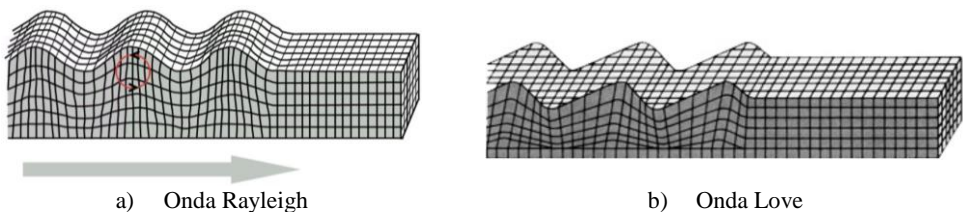


Figura 2-40. Ondas superficiales [USGS, 2017]

### 2.2.1.2 Cuantificación de la sismicidad

Este subapartado describe conceptos que son empleados en los siguientes capítulos.

**Intensidad** es una descripción cualitativa del tamaño de un evento sísmico, se representa en números romanos (I – XII). Describe los efectos de un terremoto en términos de daños observados y las reacciones humanas en el lugar del evento. Existen varias escalas, siendo la escala de Intensidad Modificada de Mercalli (MMI) la más habitual. Al ser un parámetro subjetivo, que depende del observador, no es un parámetro que pueda ser usado en diseño sismorresistente.

**Magnitud** es un parámetro global (cuantitativo) que hace referencia a la energía liberada durante un terremoto. Existen varias escalas, pero las más utilizadas son: magnitud local ( $M_L$ ), comúnmente conocida como “escala de Richter”, magnitud de ondas de superficie ( $M_S$ ) y magnitud de momento ( $M_W$ ). Las magnitudes se basan en una escala logarítmica (base 10). La magnitud de momento no está delimitada, pero no se ha registrado eventos sísmicos mayores a 9.5 (Chile en 1960 registró  $M_W$  9.5).

**Período de retorno**, expresa la severidad de los terremotos en un determinado lugar, como el promedio del tiempo transcurrido entre terremotos con la misma magnitud. Generalmente, se determinan a partir de un análisis de la peligrosidad sísmica del sitio de emplazamiento de la estructura o a partir de un mapa de peligro sísmico. En el escenario de la norma de cada país se considera básicamente el sismo de diseño, el cual está asociado a un evento con un período de retorno, típicamente de 475 años, que tiene una probabilidad del 10% de ser excedido en 50 años; y el sismo máximo, sismo máximo probable o sismo máximo considerado, que tiene período de retorno mayor. Por ejemplo 2475 años, que tiene una probabilidad del 2% de ser excedido en 50 años. Otro ejemplo, del sismo máximo probable es Chile, que tiene el 10% de probabilidad de excedencia en 100 años, es decir, considera un período de retorno de 1000 años, aproximadamente.

Para caracterizar la acción sísmica se consideran **acelerogramas**, los cuales contienen las aceleraciones de suelo registradas instrumentalmente durante un terremoto. A partir de los registros de aceleración, se pueden determinar historias de velocidad y desplazamiento. Es importante acotar que los valores máximos pueden ser muy relevantes para la caracterización de los registros de movimiento fuerte.

Complementariamente, se hace referencia a los conceptos de **Intensidad de Arias**  $I_A$  [Arias, 1970]; “Pulso”, que se refiere al contenido de pulsos en los registros de velocidad (efectos de proximidad de falla o de directividad); y la **duración significativa**, que corresponde al intervalo entre el desarrollo del 5 y el 95% de la intensidad de Arias [Trifunac and Brady, 1975]. La Figura 2-41 muestra un acelerograma de un caso de estudio.

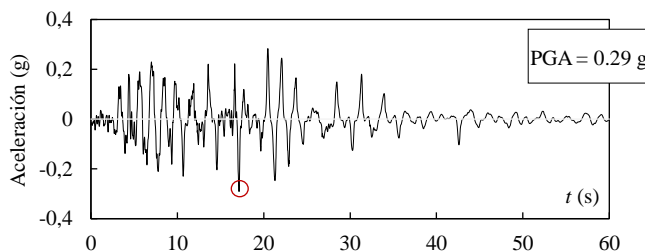


Figura 2-41. Acelerograma

**Espectro de diseño**, en términos generales, los espectros de diseño caracterizan el efecto de los terremotos según el tipo de suelo, el amortiguamiento del sistema (convencionalmente asumido igual al 5%) y el período (dependiente de la masa y rigidez) del sistema estructural. Comúnmente, se determinan suavizando, promediando o envolviendo los espectros de respuesta de múltiples

eventos sísmicos [Kramer, 1996]. Además, los países ubicados en zonas con alto peligro sísmico poseen normas de diseño sismorresistente de obligado cumplimiento. La Figura 2-42 muestra el espectro de diseño del Eurocode 8 [CEN, 2004].

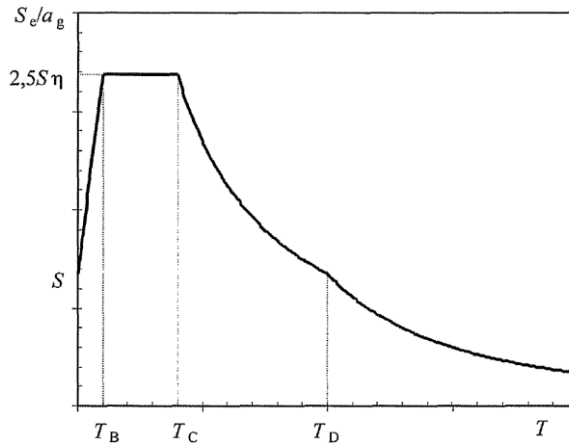


Figura 2-42. Espectro de diseño. Eurocode 8 [CEN, 2004]

**Espectro de respuesta**, describe la respuesta máxima de un oscilador de un grado de libertad (SDOF, siglas en inglés para Single-Degree-of-Freedom) a un movimiento de entrada particular en función de la frecuencia natural (o período natural) y la razón de amortiguamiento del SDOF [Kramer, 1996]. Son gráficos que contienen, en sus ejes horizontales, el período natural del SDOF. En los ejes verticales magnitudes relevantes para el diseño, principalmente, aceleración, desplazamiento o velocidad. La Figura 2-43 muestra un ejemplo de espectros de un caso de estudio.

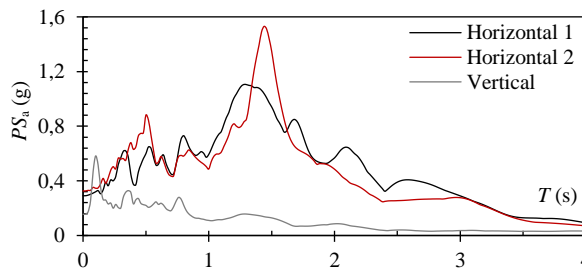


Figura 2-43. Espectro de pseudo-aceleración

Los espectros considerados en el presente estudio corresponden a: i) *espectro de aceleración* ( $S_a$ ), que representa la aceleración absoluta máxima de un SDOF determinado en forma exacta; ii) *espectro de pseudo-aceleración* ( $PS_a$ ), que representa la aceleración absoluta máxima de un SDOF determinado en forma aproximada y que típicamente se utiliza para estimar las fuerzas estáticas equivalentes (ficticias) que generan el mismo desplazamiento relativo máximo que el acelerograma real. La demanda sísmica determinada de esta manera puede ser utilizada para la evaluación de daños en elementos estructurales y no estructurales [Priestley et al., 2007].

El **período fundamental** de una estructura,  $T_1$ , corresponde al intervalo de tiempo requerido para completar un ciclo de oscilación en vibraciones libres (se mide en segundos). El período fundamental depende de los parámetros de masa y rigidez (los edificios rígidos y ligeros tienen períodos bajos o cortos, mientras que los edificios flexibles y pesados tienen períodos altos o

largos), además depende de la altura del edificio. Así, en edificios con muros o arriostrados, el período es relativamente bajo. Por el contrario, en edificios diseñados para regiones no sísmicas, el período es más largo. Los códigos de diseño incluyen expresiones empíricas que permiten efectuar estimaciones del período fundamental del edificio; a estos efectos, se calcula de acuerdo al estándar ASCE/SEI 7-16 [ASCE, 2016]:

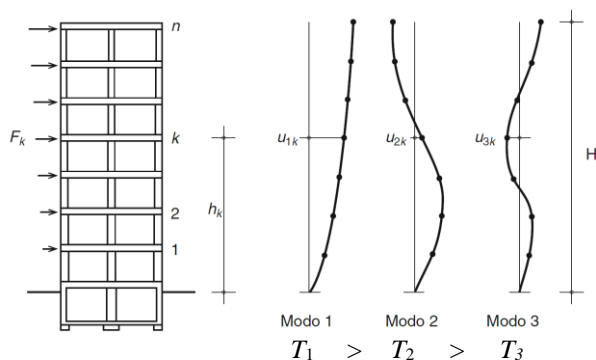
$$T_1 = C_t h_n^x \tag{2-1}$$

donde,  $h_n$  es la altura de la estructura y los coeficientes  $C_t$  y  $x$  se determinan a partir de la Tabla 2-2 (se mencionan solo los datos empleados).

**Tabla 2-2.** Valores de los coeficientes para calcular el periodo fundamental [ASCE, 2016]

| Sistema estructural                         | $C_t$  | $x$  |
|---|--------|------|
| Pórticos de hormigón resistentes a momentos | 0.0466 | 0.90 |
| Otros sistemas estructurales                | 0.0488 | 0.75 |

Así, cuando el edificio vibra, el movimiento se convierte en la combinación o superposición de varios “modos de vibración” (es la forma en la que vibra un cuerpo y se encuentra asociado a una respectiva frecuencia natural). Un edificio de varias plantas puede presentar varios modos de vibración. El primer modo de vibración es el de mayor período (período fundamental). La Figura 2-44 ilustra los primeros modos de vibración de un edificio.



**Figura 2-44.** Primeros modos de vibración de un edificio [NCSE-02, 2002]

### 2.2.1.3 Influencia del tipo de suelo

Comúnmente, el suelo se clasifica de acuerdo con la velocidad media ponderada de las ondas de corte ( $S$ ) en los primeros 30 m de profundidad. La Ec. (2-2) muestra la estimación.

$$V_{S,30} = \frac{30}{\sum_i h_i / v_i} \tag{2-2}$$

siendo,  $h_i$  y  $v_i$  el espesor (en m) y la velocidad de propagación de la onda de corte (en m/s) del  $i$ -ésimo estrato.

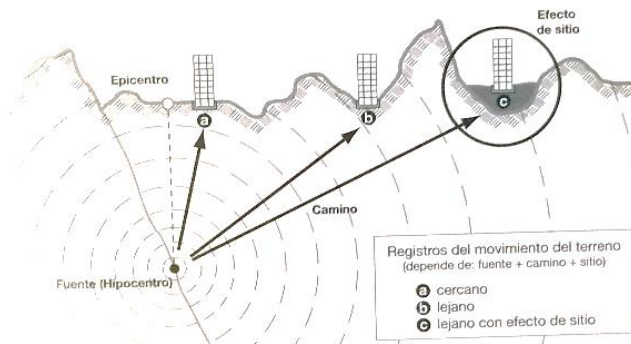
La Tabla 2-3 muestra la clasificación del tipo de suelo empleada en esta investigación, de acuerdo a la clasificación propuesta en ASCE/SEI 7-16 [2016].

**Tabla 2-3.** Clasificación del suelo ASCE 7-16 [2016]

| Tipo de suelo  | $V_{S,30}$         |
|--|--------------------|
| A. Roca dura (Hard rock)   | > 1524 m/s         |
| B. Roca (Rock)   | 762 m/s a 1524 m/s |
| C. Suelo muy denso y roca blanda (Very dense soil and soft rock) | 366 m/s a 762 m/s  |
| D. Suelo rígido (Stiff soil)                                     | 183 m/s a 366 m/s  |
| E. Suelo arcilloso suave (Soft clay soil)                        | < 183 m/s          |

Por otro lado, entre los principales efectos de un terremoto, que dependen de las características del suelo en el sitio, se encuentran: i) efecto de sitio; ii) licuefacción; iii) desplazamiento del terreno; y iv) deslizamientos de tierra.

Al pasar la onda sísmica a través de un depósito de suelos se producen cambios en las características del movimiento, como se muestra en la Figura 2-45. Por ejemplo, al llegar la onda sísmica a un suelo blando, se afecta la aceleración y el contenido de frecuencias del sismo (por ejemplo, lo que ocurre con la sismicidad de México, que se encuentra sobre suelo blando y las ondas sísmicas de periodo largo se amplifican).



**Figura 2-45.** Respuesta del suelo [Guevara, 2012]

Para caracterizar el efecto de la distancia entre el epicentro y el sitio donde se está estimando el movimiento del suelo (estación sismológica) se consideran leyes de atenuación propias del lugar y del mecanismo focal. Las leyes de atenuación son relaciones empíricas que determinan la variación de los parámetros considerados para la caracterización del sismo, básicamente en relación a la magnitud del sismo y la distancia del sitio a la fuente. La Ec. (2-3) corresponde a la ley de atenuación para Chile para sismos interplaca  $M_w \geq 6.5$  [Contreras y Boroschek, 2015]. El sismo interplaca es producto del contacto sismogénico entre las placas (por ejemplo, placa de Nazca y la Sudamericana). También se conocen como terremotos de subducción del tipo “thrust”.

$$\log_{10}(Y) = C_1 + C_2 M_w + C_3 H + C_4 R - g \log_{10}(R) + C_5 Z \tag{2-3}$$

donde  $Y$  es la aceleración horizontal máxima del suelo (PGA) o la aceleración horizontal espectral ( $S_a$ ) considerando el 5% de amortiguamiento;  $M_w$  es la magnitud de momento;  $H$  es la profundidad focal en kilómetros;  $R = \sqrt{R_{rup}^2 + \Delta^2}$  con  $R_{rup}$  la distancia más cercana al área de ruptura en kilómetros; y  $\Delta$  un término que modela la saturación de las aceleraciones en sitios cercanos a la



fuente, dado por  $\Delta = C_6 10^{C_7 M_w}$ . El coeficiente  $g$  es la dispersión geométrica de las ondas sísmicas, está dado por  $g = C_8 + C_9 M_w$ ;  $Z = 0$  para sitios en roca y  $Z = 1$  para sitios en suelo. La Tabla 2-4 presenta los coeficientes de cada una de las regresiones y la desviación estándar en base logarítmica tanto para PGA como para períodos específicos.

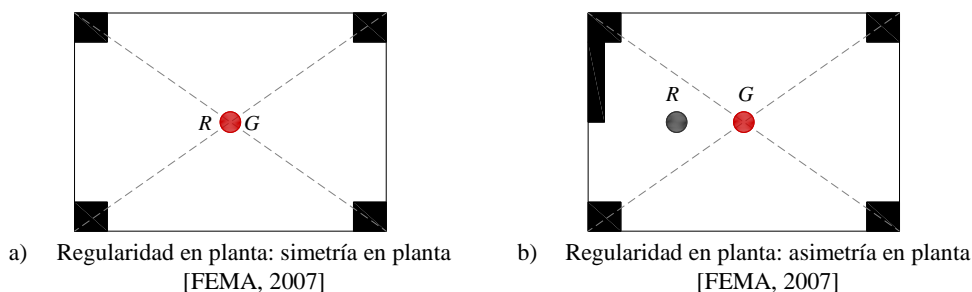
**Tabla 2-4.** Constantes de la regresión para sismos interplaca  $M_w \geq 6.5$  [Contreras y Boroschek, 2015]

| T (s) | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> | C <sub>5</sub> | C <sub>6</sub> | C <sub>7</sub> | C <sub>8</sub> | C <sub>9</sub> | $\sigma$ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------|
| PGA   | -1.8559        | 0.2549         | 0.0111         | -0.0013        | 0.3061         | 0.0734         | 0.3552         | 1.5149         | -0.103         | 0.2137   |
| 0.04  | -1.7342        | 0.2567         | 0.0111         | -0.0016        | 0.2865         | 0.0734         | 0.3552         | 1.5149         | -0.103         | 0.2311   |
| 0.10  | -1.4240        | 0.2597         | 0.0081         | -0.0019        | 0.2766         | 0.0734         | 0.3552         | 1.5149         | -0.103         | 0.2557   |
| 0.20  | -1.0028        | 0.2375         | 0.0023         | -0.0014        | 0.2699         | 0.0734         | 0.3552         | 1.5149         | -0.103         | 0.2469   |
| 0.40  | -1.4161        | 0.2568         | 0.0049         | -0.0008        | 0.3150         | 0.0734         | 0.3552         | 1.5149         | -0.103         | 0.2414   |
| 1.00  | -3.3352        | 0.4013         | 0.0186         | -0.0010        | 0.2839         | 0.0734         | 0.3552         | 1.5149         | -0.103         | 0.2351   |
| 2.00  | -3.9051        | 0.4079         | 0.0215         | -0.0008        | 0.2057         | 0.0734         | 0.3552         | 1.5149         | -0.103         | 0.2592   |

### 2.2.2 Proyecto sismorresistente de edificios

A continuación, se discuten los principales criterios conceptuales para un proyecto sismorresistente. Los siguientes comentarios generales surgen de los siguientes estudios [Bazán y Meli, 2002; Charleson, 2008; CEN, 2004; FEMA, 2007; Guevara, 2009; Guevara, 2012].

La **regularidad en planta** corresponde a la simetría física y mecánica, es decir, a la minimización de la excentricidad entre los centros de gravedad ( $G$ ) y de rigidez ( $R$ ); la **regularidad en alzado** representa la uniformidad a lo largo de la altura del edificio, es decir, la ausencia de cambios bruscos de rigidez o masa entre plantas consecutivas que puedan generar concentración de daños (regularidad no siempre significa igualdad). Las dos características siguientes tienen significados similares (aunque distintos): la **configuración irregular** (habitualmente en planta) señala el riesgo de patologías debidas a la ausencia de efecto diafragma rígido (cualquier forjado de construcción con una configuración de planta razonablemente compacta se comporta como un diafragma rígido), y la **planta baja blanda** es un caso particular (especialmente peligroso) de falta de uniformidad en altura. Las **columnas cortas** (short column) responden a muros de relleno de albañilería que no cubren la totalidad de la altura, y el **riesgo de impacto** (pounding risk) corresponde normalmente a juntas sísmicas de espesor insuficiente. Para su mayor comprensión refiérase a la Figura 2-46.



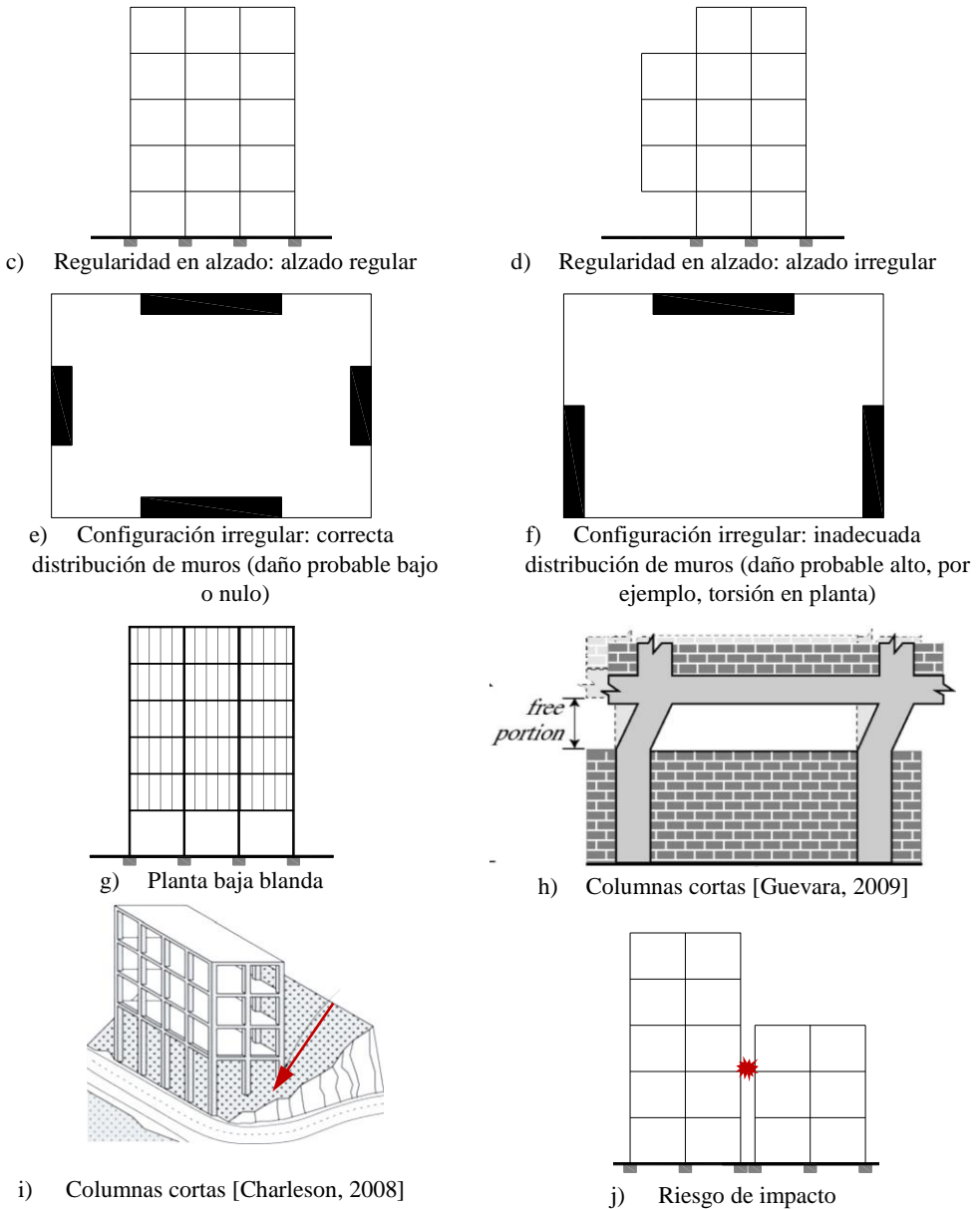


Figura 2-46. Criterios conceptuales de proyecto sismorresistente de edificios.

### 2.2.3 Revisión de literatura

Este subapartado presenta una revisión crítica de la literatura técnica sobre evaluación rápida de vulnerabilidad sísmica de edificios en general, y de hospitales en particular, para obtener un “índice de seguridad hospitalario”, en otras palabras, estimar el daño probable que experimentará dicha edificación ante un determinado evento sísmico. Los documentos discutidos corresponden a metodologías existentes para “Evaluación Visual Rápida” (Rapid Visual Screening RVS). La

metodología RVS es un procedimiento de evaluación cualitativa utilizado ampliamente en la detección de la vulnerabilidad sísmica de edificios. El método sirve para identificar estructuras potencialmente peligrosas en un tiempo relativamente corto, sin los altos costos de los análisis sísmicos detallados en edificios individuales. Los subapartados 2.2.3.1 y 2.2.3.2 describen los principales documentos relacionados a este tipo de metodologías. Se toma en consideración aquellas metodologías que de alguna u otra forma consideran el análisis o importancia de los elementos no estructurales, tanto para evaluación rápida de edificios en general como de evaluación específica de hospitales. Finalmente, en el subapartado 2.2.3.3 se discuten algunos documentos sobre las fragilidades sísmicas empleadas en este estudio.

### 2.2.3.1 Metodologías de evaluación rápida de edificios en general

Los primeros intentos para caracterizar la vulnerabilidad sísmica de los edificios se realizaron a principios de la década de 1980 en Estados Unidos, Europa (especialmente en países de alta sismicidad como Italia y Grecia) y Japón, entre otros países. En este subapartado se informan las investigaciones que más han influido en este trabajo tales como:

#### 2.2.3.1.1 Método Italiano del Índice de Vulnerabilidad IVIM (Italian Vulnerability Index Method)

El método tiene sus inicios a partir de 1976 y en 1982 es presentado para su aplicabilidad. Ha sido adoptado oficialmente por el “Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti” (GNDT), ente gubernamental italiano. En este método, se asigna un “índice de vulnerabilidad” ( $I_v$ ) a cada edificio (estudio enfocado a estructuras tanto de mampostería no reforzada como estructuras de hormigón armado) [Benedetti and Petrini, 1984; GNDT, 1993; Yépez, 1996; Giovinazzi, 2005].

La evaluación consiste en una inspección visual para completar unos formularios que cuentan con instrucciones detalladas, con el objetivo de identificar el sistema estructural primario del edificio, en consecuencia, identificar las principales deficiencias sísmicas. Es un método, basado en datos de daños correspondientes a varias zonas sísmicas de Italia que básicamente agrupa ciertas clases de estructuras con configuraciones y patrones de carga similares, determinando de esta manera que dichas edificaciones experimentarían daños semejantes cuando sean sometidas a un determinado evento sísmico.

Se caracteriza por incluir once parámetros tales como: i) organización del sistema estructural; ii) calidad del sistema estructural; iii) resistencia convencional; iv) muros de contención y cimientos; v) diafragmas horizontales; vi) configuración en planta; vii) configuración en elevación; viii) separación máxima entre columnas; ix) tipo de cubierta; x) elementos no estructurales; y xi) estado de conservación del edificio.

El índice de vulnerabilidad  $I_v$  se obtiene como la suma ponderada de cada uno de los factores de vulnerabilidad  $K_i$  con su respectivo peso  $W_i$  (los valores  $W_i$  son valores subjetivos y han sido propuestos en base a la experiencia de los autores). En otras palabras, en el caso de estructuras de mampostería no reforzada para cada uno de los parámetros (de los 11) se asigna una de las cuatro “clases de calificación de la vulnerabilidad”  $K_i$  (A = mejor condición, D = peor condición). A cada una de las “clases de clasificación de la vulnerabilidad” le corresponde un valor numérico  $K_i$  que varía entre 0 y 45. Asimismo, dicha clase es afectada por un coeficiente de peso  $W_i$ , que varía entre 0.25 y 1.5. El peso representa la importancia de cada uno de los parámetros dentro del sistema resistente del edificio. La Tabla 2-5 muestra los parámetros, los puntajes y pesos correspondientes, mientras que la Ec. (2-4) muestra la estimación del índice de vulnerabilidad  $I_v$ .

**Tabla 2-5.** Escala numérica del Índice de vulnerabilidad de [Benedetti y Petrini, 1984]

|    | Parámetros                           | Clases de calificación $K_i$ |    |    |    | Peso  |
|----|--------------------------------------|------------------------------|----|----|----|-------|
|    |                                      | A                            | B  | C  | D  | $W_i$ |
| 1  | Organización del sistema estructural | 0                            | 5  | 20 | 45 | 1.00  |
| 2  | Calidad del sistema estructural      | 0                            | 5  | 25 | 45 | 0.25  |
| 3  | Resistencia convencional             | 0                            | 5  | 25 | 45 | 1.50  |
| 4  | Muros de contención y cimientos      | 0                            | 5  | 25 | 45 | 0.75  |
| 5  | Diafragmas horizontales              | 0                            | 5  | 15 | 45 | 1.00  |
| 6  | Configuración en planta              | 0                            | 5  | 25 | 45 | 0.50  |
| 7  | Configuración en elevación           | 0                            | 5  | 25 | 45 | 1.00  |
| 8  | Separación máxima entre columnas     | 0                            | 5  | 25 | 45 | 0.25  |
| 9  | Tipo de cubierta                     | 0                            | 15 | 25 | 45 | 1.00  |
| 10 | Elementos no estructurales           | 0                            | 0  | 25 | 45 | 0.25  |
| 11 | Estado de conservación               | 0                            | 5  | 25 | 45 | 1.00  |

La Ec. (2-4) se utiliza para determinar el índice de vulnerabilidad.

$$I_v = \sum_{i=1}^{11} K_i \times W_i \tag{2-4}$$

donde  $K_i$  es la “clase de calificación de la vulnerabilidad” y  $W_i$  es el peso ponderado de cada parámetro considerado en la evaluación.

El valor del  $I_v$  varía de 0 a 382.5 pero eventualmente se puede normalizar de 0 a 100, siendo 0 la mejor condición de vulnerabilidad y 100 la peor condición de vulnerabilidad.

Finalmente, para un valor dado del índice de vulnerabilidad existe una curva que correlaciona la relación de daño (relación entre el costo de reparación y el costo de reconstrucción) con la demanda sísmica (intensidad o PGA) mediante una función de vulnerabilidad (describen la probabilidad de pérdidas como: sociales o económicas, dado un nivel de movimiento del suelo). Es decir, los datos derivados de terremotos anteriores se utilizan para calibrar las funciones de vulnerabilidad en relación con el índice de vulnerabilidad  $I_v$  y el factor de daño de edificios (misma tipología estructural y misma intensidad o PGA).

*2.2.3.1.2 Método de detección visual rápida de edificios para detectar posibles riesgos sísmicos FEMA 154 (Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards)*

Esta metodología fue planteada en el año 2015 tanto en la versión de manual de FEMA 154 como en el documento de soporte FEMA 155. Ambos documentos fueron actualizados en una tercera edición (primera edición 1988 y segunda edición 2002). Los principales documentos (o de mayor uso) se originan a finales de los años 80 en Estados Unidos por el Consejo de Tecnología Aplicada (ATC) bajo contrato con la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias FEMA [FEMA, 2015].

FEMA 154 es una metodología basada en un enfoque de “encuesta en la acera” (sidewalk survey); consiste en la observación visual del edificio desde el exterior, y cuando sea posible desde el interior. El método ha sido diseñado para evaluar cinco regiones de sismicidad (baja, moderada, moderadamente alta, alta y muy alta) los cuales varían sólo en los valores asignados a las “puntuaciones básicas” y “modificadores de puntuaciones”. Dichos formularios comprenden:

1. *Identificación del riesgo estructural básico* (sistema principal de resistencia a la fuerza sísmica) y materiales de construcción.
2. *Asignación de un “puntaje básico”*. Relaciona la probabilidad del colapso del edificio para un determinado intervalo de recurrencia del terremoto.
3. *Asignación de “modificadores de puntuación”*. Considera el efecto del número de plantas, tipo de suelo, irregularidades verticales y en planta, y pre-codificación o el código de referencia posterior. Es decir, se relacionan con defectos sísmicos significativos que el evaluador puede observar.

Las “puntuaciones básicas” y los “modificadores de puntuación” se calculan determinando la probabilidad de colapso, posteriormente convirtiéndola en una puntuación ( $S$ ). La probabilidad de colapso se calcula usando una versión modificada de la metodología OSHPD HAZUS (Oficina Estatal de Planificación y Desarrollo de la Salud de California OSHPD, HAZUS significa Hazards de Estados Unidos). En otras palabras, utilizan cálculos analíticos y curvas de fragilidad de HAZUS.

La vulnerabilidad sísmica es determinada mediante una suma  $S$  del puntaje de identificación del riesgo estructural básico (ofrece 17 sistemas constructivos), más el valor del puntaje básico, finalmente la puntuación que poseen los modificadores de puntuación (considera irregularidades en planta y elevación, código de construcción, tipo de suelo y número de plantas). Dependiendo del valor  $S$ , se realiza la siguiente encuesta más detallada. Los puntajes finales generalmente varían de 0 a 7, con puntajes más altos corresponde a un mejor desempeño sísmico esperado y un menor puntaje ( $\leq 2$ ) significa que existe una alta probabilidad de colapso de la estructura. La aplicación del procedimiento entrega como resultado dos tipos de clasificación de edificios: (1) aquellos aceptables como un riesgo para la seguridad de la vida; o (2) aquellos que pueden ser sísmicamente peligrosos y deben analizarse con más detalle. Sin embargo, esta metodología, presta poca importancia a los elementos no estructurales.

#### 2.2.3.1.3 *Método de evaluación del comportamiento sísmico de los edificios de hormigón armado existentes en Japón (Seismic Evaluation of Existing Reinforced Concrete Buildings)*

Esta metodología fue publicada en 1977, seguida de revisiones en 1990 y 2001 (en japonés). En 2001 una versión en inglés y actualizada en 2005. El método del “índice sísmico japonés” dispone de tres procedimientos de “evaluación rápida” con un mayor nivel de fiabilidad para estimar el rendimiento sísmico de un edificio, tales como: i) inspección del emplazamiento; ii) cálculo estructural para representar el desempeño sísmico de un edificio en términos de “índice sísmico estructural”  $I_S$ ; y iii) “índice sísmico de elementos no estructurales”  $I_N$  [JBDPA, 2005].

El “índice sísmico estructural”,  $I_S$ , se calcula con la siguiente Ec. (2-5).

$$I_S = E_0 * S_D * T \quad (2-5)$$

donde  $E_0$  es el índice sísmico básico de la estructura; se calcula para cada planta y para cada dirección en función de la resistencia final, el mecanismo de falla y la ductilidad del edificio;  $S_D$  es el índice de irregularidad, que cuantifica los efectos de la complejidad de la forma y la distribución del desequilibrio de rigidez; y  $T$  es el índice de tiempo, que depende del deterioro de la estructura. Para el cálculo de cada valor existen procedimientos ingenieriles.

El “índice sísmico de elementos no estructurales”  $I_N$ , se enfoca en el análisis de la caída o el desprendimiento de elementos no estructurales, especialmente paredes exteriores. Existen tres

procedimientos para establecer el índice (para cada muro de mampostería en cada planta). Todos los valores de las ecuaciones se seleccionan de acuerdo a tablas establecidas. La Ec. (2-6) corresponde al procedimiento de detección de primer nivel.

$$I_N = 1 - B \cdot H \quad (2-6)$$

donde  $B$  es el índice de construcción, que se obtiene de la combinación del índice de conformidad (ductilidad de los elementos estructurales y no estructurales) y el índice de deterioro (envejecimiento y daños pasados);  $H$  es el índice de riesgo humano, y corresponde a la condición de uso debajo de la pared externa y la existencia de protección como aleros, retranqueos, etc.

La Ec. (2-7) corresponde al procedimiento de detección de segundo nivel.

$$I_N = 1 - \frac{\sum_j B_j \cdot W_j \cdot H_j \cdot L_j}{\sum_j L_j} \quad (2-7)$$

donde  $B_j$  y  $H_j$  al igual que en la detección de primer nivel, corresponden al índice de construcción e índice de riesgo humano, con la diferencia que son procedimientos más completos;  $W_j$  representa el índice de área; y  $L_j$  longitud de la pared (en la porción de la unidad).

El procedimiento de detección de tercer nivel es similar al segundo nivel. No obstante, el índice de construcción es más completo.

Para la determinación del índice de seguridad sísmica del edificio se considera el resultado del análisis basado en las evaluaciones sísmicas realizadas por separado sobre la estructura y los elementos no estructurales, como se muestra en la Ec.(2-8).

$$I_S \geq I_{SO} \quad (2-8)$$

donde  $I_S$  es el índice sísmico estructural;  $I_{SO}$  es el índice de demanda de estructura sísmica (proporciona fórmulas para su cálculo, comprende demanda sísmica, zonificación sísmica, condiciones geológicas y uso del edificio). De este modo, si la Ec. (2-8) está satisfecha, el edificio puede ser evaluado como “Seguro”. De lo contrario, el edificio debe ser evaluado como “Incierto” en términos de su seguridad sísmica. No obstante, esta metodología no hace referencia a la seguridad sísmica de los componentes no estructurales del edificio.

#### 2.2.3.1.4 Método del Consejo Nacional de Investigación de Canadá (National Research Council of Canada)

Este método se basa en gran parte en el documento ATC-21 “Inspección visual rápida de edificios para detectar posibles riesgos sísmicos”, publicado en 1988 por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias FEMA. El procedimiento ATC-21 es similar a FEMA 154, sin embargo, considera factores adicionales. Entre las principales adaptaciones del documento ATC-21 se tiene: i) sismicidad canadiense; ii) inspección tanto exterior como interior (ATC-21 consideraba únicamente exterior); y iii) el sistema de puntuación incluye riesgos estructurales como no estructurales. Además, incorpora la importancia de los edificios (determinado por el uso y la ocupación). La información de cada edificio se recoge en un formulario estándar. Las puntuaciones son usadas para clasificar todos los edificios para una evaluación sísmica detallada entre baja, media y alta prioridad, es decir, detección de los edificios que requieren mayor consideración para ser rehabilitados [Rainer et al., 1993].

El método considera elementos no estructurales tanto exteriores como interiores. En elementos exteriores, tales como: i) revestimiento exterior y vidrio de ventanas; y ii) parapetos, cornisas,

ornamentaciones, entre otros. En elementos interiores, tales como: a) tabiques no estructurales; b) equipos mecánicos y eléctricos; y c) depósitos de agua de almacenamiento y recipientes a presión.

El puntaje final, denominado “índice de prioridad sísmica” (*SPI*), considera índice estructural *SI* (relacionado a posibles daños de la estructura) y como índice no estructural *NSI* (relacionado con el daño de componentes no estructurales, mencionados anteriormente). El índice estructural (*SI*) se basa en los siguientes factores: *A* sismicidad; *B* condiciones del suelo; *C* tipo de estructura; *D* irregularidades (comportamiento estructural); y *E* importancia de la construcción, como se muestra en la Ec. (2-9).

$$SI = A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \quad (2-9)$$

El índice de elementos no estructurales (*NSI*) considera tres factores: *B* condiciones suelo; *E* importancia de la construcción; y *F* riesgos de caída (seguridad de la vida) o peligro para operaciones vitales en post-desastre. El riesgo del daño no estructural aumenta para edificios con características como planta débil (torsión) o aquellos que se han deteriorado. La Ec. (2-10) muestra su proceso de estimación:

$$NSI = B \cdot E \cdot F \quad (2-10)$$

El puntaje final del (*SPI*) se obtiene sumando ambos índices *SI* y *NSI*, como se muestra en la Ec. (2-11).

$$SPI = SI + NSI \quad (2-11)$$

#### 2.2.3.1.5 Evaluación de la vulnerabilidad sísmica no estructural en edificios de escuelas (*Seismic Nonstructural Vulnerability Assessment in School Buildings*)

Esta metodología se enfoca únicamente en la propuesta de un índice no estructural y ha sido propuesta por [De angelis y Pecce, 2015] y sigue las directrices presentadas en las principales metodologías en [FEMA 154; Lang et al., 2009; WHO/PAHO, 2015].

El formulario de vulnerabilidad no estructural propuesto comprende 48 preguntas divididas en las siguientes ocho categorías: i) mampostería pesada y particiones; ii) recubrimientos exteriores; iii) falso techo; iv) apéndices externos; v) ventanas, puertas y acristalamientos; vi) cubierta; vii) sistemas eléctricos, mecánicos e hidráulicos; y viii) mobiliario y contenido.

La evaluación de la metodología propuesta se basa en tres componentes: la categoría del componente no estructural; la pregunta y la respuesta a la pregunta. Esto produce un índice numérico de vulnerabilidad llamado  $I_{NST}$ . Además, para los tres componentes, se ha establecido un nivel de importancia. Así, para cada pregunta hay tres posibles respuestas: vulnerabilidad baja, media y vulnerabilidad alta. Dichas vulnerabilidades, están asociadas con un valor numérico llamado índice de unidad (UI), que corresponden a 0, 2 y 4, para vulnerabilidad baja, media y alta, respectivamente. Finalmente, se propone una calibración de las categorías por ponderación mediante funciones de fragilidad para obtener un índice de vulnerabilidad. Además, la metodología es aplicada a un estudio de casos de edificios escolares en Italia.

#### 2.2.3.2 Metodologías de evaluación rápida de edificios hospitalarios

En contraste con las metodologías antes mencionadas de evaluación rápida de edificios en general, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización Panamericana de la Salud (OPS) han desarrollado a lo largo de los años procedimientos de detección para establecimientos

de salud dentro de su programa de “Hospitales Seguros”, el cual consiste en una Campaña Mundial de Reducción de Desastres 2008 - 2009, cuyo lema es *Hospitales seguros frente a los desastres*: se centra en las catástrofes naturales y los daños que éstas pueden provocar, en particular, a los hospitales. La Estrategia Internacional de las Naciones Unidas para la Reducción de Desastres (EIRD), el Banco Mundial y la Organización Mundial de la Salud (OMS) han participado conjuntamente en esta campaña. En este sentido, la OMS continuamente está dando a conocer la necesidad de proteger a los hospitales, centros de salud rurales y otros centros sanitarios de los efectos de los desastres naturales, para que éstos sean más resistentes y funcionales [UNISDR y OMS, 2009]. A continuación, se describen las principales metodologías específicas de evaluación rápida de edificios hospitalarios.

#### 2.2.3.2.1 Método del Índice de Seguridad Hospitalaria (*Hospital Safety Index*)

Es una metodología propuesta por la Organización Panamericana de la Salud (OPS), ampliamente usada, la misma que se ha adoptado e implementado por muchos países. Dicho documento originalmente fue desarrollado por la OPS (Organización Panamericana de la Salud) y la OMS publicado en 2008 [WHO/PAHO, 2015]. La metodología es una herramienta de evaluaciones rápidas de hospitales, que además proporciona directrices para la gestión de riesgos de emergencia y desastres, con un enfoque en prevención, mitigación y preparación para la respuesta y recuperación de emergencia.

La metodología considera dos formularios de evaluación: i) información general del hospital; y ii) lista de verificación, para hacer un diagnóstico preliminar de la seguridad y la capacidad del hospital con el objetivo de proporcionar servicios en caso de emergencias y desastres. El formulario 2 se subdivide en, Módulo I: Peligros que afectan la seguridad del hospital y el papel del hospital en la gestión de emergencias y desastres, y Módulo II: i) seguridad estructural; ii) seguridad no estructural; y iii) seguridad funcional.

Como se menciona a continuación, los cuatro módulos de la lista de verificación comprenden:

**Módulo I. Peligros** que afectan la seguridad del hospital y el papel del hospital en la gestión de emergencias y desastres. Describe de forma general y rápida los peligros de localización del hospital (propiedades geotécnicas, riesgo biológico, incluido riesgos provocados por el hombre, etc.).

**Módulo II: Seguridad estructural** (comprende 18 variables), tales como, eventos anteriores, riesgos que afectan la seguridad estructural y la integridad del edificio. Seguridad estructural implica el tipo de sistema estructural y materiales, evidentemente dicho módulo resume las principales características de un proyecto sismorresistente (simetría en planta, irregularidad en elevación, integridad estructural de cubiertas, entre otras). **Seguridad no estructural** (comprende 93 variables), considera a los componentes no estructurales que son críticos para el funcionamiento del hospital. Los componentes no estructurales son agrupados en cuatro submódulos: i) seguridad arquitectónica, tanto exterior como interior; ii) protección de infraestructura, acceso y seguridad física, tales como, ubicación de los servicios y equipos críticos del hospital en relación con los peligros locales, salidas de emergencia y rutas de evacuación, entre otros; iii) sistemas críticos, por ejemplo, electricidad, suministro de agua, gestión de residuos, protección contra incendios; y iv) equipos y suministros, ya sean fijos o móviles, suministros utilizados para análisis y tratamiento, entre otros. **Seguridad funcional** (comprende 40 variables), además, hace referencia a un “plan de contingencia” ante la emergencia.

La metodología se basa en un cuestionario con 151 variables, cada una de las cuales tiene tres niveles de vulnerabilidad: bajo, medio y alto. Para determinar el “índice de seguridad” cada submódulo tiene su propia ponderación según su importancia para la seguridad general del



hospital correspondiente a cada módulo. La suma de los valores ponderados de los submódulos es el resultado de 100% del módulo analizado. De esta manera, se puede distinguir los resultados para identificar aquellas áreas del hospital que requieren una atención inmediata. Por un lado, los valores ponderados del 50% es para el módulo de seguridad estructural, 30% para el módulo no estructural y 20% para el módulo funcional, para países o regiones que poseen una alta probabilidad de terremotos o vientos fuertes. Por otro lado, para países con menor riesgo de probabilidad de terremotos o vientos fuertes, los tres módulos analizados se ponderan por igual, es decir, cada módulo se pondera con un valor del 33,3% al cálculo del índice de seguridad.

La suma de los resultados ponderados de los tres módulos (de acuerdo a la especificado en el párrafo anterior) proporciona una calificación de seguridad hospitalaria expresada como la probabilidad (porcentaje) de que una instalación pueda mantener la función ante una emergencia o desastre natural. El índice de seguridad tiene un valor máximo de 1 (uno) y un mínimo de 0 (cero). La Tabla 2-6 muestra un resumen de recomendaciones generales.

**Tabla 2-6.** Resumen de recomendaciones de acuerdo al “índice de seguridad” [WHO/PAHO, 2015]

| Índice de seguridad | Clasificación | Recomendación general   |
|---------------------|---------------|---|
| 0.00 - 0.35         | C             | Se necesitan medidas de intervención urgentes   |
| 0.36 - 0.65         | B             | Se necesitan medidas de intervención a corto plazo  |
| 0.66 - 1.00         | A             | Es probable que el hospital funcione ante emergencias y desastres. No obstante, se recomienda continuar las medidas para mejorar la capacidad de gestión de emergencias y desastres |

#### 2.2.3.2.2 Método de detección rápida para hospitales y escuelas

Método basado en los documentos de [FEMA, 2015; PAHO, 2000a, b; WHO, 2002; WHO, 2007; PAHO/WHO, 2008]. Esta metodología aborda la vulnerabilidad sísmica estructural y no estructural por separado. Es importante resaltar que cuando el hospital tiene varios bloques, el cuestionario se debe realizar a cada bloque individual (sobre todo en la evaluación de la vulnerabilidad estructural). Los cuestionarios solo cubren la vulnerabilidad sísmica, es decir, el comportamiento y la operación de elementos estructurales y no estructurales del edificio en caso de una emergencia sísmica. El formulario de evaluación consta de tres secciones, que abordan: i) información general; ii) vulnerabilidad estructural; y iii) vulnerabilidad no estructural [Lang et al., 2009].

El **índice de vulnerabilidad estructural (SVI)** se genera teniendo en cuenta las principales características de diseño, así como la antigüedad del edificio y su estado de conservación, denominados factores de modificación y consta de 15 preguntas. El **índice de vulnerabilidad no estructural (NVI)** cubre todo tipo de componentes no estructurales (instalaciones, elementos arquitectónicos, equipos móviles, etc.) y su efecto en la función de los edificios (salidas de emergencia y rutas de escape, y estructura secundaria). Consta de 40 preguntas dentro de 10 categorías.

Cada pregunta del cuestionario tiene un cierto “nivel y factor de importancia”, valores obtenidos en FEMA 154 y por juicio de expertos. La respuesta de cada pregunta del cuestionario se realiza ingresando el número “1” en “sí”, “no” o “NA” (no aplica; no es considerado en el cálculo del índice de vulnerabilidad). En otras palabras, depende de su influencia en el conjunto de la vulnerabilidad del edificio. El cálculo de cualquiera de los dos índices de vulnerabilidad SVI o NVI, se efectúa básicamente dividiendo la suma de factores de importancia (ponderación) recopilados por el número de preguntas respondidas.

Para determinar el  $SVI^*$  (modificado), se combina el  $SVI$  por el factor de edad (age factor  $AF$ ) y el factor de estado real (actual state factors  $ASF$ ). Dado que ambos factores tienen un gran impacto en su vulnerabilidad, se considera ambas características por factores separados (refiérase a la Ec. (2-12).

$$SVI^* = SVI \cdot AF \cdot ASF \tag{2-12}$$

La Tabla 2-7 enumera los valores decididos para ambos factores ( $AF$  y  $ASF$ ) y el aumento porcentual del factor de vulnerabilidad estructural  $SVI$ .

**Tabla 2-7.** Valores sugeridos para el factor de edad  $AF$  y el factor de estado real  $ASF$  y el aumento porcentual del índice de vulnerabilidad estructural  $SVI$  [Lang et al., 2010]

|     |         |              | Estado actual                    |   |  |                                       |
|-----|---------|--------------|----------------------------------|---|--|---------------------------------------|
|     |         |              | Bueno<br>(nuevo)<br>$ASF = 1.00$ | Mejorado<br>recientemente<br>$ASF = 1.05$ | Necesita<br>intervención<br>$ASF = 1.10$ | Malo<br>(deteriorado)<br>$ASF = 1.20$ |
| Año | < 10    | $AF = 1.000$ | 0.0 %                            | 5.0 %                                     | 10.0 %                                   | 20 %                                  |
|     | 10 - 20 | $AF = 1.025$ | 2.5 %                            | 7.6 %                                     | 12.8 %                                   | 23 %                                  |
|     | 20 - 40 | $AF = 1.050$ | 5.0 %                            | 10.3 %                                    | 15.5 %                                   | 26 %                                  |
|     | > 40    | $AF = 1.100$ | 10 %                             | 15.5 %                                    | 21.0 %                                   | 32 %                                  |

Por otro lado, el índice de vulnerabilidad no estructural  $NVI$ , se presenta por medio de un diagrama de gráfico circular: verde (menos del 33%), amarillo (33 - 66%) y rojo (más del 66%) para cada categoría, permitiendo una mejor visualización de las diferentes características no estructurales y sus respectivas vulnerabilidades.

2.2.3.2.3 *Método de detección visual rápida para la evaluación sísmica de los edificios de hospitales de hormigón armado (Rapid visual screening for seismic evaluation of RC hospital buildings)*

La metodología propone evaluar un índice de seguridad para edificios hospitalarios. Se basa principalmente en la metodología presentada por la Organización Mundial de la Salud, en el documento Índice de Seguridad Hospitalaria “Hospital Safety Index” [PAHO/WHO, 2008]. Los cambios realizados fueron para mejorar el índice propuesto en el contexto italiano. Consta de 86 preguntas repartidas en: i) índice estructural (20 preguntas); ii) índice no estructural (34 preguntas); y iii) índice organizacional (32 preguntas) [Perrone et al., 2015].

La definición de riesgo sísmico (seismic risk) comprende: vulnerabilidad (VULN), exposición (EXP) y peligro (HAZ). Para la evaluación de la vulnerabilidad toma en cuenta los elementos estructurales, componentes no estructurales, así como los aspectos organizativos. Los pesos considerados en la metodología han sido calibrados a partir de datos de daños observados en terremotos anteriores y juicio de expertos. La metodología ha sido aplicada a casos reales y los resultados se comparan con un índice similar obtenido mediante análisis de pushover. Además, para la validación, esta propuesta ha sido aplicada a hospitales que han presentado algún tipo de daño en eventos sísmicos pasados.

La evaluación de seguridad se obtiene calculando seis índices, de los cuales, tres índices se denominan “índices primarios” (Primary Index) y se evalúan utilizando las tres secciones (elementos estructurales  $I_{STR}$ ; componentes no estructurales  $I_{NSTR}$ ; aspectos organizativos  $I_{ORG}$ ), como se muestra en la Ec. (2-13).

$$I_{Primary} = \frac{\sum Unit\_Risk\_Index}{\sum Unit\_Risk\_Index\_Hig} \quad (2-13)$$

donde *Unit\_Risk\_Index* representa los puntajes de cada pregunta para cada nivel de riesgo, mientras que *Unit\_Risk\_Index\_Hig* son los puntajes correspondientes asignados al riesgo más alto. Dicho valor se encuentra normalizado entre 0 y 1. A continuación se explican los niveles de vulnerabilidad considerados.

|       |                                    |
|-------|------------------------------------|
| Baja  | $I_{PRIMARIO} < 0.33$              |
| Media | $0.33 \leq I_{PRIMARIO} \leq 0.67$ |
| Alta  | $I_{PRIMARIO} > 0.67$              |

La combinación del índice primario produce dos índices adicionales relacionados con la funcionalidad (FUNC) y la vulnerabilidad del edificio (VULN).

Finalmente, para obtener el índice de seguridad se combina vulnerabilidad (VULN), exposición (EXP) y peligro (HAZ). Los puntajes asignados en exposición y peligro son resultado de una serie de análisis, como se muestra en la Ec. (2-14).

$$SI = VULN \cdot \frac{HAZ}{1.67} \cdot \frac{EXP}{1.25} \quad (2-14)$$

### 2.2.3.3 Fragilidades sísmicas

Este subapartado presenta una revisión crítica de la literatura técnica sobre curvas de fragilidad sísmica empleadas en el estudio, dado su interés en el tema en consideración.

- **[Retamales et al., 2008]**. Este documento se titula “New Experimental Capabilities and Loading Protocols for Seismic Qualification and Fragility Assessment of Nonstructural Systems”. Presenta la evaluación experimental del desempeño sísmico de una sala de emergencias de un hospital a escala real sometida a movimientos de piso que captura, por primera vez en un entorno de laboratorio, y en tiempo real, las interacciones dinámicas entre elementos arquitectónicos, mecánicos y médicos.
- **[Eidinger, 2009]**. Este documento se titula “Fragility of Non-structural Components for FEMA Benefit Cost Analysis”. Este informe proporciona funciones de fragilidades sísmicas para componentes no estructurales que se encuentran en instalaciones industriales, comerciales, gubernamentales y residenciales. Los valores de las curvas de fragilidad son obtenidos a partir de resultados experimentales, considerando registros asociados a un supuesto terremoto cortical  $M_w$  6.5 a 7.2 en California.
- **[Ruiz-García y Negrete, 2009]**. Este artículo se titula “Drift-based fragility assessment of confined masonry walls in seismic zones”. Presenta curvas de fragilidad basadas en derivas de entrepiso, desarrolladas para muros de mampostería confinada (CM), a partir de resultados experimentales obtenidos del ensayo de 118 muestras de muros de mampostería.
- **[FEMA, 2012b]**. FEMA P-58 es el principal documento en la investigación, se titula “Seismic Performance Assessment of Buildings”, incluye una amplia recopilación de datos de curvas de fragilidad, costos de reparación y tiempos de reparación (consecuencias) asociados con cada estado de daño para sistemas estructurales y no estructurales más comunes. Además, este documento se complementa con el desarrollo de una herramienta electrónica (PACT) que permite efectuar la evaluación del

desempeño sísmico de una estructura, en términos probabilísticos, y efectúa el análisis de pérdidas económicas.

- [FEMA, 2012c]. Este documento de la reconocida metodología HAZUS propone curvas de fragilidad para elementos estructurales y no estructurales. Con respecto a los sistemas estructurales, las fragilidades sísmicas propuestas dependen del tipo de estructura (se consideran dieciséis tipologías principales), además, presenta curvas de fragilidad específicas para líneas vitales. La demanda se establece en términos de desplazamiento espectral. Para los componentes no estructurales, se agrupan en dos amplias categorías: sensibles a la deriva y sensibles a la aceleración de piso, las curvas de fragilidad dependen también del tipo de estructura resistente. Tanto para los elementos estructurales como no estructurales, considera el nivel de diseño sísmico para código alto, código moderado y código bajo.
- [Kaynia et al., 2013]. Este proyecto se titula “Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructures Safety Gain”. Incluye curvas de fragilidad sísmica apropiadas para edificios, líneas de vida, infraestructuras de transporte e instalaciones críticas.
- [Retamales et al., 2013]. Este artículo se titula “Experimental Seismic Fragility of Cold-Formed Steel Framed Gypsum Partition Walls”. Presenta los resultados de un programa experimental de la evaluación de las respuestas sísmicas, los mecanismos de falla y la fragilidad de las paredes de yeso con marco de acero conformado en frío. Se realizaron pruebas cuasiestáticas y dinámicas en el plano en 36 paredes divisorias construidas utilizando detalles de construcción comunes.
- [Shi et al., 2014]. Este artículo se titula “Disorder and damage of base-isolated medical facilities when subjected to near-fault and long-period ground motions”. Presenta los resultados de una serie de pruebas en mesa vibradora a gran escala para un hospital de base aislada y base fija de cuatro plantas. La sala de operaciones se adecuó con varios dispositivos médicos de la manera más realista posible. Se adoptaron dos tipos de sismos: sismos cercanos a la falla y sismos de período largo, y las respuestas de los dispositivos médicos se registraron utilizando la técnica de captura de movimiento mediante video.
- [Cardone y Perrone, 2015]. Este artículo se titula “Developing fragility curves and loss functions for masonry infill walls”. Resume los resultados de pruebas experimentales de marcos de hormigón armado y acero con rellenos de mampostería, con el fin de desarrollar funciones de fragilidad que permitan la estimación de daños en componentes no estructurales típicos.
- [Soroushian et al., 2015]. Este artículo se titula “Analytical Seismic Fragility Analyses of Fire Sprinkler Piping Systems with Threaded Joints”. Presenta una metodología de modelado analítico para sistemas de tuberías de rociadores contra incendios y se utiliza para generar parámetros de fragilidad sísmica de dichos sistemas. El modelo analítico tiene en cuenta los componentes del comportamiento inelástico del sistema, que incluyen: juntas roscadas, tirantes sólidos, perchas y dispositivos de sujeción.
- [Nikfar y Dimitrios, 2016]. Este artículo se titula “Shake table investigation on the seismic performance of hospital equipment supported on wheels/casters”. Este artículo presenta una investigación experimental sobre la respuesta sísmica de equipos médicos apoyados sobre ruedas. Se ensayaron dos equipos: una máquina de ultrasonido soportado en ruedas (traseras) y ruedas gemelas (delanteras) y un carro hospitalario ligero compatible con cuatro ruedas gemelas; el carro lleva un oxímetro de pulso en la bandeja superior y un desfibrilador en la bandeja central. Las señales de entrada para las pruebas de la mesa vibradora incluyeron movimientos de piso de un hospital con estructura de acero de cuatro plantas diseñado para satisfacer los requisitos sísmicos

de un sitio en el área de Los Ángeles. Los resultados de 96 pruebas informadas en este estudio incluyen el desempeño sísmico del equipo en condiciones de las ruedas desbloqueadas y bloqueadas, ubicados en varios niveles a lo alto del edificio.

- **[Di Sarno et al., 2018].** Este artículo se titula “Seismic Vulnerability Evaluation of Typical Hospital Cabinets by Shake Table Testing”. Se analizan los resultados más relevantes de las recientes pruebas de mesa en estanterías de vidrio en hospitales. Las estanterías de doble y simple puerta de vidrio han sido probadas con diferentes condiciones de contenido en su interior.
- **[Fiorino et al., 2019].** Artículo denominado “Evaluation of seismic dynamic behaviour of drywall partitions, façades and ceilings through shake table testing”. Presenta los resultados de las pruebas dinámicas en mesa vibradora realizadas en prototipos hechos de particiones interiores, fachadas exteriores y falsos techos continuos suspendidos. Se investigó la influencia en la respuesta sísmica de los prototipos a partir de soluciones antisísmicas básicas y mejoradas, correspondiente al uso de conexiones fijas o deslizantes en el perímetro de las paredes y falsos techos.

### 3 FORMULACIÓN PROPUESTA PARA ANTICIPAR DAÑOS SÍSMICOS

La vulnerabilidad sísmica de componentes y sistemas no estructurales ha demostrado durante terremotos pasados ser la causa principal para que la infraestructura hospitalaria pierda su capacidad de función ante una catástrofe natural. Las metodologías para evaluación visual rápida actuales no son suficientes para estimar el posible daño de componentes y sistemas no estructurales en infraestructuras hospitalarias, y evaluar su impacto en la pérdida de capacidad de operación, y consecuentemente, desarrollar medidas efectivas de mitigación.

Para abordar estas limitaciones, como se describe en la introducción Capítulo 1, subapartado 1.1.1, los componentes y sistemas no estructurales se clasifican, para su respectiva evaluación, en cuatro categorías: i) elementos arquitectónicos; ii) instalaciones; iii) equipamiento médico; y iv) contenidos. El apartado 3.1 describe las principales características de los principales equipos médicos. El apartado 3.2 presenta una descripción detallada de gradación del daño. Asimismo, identifica las principales vulnerabilidades sísmicas tanto para la estructura como no estructura. En el apartado 3.3 se propone formulaciones para la estimación de la sollicitación sísmica tanto para la demanda de deriva de entrepiso como para la estimación de aceleraciones máxima de piso. En el último apartado 3.4 se describe la metodología propuesta para la predicción del daño. En otras palabras, se presenta el análisis de fragilidad sísmica

- 3 FORMULACIÓN PROPUESTA PARA ANTICIPAR DAÑOS SÍSMICOS
- 3.1 Análisis de componentes y sistemas no estructurales
- 3.2 Gradación del daño
- 3.3 Cuantificación de la sollicitación sísmica
- 3.4 Evaluación del daño probable

requerido para anticipar el daño sísmico de acuerdo a la demanda sísmica estimada.

### 3.1 Análisis de componentes y sistemas no estructurales de edificios hospitalarios

Este apartado presenta los principales elementos que forman parte del equipo médico con sus características generales. El objetivo es asignar curvas de fragilidad sísmica con la mayor similitud posible, debido a la poca y/o nula existencia de curvas de fragilidad sísmica específicas para equipos médicos. La clasificación de los equipos médicos se efectúa de acuerdo al apartado 2.1 y se encuentran agrupados bajo características similares, puntualmente en su geometría, peso en operación, sistema de fijación tanto en el piso, paredes o sistema estructural del forjado, entre otras consideraciones. Asimismo, la organización propuesta se debe a que existen aproximadamente 14,000 aparatos de electromedicina, de los cuales 8,500 son diferentes [Rodríguez, 2019]. En el siguiente subapartado 3.1.1 se describen los principales tipos de equipos médicos, con sus respectivas características.

#### 3.1.1 Descripción de los principales equipos médicos

Para la mejor comprensión de las principales características de los equipos médicos tales como, geometría, peso en operación, tipo de instalación (anclado y/o apoyado) y material, se propone tablas resumen de los principales equipos médicos correspondientes a Servicios Asistenciales, Servicio de Diagnóstico y Tratamiento, Servicio de Análisis y Medicación, Servicios Generales y Gases Médicos, respectivamente. En este documento se presenta únicamente la Tabla 3-1 de Servicios Asistenciales. En Anejo B se describe los equipos médicos correspondientes a los otros servicios médicos.

La clasificación del equipamiento médico se ha efectuado de acuerdo a lo propuesto en el Capítulo 1 (subapartado 1.1.1) y lo descrito en el Capítulo 2 (apartado 2.1). En este contexto, se ha realizado una amplia búsqueda de referencias bibliográficas, entre las principales, se tiene: Fichas Técnicas 2019 – Dirección Nacional de Equipamiento Sanitario [MSP, 2019], Instituto Mexicano de Seguridad Social [IMSS, 2019], además de [OMS, 2004; Unicef, 2004; Retamales et al., 2008; Furukawa et al., 2013; Shi et al., 2014; Nifar, 2016; Philips, 2017; GE Healthcare, 2019; Siemens, 2019]. A continuación, la Tabla 3-1 detalla los principales equipos médicos de Servicios Asistenciales.

**Tabla 3-1.** Principales equipos médicos de Servicios Asistenciales

| Elementos   | Geometría (mm) <sup>a</sup> |      |      | Peso (kg) | Tipo de instalación <sup>b</sup> |   |       |   | Material  |
|---|-----------------------------|------|------|-----------|----------------------------------|---|-------|---|-----------|
|   | A                           | H    | L    |           | Anclaje                          |   | Apoyo |   |           |
|   |                             |      |      |           | F                                | P | R     | F |           |
| UCI (Unidad de Cuidados Intensivos)                   |                             |      |      |           |                                  |   |       |   |           |
| Cama eléctrica  | 900                         | 400  | 2000 | 180       | -                                | - | x     | - | Metálico  |
|   |                             | -    |      |           |                                  |   |       |   |           |
| Cabecero colgado                                      | 2000                        | 200  | 400  | 120       | x                                | - | -     | - |           |
| SopORTE para bombas de infusión y soportes de sueros  | 600                         | 1950 | 600  | 7         | -                                | - | x     | - | Ac. Inox. |
| Equipos y mesas móviles                               | 600                         | 900  | 400  | 23        | -                                | - | x     | - |           |
| Armario informatizado de medicación (de dos columnas) | 1308                        | 1969 | 686  | 390       | -                                | - | x     | x | Metálico  |

| Elementos  | Geometría (mm) <sup>a</sup> |      |      | Peso (kg) | Tipo de instalación <sup>b</sup> |   |       |   | Material  |
|--|-----------------------------|------|------|-----------|----------------------------------|---|-------|---|-----------|
|  | A                           | H    | L    |           | Anclaje                          |   | Apoyo |   |           |
|  |                             |      |      |           | F                                | P | R     | F |           |
| <b>Neonatología</b>                                    |                             |      |      |           |                                  |   |       |   |           |
| Incubadoras  | 6100                        | 1550 | 1150 | 110       | -                                | - | x     | - | Metálico  |
| Cabecero colgado                                       | 2000                        | 200  | 400  | 120       | x                                | - | -     | - |           |
| Monitores colgados de signos vitales                   | 330                         | 178  | 406  | 9         | x                                | - | -     | - | Ac. Inox. |
| Soporte para bombas de infusión y soportes de sueros   | 600                         | 1950 | 600  | 7         | -                                | - | x     | - |           |
| Equipos y mesas móviles                                | 600                         | 900  | 400  | 23        | -                                | - | x     | - | Metálico  |
| Armario informatizado de medicación (de media columna) | 673                         | 1354 | 686  | 270       | -                                | - | x     | x |           |
| <b>Hospitalización (Unidad de enfermería)</b>          |                             |      |      |           |                                  |   |       |   |           |
| Cama eléctrica   | 900                         | 400  | 2000 | 180       | -                                | - | x     | - | Metálico  |
|  |                             | -    |      |           |                                  |   |       |   |           |
| Cabecero cama  | 3000                        | 130  | 650  | 15        | -                                | x | -     | - | Ac. Inox. |
| Soporte para bombas de infusión y soportes de sueros   | 600                         | 1950 | 600  | 7         | -                                | - | x     | - |           |
| Carros móviles   | 600                         | 900  | 400  | 23        | -                                | - | x     | - | Metálico  |
| Armario informatizado de medicación (de dos columnas)  | 1308                        | 1969 | 686  | 390       | -                                | - | x     | x |           |
| <b>Consulta externa</b>                                |                             |      |      |           |                                  |   |       |   |           |
| Camillas de observación y otros aparatos (sillón)      | 620                         | 550  | 700  | 108       | -                                | - | x     | - | Metálico  |
| Lámpara de observación                                 | -                           | -    | -    | 1         | -                                | x | -     | x |           |
| Aparatos y elementos sobre repisas (objetos frágiles)  | -                           | -    | -    | 4         | -                                | x | -     | - |           |
| <b>Hospital de día</b>                                 |                             |      |      |           |                                  |   |       |   |           |
| Sillón articulado                                      | 1980                        | 710  | 1020 | 180       | -                                | - | x     | - | Metálico  |
| Cabecero cama  | 2000                        | 236  | 125  | 50        | -                                | x | -     | - |           |
| Soporte para bombas de infusión y soportes de sueros   | 600                         | 1950 | 600  | 7         | -                                | - | x     | - | Ac. Inox. |
| Carros móviles   | 560                         | 980  | 560  | 23        | -                                | - | x     | - |           |
| Aparatos y elementos sobre repisas (alto)              | 600                         | 2100 | 400  | 50        | -                                | x | -     | - | Metálico  |
| Armario informatizado de medicación                    | 673                         | 1354 | 686  | 270       | -                                | - | x     | x |           |
| <b>Recuperación post-operatoria</b>                    |                             |      |      |           |                                  |   |       |   |           |
| Cama eléctrica   | 900                         | 700  | 2000 | 142       | -                                | - | x     | - | Metálico  |
| Cabecero   | 1200                        | 130  | 50   | -         | -                                | x | -     | - |           |
| Monitores colgados                                     | 580                         | 386  | 70   | 7.5       | -                                | x | -     | - | Metálico  |
| Soporte para bombas de infusión                        | 600                         | 1950 | 600  | 7         | -                                | - | x     | - |           |
| Equipos móviles (resucitación, etc.)                   | 600                         | 900  | 400  | 23        | -                                | - | x     | - | Metálico  |



| Elementos                                       | Geometría (mm) <sup>a</sup> |      |      | Peso (kg) | Tipo de instalación <sup>b</sup> |   |       |   | Material  |
|---|-----------------------------|------|------|-----------|----------------------------------|---|-------|---|-----------|
|   | A                           | H    | L    |           | Anclaje                          |   | Apoyo |   |           |
|   |                             |      |      |           | F                                | P | R     | F |           |
| Armario informatizado de medicación             | 673                         | 1354 | 686  | 270       | -                                | - | x     | x |           |
| Sala de partos                                  |                             |      |      |           |                                  |   |       |   |           |
| Lámpara de techo                                | -                           | -    | -    | 70        | x                                | - | -     | - | Metálico  |
| Torreta de partos                               | -                           | -    | -    | 80        | x                                | - | -     | - |           |
| Mesa de partos                                  | 1000                        | 1050 | 2100 | 250       | -                                | - | x     | - |           |
| Mesas de instrumental                           | 1400                        | 800  | 500  | 19        | -                                | - | x     | - | Ac. Inox. |
| Bañera de partos                                | -                           | -    | -    | -         | -                                | - | -     | x | Poliést.  |
| Urgencias                                       |                             |      |      |           |                                  |   |       |   |           |
| Camilla de observación                          | 620                         | 550  | 700  | 108       | -                                | - | x     | - | Metálico  |
| Cabeceros                                       | 1200                        | 130  | 65   | -         | -                                | x | -     | - |           |
| Monitores de signos vitales                     | 330                         | 178  | 406  | 9         | -                                | x | -     | - |           |
| Soporte para bombas de infusión                 | 600                         | 1950 | 600  | 7         | -                                | - | x     | - | Ac. Inox. |
| Carro médico (móvil)                            | 600                         | 900  | 400  | 23        | -                                | - | x     | - |           |
| Lámpara de observación                          | -                           | -    | -    | 70        | x                                | x | -     | - | Metálico  |
| Bloque quirúrgico                               |                             |      |      |           |                                  |   |       |   |           |
| Lámparas quirúrgicas                            | -                           | -    | -    | 114       | x                                | - | -     | - | Metálico  |
| Torretas de cirujano y anestesista              | -                           | -    | -    | 120       | x                                | - | -     | - |           |
| Pantallas de visualización                      | 580                         | 386  | 70   | 7.5       | x                                | - | -     | - |           |
| Arco rayos X quirúrgico colgado                 | -                           | -    | -    | 350       | x                                | - | -     | - |           |
| Microscopio quirúrgico                          | -                           | -    | -    | 244       | -                                | - | x     | - |           |
| Mesa de operaciones                             | 560                         | 830  | 2100 | 266       | -                                | - | x     | - | Ac. Inox. |
| Equipo de anestesia                             | 560                         | -    | 680  | 142       | -                                | - | x     | - | Metálico  |
| Equipo de cirugía laparoscópica                 | 600                         | 1700 | 500  | 100       | -                                | - | x     | - | Metálico  |
| Bisturí electrónico y monitores                 | 400                         | 200  | 300  | 20        | -                                | - | -     | - |           |
| Mesas de instrumental                           | 1400                        | 800  | 500  | 19        | -                                | - | x     | - | Ac. Inox. |
| Equipo rayos X portátil y otros equipos móviles | -                           | -    | -    | 350       | -                                | - | x     | - | Metálico  |

a. A (ancho); H (altura); L (longitud)  
b. F (forjado); P (pared); R (ruedas)

### 3.1.2 Agrupación de equipos médicos

Como se describe en el Capítulo 1 (subapartado 1.1.1), para la evaluación de daños sísmicos, los componentes y sistemas no estructurales a menudo se clasifican en dos categorías: elementos no estructurales “sensibles a deformaciones” y/o “sensibles a aceleraciones”, siendo éste último efecto causado por las fuerzas de inercia producto de las aceleraciones horizontales y/o verticales de los niveles superiores de la estructura, pudiendo causar el deslizamiento, cabeceo o vuelco de los elementos no estructurales no anclados. Teniendo esto en mente, los equipos médicos se agrupan, según las características de los equipos médicos descritas en el subapartado 3.1.1 para servicios médicos y gases médicos como se muestra en la Tabla 3-2 y Tabla 3-3. Esta información es indispensable para asignar curvas de fragilidad sísmica más adecuadas a la categoría de equipamiento médico.

**Tabla 3-2.** Equipos susceptibles a deslizamiento: alta relación ancho/altura

| Tipo de instalación       | Peso operativo |           | Agrupación de los equipos médicos   |
|---------------------------|----------------|-----------|---|
|                           | Clasificación  | kg        |   |
| Equipo móvil              | Peso bajo      | < 50      | Equipos y mesas móviles; mesas de instrumental; y similares   |
|                           | Peso medio     | 100 – 280 | Cama eléctrica; armario informatizado de medicación (de media columna); bloque quirúrgico: mesa de operaciones, equipo de anestesia, equipo de cirugía laparoscópica; TAC: armario ordenador CRC; ecógrafo; mesa de endoscopia; central lavado instrumental; morgue y autopsias: mesa de autopsias; y similares |
|                           | Peso alto      | 280 – 460 | Bloque quirúrgico: equipo rayos X portátil y otros equipos móviles; lavadoras; desinfectoras de escopios; y similares   |
| Equipo apoyado en el piso | Peso medio     | 100 – 300 | Laboratorio: Bancos de muestras; y similares  |
|                           | Peso alto      | 300 – 600 | TAC; equipos rayos X convencional; RMN; hemodinámica; PET-TAC; Gammacámara; mesa de paciente; laboratorio: ultracentrífugas; morgue y autopsias: túmulo mortuario refrigerado; cocina: aparatos de cocción y lavado, cámaras frigoríficas; y similares  |
| Equipo robusto/rígido     | -              | > 600     | TAC; PET-TAC; Gammacámara; Radioterapia: Gantry; y similares  |

**Tabla 3-3.** Equipos susceptibles a vuelco: baja relación ancho/altura

| Tipo de instalación       | Peso operativo |           | Agrupación de los equipos médicos  |
|---------------------------|----------------|-----------|--|
|                           | Clasificación  | kg        |  |
| Equipo móvil              | Peso bajo      | < 50      | Soporte para bombas de infusión y soportes de sueros, y similares  |
|                           | Peso bajo      | < 100     | Laboratorio: neveras y congeladores; esterilización: lavadesinfectoras; lavandería: carros móviles; y similares  |
|                           | Peso medio     | 100 – 300 | Neonatología: incubadora; bloque quirúrgico: microscopio quirúrgico; equipo de endoscopia; armarios de escopios; hemodinámica: armario de control del sistema, armario de cableado; laboratorio: cabinas de trabajo; y similares   |
| Equipo apoyado en el piso | Peso medio     | 100 – 300 | TAC: armario de control eléctrico; RMN: armario de control y adquisición de datos, armario de refrigeración por líquido, amplificador de gradiente; PET-TAC: unidad de distribución de potencia; recipientes gammateca de almacenamiento productos radioactivos, cabinas de seguridad; laboratorio: cámara frigorífica y Banco de Sangre; farmacia: cabinas de preparación de parenterales y citostáticos; y similares |
|                           | Peso alto      | 300 – 600 | Armario informatizado de medicación (de dos columnas); esterilización: autoclaves de vapor y de baja temperatura; morgue y autopsias: cámaras frigoríficas (2  |

| Tipo de instalación | Peso operativo |    | Agrupación de los equipos médicos   |
|---------------------|----------------|----|---|
|                     | Clasificación  | kg |   |
|                     |                |    | cadáveres); lavandería: aparatos de lavado, centrifugado y planchado; y similares |

### 3.2 Gradación del daño

El nivel de daño experimentado por un elemento o un conjunto de elementos (tanto estructurales como no estructurales) se clasifica en diferentes estados de daño (por sus siglas en inglés, DS Damage States). Varios documentos discuten sobre esto, entre ellos [FEMA, 2000; Milutinovic y Trendafiloski, 2003; FEMA 2012b; FEMA, 2012c; ASCE, 2017]. Para cada curva de fragilidad, se han definido cinco estados de daño, de acuerdo a la clasificación de HAZUS [FEMA, 2012c] tales como: sin daño o nulo (DS<sub>0</sub>); leve (DS<sub>1</sub>); moderado (DS<sub>2</sub>); extenso (DS<sub>3</sub>) y completo (DS<sub>4</sub>). Las curvas de fragilidad de cada componente están asociadas a un posible estado de daño (DS<sub>i</sub>), donde la extensión del daño generalmente se refleja en el número de DS. Es decir, para un componente con tres estados de daño, DS<sub>1</sub> es un daño menor y DS<sub>3</sub> es un daño extenso. Algunos componentes solo tienen un estado de daño. En este caso, el estado de daño generalmente representa un daño completo (vuelco, deslizamiento, rotura, etc.) o pérdida de operación del componente.

Los subapartados 3.2.1 y 3.2.2 describen los estados de daño de elementos estructurales y no estructurales, respectivamente. La descripción corresponde a la relación del estado de daño con la función en la infraestructura hospitalaria ante un evento sísmico. El subapartado 3.2.3 presenta la relación entre los estados de daño y la pérdida de función en infraestructuras hospitalarias. Los subapartados 3.2.4 y 3.2.5 resumen la identificación de la vulnerabilidad sísmica de los elementos estructurales y no estructurales, respectivamente. La vulnerabilidad sísmica corresponde a la susceptibilidad física que tienen los elementos estructurales y no estructurales ante un evento sísmico de imposibilitar la función en una infraestructura hospitalaria.

#### 3.2.1 Daño estructural

El nivel de desempeño sísmico de la estructura en relación al daño estructural de un edificio, es de acuerdo a [FEMA, 2000; ASCE, 2017] como:

- **Daño nulo (DS<sub>0</sub>).** No presenta daño visible; los sistemas estructurales se encuentran totalmente operativo.
- **Daño leve (DS<sub>1</sub>).** Ocupación inmediata. El daño global de la estructura es menor. No se esperan degradaciones de la resistencia ni de la rigidez de la estructura.
- **Daño moderado (DS<sub>2</sub>).** Control de daños. Este nivel de daño es deseable para minimizar el tiempo de reparación, así como la interrupción del funcionamiento, como un medio parcial para proteger equipos y contenidos valiosos cuando el costo del diseño para la ocupación inmediata es excesivo.
- **Daño extenso (DS<sub>3</sub>).** Seguridad de la vida. Daños significativos en la estructura, no obstante, todavía existe un margen de seguridad respecto al colapso estructural. Algunos elementos estructurales pueden verse severamente afectados. Sin embargo, el riesgo de afectación a la vida de los ocupantes se espera que sea bajo. Es posible reparar la estructura.

- **Daño completo (DS<sub>4</sub>).** Prevención de colapso. El riesgo de que los ocupantes resulten heridos es alto debido a la caída de escombros. La estructura no es reparable técnicamente y no es segura para volver a ser ocupada; una réplica puede provocar su colapso.

### 3.2.2 Daño no estructural

El nivel de desempeño sísmico de la estructura en relación al daño estructural de un edificio, es de acuerdo a [FEMA, 2000; ASCE, 2017] como:

- **Daño nulo (DS<sub>0</sub>).** No presenta daño visible: los sistemas de la infraestructura hospitalaria se encuentran totalmente operativos.
- **Leve (DS<sub>1</sub>).** Operativo - Habitable: No se presenta ningún daño visible; los sistemas se encuentran totalmente operativos.
- **Moderado (DS<sub>2</sub>).** Ocupación Inmediata - Habitable: No hay peligro para la vida humana. Los sistemas, en general, permanecen operativos, siempre que la energía esté disponible; sin embargo, se requieren reparaciones menores.
- **Extenso (DS<sub>3</sub>).** Seguridad de vida - Acceso restringido en algunas zonas: El nivel de riesgo para la vida humana es bajo. No se esperan grandes bloqueos en las rutas de salida, pero existe acumulación de escombros. El uso de las instalaciones en determinadas zonas de la edificación es restringido.
- **Completo (DS<sub>4</sub>).** Cerca del colapso - Entrada prohibida: El nivel de riesgo para la vida humana es elevado. Se presentan daños severos en elementos no estructurales y la mayoría de sistemas de emergencia se encuentran fuera de servicio. El hospital no se encuentra operativo (funcional).

### 3.2.3 Relación entre los estados de daño y la pérdida de función en infraestructuras hospitalarias

La intensidad (relevancia) de un determinado nivel de daño o desempeño sísmico puede evaluarse bajo diferentes criterios, a saber: amenaza para la vida, impacto ambiental, influencia en la pérdida de función, tiempo y costo de reparación, entre otros. En este estudio, se enfatiza la influencia en la pérdida de función, dado el papel esencial que desempeñan las infraestructuras hospitalarias en caso de eventos sísmicos severos. A continuación, tomando como referencia los criterios de [Boroschek y Retamales, 2004; WHO/PAHO, 2015], se presenta la relación entre los estados de daño y los efectos en la pérdida de función en una infraestructura hospitalaria. Tenga en cuenta que los nombres de los grados de pérdida de función corresponden a la propuesta de esta investigación.

1. **Pérdida de función baja y/o nula (1-A).** Infraestructura hospitalaria completamente funcional durante e inmediatamente después de eventos sísmicos. Interrupciones mínimas durante el proceso de reparación. Los pacientes críticos pueden necesitar ser trasladados a una habitación más limpia durante la reparación. Se recomienda aplicar medidas para mejorar la capacidad de gestión de emergencias y llevar a cabo medidas a mediano y largo plazo para mejorar el nivel de seguridad en caso de un determinado evento sísmico.
2. **Pérdida de función temporal (2-B).** Interrupción significativa de los servicios debido a problemas asépticos. Infraestructura hospitalaria fuera de servicio por un par de días o semanas. Se necesitan medidas de intervención a corto plazo.

- 3. **Pérdida de función permanente (3-C).** Se espera la interrupción del funcionamiento normal de la infraestructura hospitalaria debido a razones de seguridad. Infraestructura hospitalaria fuera de servicio por un par de semanas, meses o en forma indefinida. Se necesitan medidas de intervención urgentes.

La Tabla 3-4 muestra la relación del desempeño sísmico estructural y no estructural en la pérdida de función en infraestructuras hospitalarias.

**Tabla 3-4.** Relación del desempeño sísmico estructural y no estructural en la pérdida de función en infraestructuras hospitalarias [Adaptado de FEMA, 2000; Boroschek y Retamales, 2004]

|                               |                 | Desempeño Sísmico No Estructural |                 |                 |                 |                 |
|-------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                               |                 | DS <sub>0</sub>                  | DS <sub>1</sub> | DS <sub>2</sub> | DS <sub>3</sub> | DS <sub>4</sub> |
| Desempeño Sísmico Estructural | DS <sub>0</sub> | 1-A                              | 1-A             | 1-A             | 2-B             | 3-C             |
|                               | DS <sub>1</sub> | -                                | 1-A             | 1-A             | 2-B             | 3-C             |
|                               | DS <sub>2</sub> | -                                | -               | 2-B             | 2-B             | 3-C             |
|                               | DS <sub>3</sub> | -                                | -               | -               | 3-C             | 3-C             |
|                               | DS <sub>4</sub> | -                                | -               | -               | -               | 3-C             |

1-A Pérdida de función baja y/o nula; 2-B Pérdida de función temporal; 3-C Pérdida de función permanente

DS<sub>0</sub>: Nulo, DS<sub>1</sub>: Leve, DS<sub>2</sub>: Moderado, DS<sub>3</sub>: Extenso, DS<sub>4</sub>: Completo

### 3.2.4 Identificación de la vulnerabilidad sísmica en elementos estructurales

En este subapartado se describe las especificaciones de las 21 curvas de fragilidad sísmica consideradas en el estudio. El desplazamiento espectral (m) es el parámetro de demanda sísmica considerado para elementos estructurales. Las fragilidades sísmicas incluyen, curvas de fragilidades para pórticos de hormigón armado, muros de corte de hormigón armado y curvas de fragilidad sísmica de pórticos de hormigón armado con paredes de relleno de mampostería sin refuerzo. Asimismo, se considera el número de plantas o altura del edificio, así como el nivel de diseño sísmico según el código como alto, medio y bajo. La Tabla 3-5 muestra las variables de los tipos de sistemas resistentes estructurales.

**Tabla 3-5.** Tipos de sistemas resistentes estructurales HAZUS [FEMA, 2012c]

| Nº | Etiqueta | Descripción  | Altura       |            |                   |            |
|----|----------|--|--------------|------------|-------------------|------------|
|    |          |  | Rango        |            | Referencia típica |            |
|    |          |  | Nombre       | Nº Plantas | Nº Plantas        | Altura (m) |
| 1  | C1L      | Pórticos de hormigón armado  | Baja altura  | 1 – 3      | 2                 | 6          |
|    | C1M      |  | Media altura | 4 – 7      | 5                 | 15         |
|    | C1H      |  | Gran altura  | 8+         | 12                | 36         |
| 2  | C2L      | Muros de corte de hormigón armado  | Baja altura  | 1 – 3      | 2                 | 6          |
|    | C2M      |  | Media altura | 4 – 7      | 5                 | 15         |
|    | C2H      |  | Gran altura  | 8+         | 12                | 36         |
| 3  | C3L      | Pórticos de hormigón armado con paredes de relleno de mampostería sin refuerzo | Baja altura  | 1 – 3      | 2                 | 6          |
|    | C3M      |  | Media altura | 4 – 7      | 5                 | 15         |
|    | C3H      |  | Gran altura  | 8+         | 12                | 36         |

Las curvas de fragilidad sísmica consideradas en el sistema resistente de la estructura y los estados de daño de cada curva de fragilidad para cada tipo del sistema resistente estructural se detallan en el Anejo B.

### 3.2.5 Identificación de la vulnerabilidad sísmica en componentes y sistemas no estructurales

En este subapartado, se describen las 125 curvas de fragilidad sísmica consideradas en el estudio para cada categoría de componentes y sistemas no estructurales tanto en elementos arquitectónicos, instalaciones, equipamiento médico y contenidos. Incluye múltiples especificaciones de fragilidades sísmicas, que reflejan un rango de configuraciones y variaciones de materiales que afectan las características en el desempeño sísmico. Asimismo, incluye niveles o categorías de diseño sísmico SDC (por sus siglas en inglés, Seismic Design Category) tales como SDC A y B, que corresponden a diseños sísmicos bajo y/o nulo en consideraciones de diseño y detallamiento sísmico. El nivel de diseño sísmico SDC C, que corresponde a un diseño sísmico medio, por ejemplo, incluye teatros, salas de conferencias y cafeterías, entre otros. El nivel de diseño sísmico SDC D, que corresponde a un nivel de diseño sísmico alto. El nivel de diseño sísmico SDC E y F corresponden al diseño sísmico más alto, puntualmente están destinados a áreas de muy alta sismicidad y/o cercanas a una falla activa. Además, se aplica en el diseño un factor de importancia  $I_p = 1.5$ . Cuando se desconoce el nivel de diseño sísmico se representa con la nomenclatura N/A. Tenga en cuenta que los hospitales emplazados en zonas de alta sismicidad, y algunos emplazados en zonas de sismicidad intermedia, se diseñan como categoría E/F como medida conservadora.

Se considera la probabilidad de alcanzar distintos niveles de daño en función de EDP (Engineering Demand Parameter) tales como derivas de entrepiso y aceleraciones de piso. Además, se considera como estimador de la acción sísmica la IM (Intensity Measure), por ejemplo, aceleración del suelo (PGA). A partir de los valores de la deriva promedio a lo alto del edificio como el valor de deriva de entrepiso  $\bar{\delta}$  (rad), aceleración máxima de piso PFA o aceleración máxima del suelo PGA, se pueden inferir los daños y/o pérdidas de operación en la infraestructura. A continuación, se describen las fragilidades sísmicas de las cuatro categorías analizadas, que incluyen elementos arquitectónicos, instalaciones, equipamiento médico y contenidos.

#### 3.2.5.1 Categoría de elementos arquitectónicos

En este subapartado se describe los principales subtipos de componentes (curvas de fragilidad sísmica) de la categoría de elementos arquitectónicos que contribuyen en los efectos potenciales en la pérdida de función en una infraestructura hospitalaria. En el Anejo B se resume las curvas de fragilidad sísmica con sus respectivas referencias bibliográficas. Asimismo, en el Anejo B se describe los estados de daño de cada curva de fragilidad sísmica de cada componente y sistema no estructural. A continuación, se describe la subcategoría exterior e interior.

Subcategoría exterior considera:

- i. Fachada, incluye curvas de fragilidad sísmica de paredes de relleno de mampostería considerando el tipo de material como ladrillos de arcilla hechos a mano, ladrillos fabricados a máquina y bloques de hormigón. También se considera la curva de fragilidad sísmica de paredes de relleno de mampostería con ventanas y/o aberturas de puertas. La deriva de entrepiso es el parámetro de demanda sísmica utilizado para las

curvas de fragilidad de fachadas. Además, se incluye paredes de relleno de mampostería arriostrados a intervalos regulares a 3 m o menos, con la finalidad de considerar el daño de la mampostería sensible a la aceleración de piso conocido como daño fuera del plano. La aceleración máxima de piso es el parámetro de demanda sísmica utilizado para esta curva de fragilidad sísmica. El nivel de diseño sísmico es bajo y/o nulo (SDC A/B).

Asimismo, se incluye las curvas de fragilidad sísmica para muros de fachadas con un marco de acero doble (uno interior y otro exterior) con conexiones básicas (fijas) y con conexiones mejoradas (deslizantes). La deriva de entrepiso es el parámetro de demanda sísmica utilizado para estas curvas de fragilidad. Se desconoce el nivel de diseño sísmico de las curvas de fragilidad de fachada SDC N/A.

- ii. Sistemas de acristalamiento, se proporciona datos de curvas de fragilidad sísmica para dos tipos básicos de sistemas de ventanas como el vidrio monolítico recocido y vidrio laminado, ambos tipos de vidrio con marcos de aluminio. El primer tipo de vidrio se refiere al vidrio que no ha sido reforzado mediante templado y tiene una única lámina de vidrio. Además, se incluye una curva de fragilidad sísmica para este tipo de vidrio monolítico recocido (sistema de vidrio mejorado) considerando la adición de una película adhesiva de tereftalato de polietileno (PET) a un lado del panel de vidrio. Dejando un perímetro sin película adhesiva entre el vidrio y el marco de la ventana. El segundo tipo de vidrio se refiere a un vidrio que ha sido sometido a un proceso de tratamiento térmico logrando que el vidrio quede expuesto en su superficie a tensiones de compresión y en el interior a tensiones de tracción, también es conocido como vidrio de seguridad. Se desconoce el nivel de diseño sísmico de estas curvas de fragilidad sísmica. La deriva de entrepiso es el parámetro de demanda sísmica utilizado para estos sistemas y corresponden al nivel de diseño sísmico SDC N/A.
- iii. Escaleras de emergencia, se proporciona curvas de fragilidad sísmica para escaleras de estructura de acero y escaleras de hormigón armado. Ambas escaleras no consideran diseño sísmico de su junta con la estructura resistente del edificio. La deriva de entrepiso es el parámetro de demanda sísmica utilizado para estos sistemas y corresponden al nivel de diseño sísmico SDC C.
- iv. Riesgo de caída de escombros, se proporciona la curva de fragilidad sísmica para parapetos de mampostería sin refuerzo, además sin diseño sísmico. La aceleración máxima de piso (PFA) es el parámetro de demanda sísmica utilizado para este tipo de parapetos y corresponden al nivel de diseño sísmico SDC A/B.

Subcategoría interior de elementos arquitectónicos considera:

- i. Particiones, incluye curvas de fragilidad sísmica de paneles de yeso en montantes de acero, tanto a altura completa como a media altura. El nivel de diseño sísmico SDC N/A. La deriva de entrepiso es el parámetro de demanda sísmica utilizado para estos sistemas. Además, proporciona fragilidades de particiones pesadas de mampostería iguales a las consideradas en el sistema de fachada, incluyendo el tipo de material como ladrillos de arcilla hecho a mano, ladrillos fabricados a máquina y bloques de hormigón. Asimismo, se incluye paredes de relleno de mampostería arriostrados a intervalos regulares a 3 m o menos. Para más detalle de las características de estas curvas de fragilidad sísmica refiérase a la descripción del sistema de fachada descrito en la subcategoría exterior de elementos arquitectónicos.

- ii. Puertas, incluye la curva de fragilidad sísmica para puertas con marco de madera y se desconoce el nivel de diseño sísmico SDC N/A. La deriva de entrepiso es el parámetro de demanda sísmica utilizado para este tipo de puertas.
- iii. Falso techo, se proporcionan cinco tipos de especificaciones de techo suspendido incluyendo sistemas de iluminación. Los tres primeros tipos de techos suspendidos se desconoce el nivel de diseño sísmico y los dos últimos tipos de techos suspendidos incluye niveles de diseño sísmico SDC D, E y F, donde se aplica el factor de importancia  $I_p = 1.5$ . Los niveles de diseño sísmico SDC D corresponde a un diseño sísmico actual, específicamente para edificaciones esenciales y el diseño sísmico E y F es considerado como el nivel más estricto en el código de diseño. La aceleración máxima de piso (PFA) es el parámetro de demanda sísmica para los sistemas de falso techo suspendido.
- iv. Acabados de pared, incluye acabados con cerámica. Se considera la curva de fragilidad sísmica tanto para altura completa o parcial. Las curvas de fragilidad sísmica suponen que el acabado se produce solo en un lado de la partición, lo que permite especificar diferentes acabados de partición para los lados opuestos de la misma partición. La deriva de entrepiso es el parámetro de demanda sísmica utilizado para acabados de pared.

### 3.2.5.2 Categoría de instalaciones

En este subapartado se describe los principales subtipos de componentes (curvas de fragilidad sísmica) de la categoría de instalaciones que contribuyen en los efectos potenciales en la pérdida de función en una infraestructura hospitalaria. En el Anejo B se resume las curvas de fragilidad sísmica con sus respectivas referencias bibliográficas. Asimismo, en el Anejo B se describe los estados de daño de cada curva de fragilidad sísmica de cada componente y sistema no estructural. A continuación, se describe la subcategoría de equipos de sistemas críticos y sistemas distribuidos.

Subcategoría de equipos de sistemas críticos considerada:

- i. Sistemas eléctricos, considera dos aspectos. Por un lado, equipos principales para el funcionamiento normal de suministro de energía eléctrica. Por otro lado, equipos eléctricos para situaciones de emergencia cuando el sistema normal de suministro de electricidad es interrumpido. Para el funcionamiento normal de suministro de energía eléctrica incluye transformadores de servicio primario, panel general de distribución de baja tensión y panel eléctrico de distribución secundario. Para el suministro de energía eléctrica de emergencia incluye, grupos electrógenos, gabinetes de los SAIs (sistema de alimentación ininterrumpida, en inglés UPS).

En este estudio, para mayor comprensión de las cualidades sismorresistente de los equipos eléctricos se establece una relación entre dichas características de instalación asociadas a los niveles de diseño sísmico SDC A/B, D y E/F. Por ejemplo, cada una de las especificaciones de curvas de fragilidad sísmica de FEMA P-58 se subdivide en las siguientes consideraciones: (1) no anclado, no aislado; y (2) anclado o aislado y restringido. La consideración (1) corresponde a SDC D y la consideración (2) corresponde a la SDC E/F. Análogamente, de acuerdo a lo descrito en [Eidinger, 2009] las características de instalación del equipo son: (1) sísmicamente vulnerable, que corresponde a SDC A/B; (2) bien anclado, que corresponde a SDC D; y (3) sísmicamente calificada, que corresponde a SDC E/F. La aceleración máxima de piso (PFA) y la aceleración máxima del suelo (PGA) son los parámetros de demanda sísmica utilizados.



- ii. Sistemas de telecomunicaciones, incluye racks (gabinetes) de almacenamiento del centro de procesamiento de datos para la red integrada de datos de voz y subestaciones del sistema de gestión. Asimismo, electrónica de escritorio, incluyendo ordenadores, monitores, equipos de sonido, entre otros. Tanto para equipos montados en una superficie antideslizante y equipos montados en una superficie lisa. Además, se incluye las curvas de fragilidad sísmica para pisos elevados. El nivel de diseño sísmico corresponde a SDC A/B, C, D y E/F. La aceleración máxima de piso (PFA) y la aceleración máxima del suelo (PGA) son los parámetros de demanda sísmica utilizados.
- iii. Sistemas de transporte vertical, incluye curvas de fragilidad sísmica para elevadores hidráulicos y de tracción, ambos tipos de ascensores se dividen en aquellos con provisiones sísmicas y aquellos sin provisiones sísmicas. Si se desconoce el tipo de ascensor, se puede asumir que los edificios con más de 5 plantas tendrán ascensor de tracción y los edificios con 5 plantas o menos tendrán ascensor hidráulico. Para infraestructuras modernas se incluye la fragilidad con SDC E/F, es decir, categoría de diseño sísmico alta donde se aplica el factor de importancia  $I_p = 1.5$ . La aceleración máxima de piso (PFA) es el parámetro de demanda sísmica para los sistemas de transporte.
- iv. Sistema de suministro de agua, hace referencia a la fragilidad sísmica de depósitos de agua potable, específicamente para la estación de bombeo de agua potable, tanto para consideraciones sísmicas, así como sin consideraciones sísmicas en su instalación.
- v. Sistemas de climatización (sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado HVAC), incluye máquinas de frío, bombas o electrobombas y unidades climatizadoras. El nivel de diseño sísmico SDC considerado corresponde a C y D. La aceleración máxima de piso (PFA) es el parámetro de demanda sísmica para los sistemas de climatización.

Subcategoría de sistemas distribuidos de sistemas críticos considera:

- i. Tuberías de agua potable, las especificaciones de curvas de fragilidad sísmica se dividen en subgrupos según el nivel de diseño sísmico de la siguiente manera: niveles de diseño sísmico SDC A/B, C, D y E/F, donde el factor de importancia  $I_p$  es 1.5. La aceleración máxima de piso (PFA) es el parámetro de demanda sísmica para los sistemas de tuberías.
- ii. Tuberías de residuos sanitarios, estas especificaciones de curvas de fragilidad sísmica se dividen en subgrupos según el nivel de diseño sísmico similar a los tipos de tuberías de agua potable. La aceleración máxima de piso (PFA) es el parámetro de demanda sísmica para los sistemas de tuberías.
- iii. Tubería de agua para rociadores contra incendios, incluye curvas de fragilidad sísmica tanto para las juntas roscadas de tuberías de agua como para los sistemas de tuberías y derivaciones en horizontal. El nivel de diseño sísmico es similar a los tipos de tuberías de agua potable. La aceleración máxima de piso (PFA) es el parámetro de demanda sísmica para los sistemas de tuberías.
- iv. Ductos del sistema de climatización, incluye curvas de fragilidad sísmica tanto para conductos de climatización como para los difusores de climatización en falsos techos

suspendidos. El nivel de diseño sísmico es similar a los tipos de tuberías de agua potable. La aceleración máxima de piso (PFA) es el parámetro de demanda sísmica para los ductos de climatización.

### 3.2.5.3 Categoría de equipamiento médico

En este subapartado se describe los principales subtipos de componentes (curvas de fragilidad sísmica) de la categoría de equipamiento médico que contribuyen en los efectos potenciales en la pérdida de función en una infraestructura hospitalaria. En el Anejo B se resume las curvas de fragilidad sísmica con sus respectivas referencias bibliográficas. Asimismo, en el Anejo B se describe los estados de daño de cada curva de fragilidad sísmica de cada componente y sistema no estructural. La aceleración máxima de piso (PFA) o la aceleración del suelo (PGA) son los parámetros de demanda sísmica considerados para estimar el daño. Gran parte de las fragilidades sísmicas de esta categoría tienen solo una curva de fragilidad asociada con el único estado de daño ( $DS_i$ ) del componente, que generalmente está asociado a la pérdida de operación del componente. La clasificación de las fragilidades sísmicas se efectúa de acuerdo al subapartado 3.1.2, que contiene las fragilidades asociadas a equipos susceptibles a vuelco y a deslizamiento. El nivel de diseño sísmico SDC A/B, C y D o N/A (se desconoce) es acuerdo a lo especificado en cada curva de fragilidad sísmica. A continuación, se describe las dos categorías de servicios médicos y gases médicos.

Subcategoría de servicios médicos considera:

- i. Servicios Asistenciales, incluye Unidades de Cuidados Intensivos UCI, Neonatología, Hospitalización, Consulta Externa, Hospital de Día, Recuperación Postoperatoria, Emergencias (Nivel 1: Box de atención inmediata) y Quirófanos. Incorpora diez curvas de fragilidad sísmica de equipos susceptibles a deslizamiento y a vuelco. Se considera el sistema de apoyo en el piso, pared, ruedas, y peso operativo. Asimismo, incluye equipos sujetos al forjado: cabeceros suspendidos (pontas). Se desconoce el nivel de diseño sísmico SDC N/A de los equipos médicos, excepto las curvas de fragilidad sísmica para equipos sujetos al forjado y corresponden a un SDC A/B, C y D. Además, se considera a los subtipos de componentes con bajo peso (<50) con un SDC A/B.
- ii. Servicios Centrales de Diagnóstico y Tratamiento, incluye Diagnóstico basado en imágenes, ejemplo, Rayos X, Tomografía Computarizada, Resonancia Magnética, Ecografía, Endoscopia, Diálisis, Radioterapia, entre otras. Incorpora seis curvas de fragilidad sísmica de equipos susceptibles a deslizamiento y a vuelco. Se considera el sistema de apoyo en el piso, pared, ruedas, y peso operativo. Asimismo, incluye equipos anclados en el piso: Telemando; equipos que se deslizan por carriles, soporte de techo: equipos de rayos X convencional, y similares. Además, de la electrónica de escritorio, apoyados en superficie lisa o antideslizante: consola para equipos de control y monitores, y similares. Nivel de diseño sísmico SDC N/A.
- iii. Servicios de Análisis y Medicación incluyen Laboratorios y Farmacia, por ejemplo, almacenamiento refrigerado como Bancos de Sangre y medicamentos. Incorpora cuatro curvas de fragilidad sísmica de equipos susceptibles a deslizamiento y a vuelco. Se considera el sistema de apoyo en el piso, pared, ruedas, y peso operativo. Nivel de diseño sísmico SDC N/A.
- iv. Servicios Generales y de Apoyo, incluye Esterilización, Morgue y Autopsias, Cocina, Lavandería, entre otras. Incorpora cuatro curvas de fragilidad sísmica de equipos

susceptibles a deslizamiento y a vuelco. Se considera el sistema de apoyo en el piso, pared, ruedas, y peso operativo. Nivel de diseño sísmico SDC N/A, con excepción a los subtipos de componentes con bajo peso (<50) se considera SDC A/B.

Subcategoría de gases médicos considera:

- i. Reserva de gas médico y sistemas de suministro de gas médico a la infraestructura hospitalaria, incluye depósitos de almacenamiento de gas médico tales como depósitos de oxígeno líquido o de oxígeno y nitrógeno líquido para producir aire comprimido por mezcla, situados en el exterior del hospital. Se incluye la curva de fragilidad sísmica para baterías de botellas de reserva de oxígeno, aire comprimido respirable, protóxido de nitrógeno (para anestesia) y de dióxido de carbono CO<sub>2</sub> (para operaciones laparoscópicas, incubadoras, etc.). Las botellas de los diferentes gases se encuentran conectadas a unos colectores con conexiones flexibles que su vez se conectan a los cuadros de inversión automáticas y normativamente deben estar sujetas individualmente con cadenas a la pared. Nivel de diseño sísmico SDC N/A.
- ii. Tuberías de gas médico, incluye tres curvas fragilidad sísmica del sistema de suministro de gas médico a los diferentes recintos del hospital con niveles de diseño sísmico SDC A/B, C, D y E/F.

#### 3.2.5.4 Categoría de contenidos

En este subapartado se describe los principales subtipos de componentes (curvas de fragilidad sísmica) de la categoría de contenidos que contribuyen en los efectos potenciales en la pérdida de función en una infraestructura hospitalaria. En el Anejo B se resume las curvas de fragilidad sísmica con sus respectivas referencias bibliográficas. Asimismo, en el Anejo B se describe los estados de daño de cada curva de fragilidad sísmica de cada componente y sistema no estructural. La aceleración máxima de piso (PFA) es el parámetro de demanda para todas las fragilidades sísmicas de la categoría de contenidos. Incluye la subcategoría de mobiliario, accesorios y estanterías, entre otros, y considera:

- i. Estanterías pesadas, incluye dos tipos de bastidores (racks). Por un lado, bastidores de almacenamiento de tipo industrial, de altura entre 4.4 a 6 m. Por otro lado, curvas de fragilidad sísmica de bastidores más pequeños (altura menor a 3 m), incluye nivel de diseño sísmico SDC C y D.
- ii. Estanterías ligeras, incluye estanterías sin restricciones para evitar la caída de objetos frágiles ante un evento sísmico, corresponde a la fragilidad de estanterías de vidrio de doble o una puerta. Nivel de diseño sísmico SDC N/A.
- iii. Almacenamiento de materiales peligrosos, hace referencia a suministros químicos en Laboratorio, Farmacia, Quirófano, entre otros. Incluye la curva de fragilidad sísmica de contenido frágil en estantes de gabinetes con puertas cerradas. Nivel de diseño sísmico SDC N/A.
- iv. Ordenadores y equipos de comunicación, se proporciona tres tipos de curvas de fragilidad sísmica tales como estación de trabajo modular, equipo electrónico con soporte en la pared (monitores). Finalmente, fragilidad de electrónica de escritorio, incluyendo ordenadores, monitores, equipos de sonido, entre otros. Se subdivide en

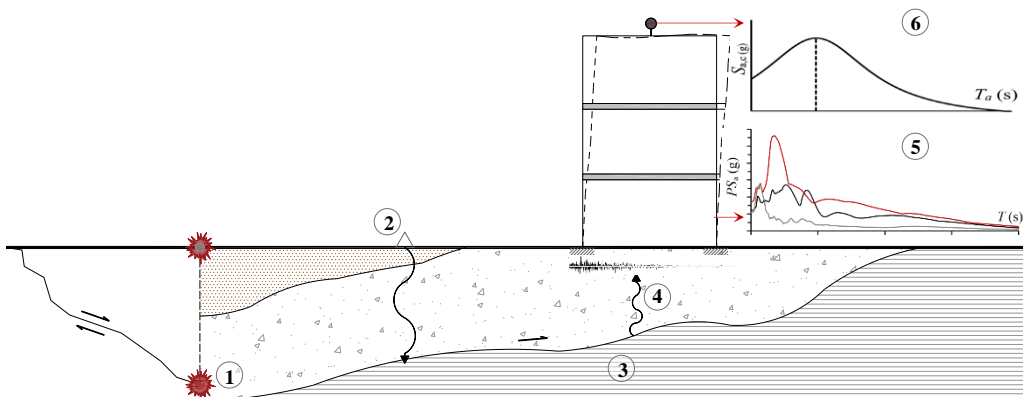
equipos apoyados en superficie antideslizante y en superficie lisa. Nivel de diseño sísmico SDC N/A.

Las curvas de fragilidad sísmica consideradas en los componentes y sistemas no estructurales y los estados de daño de cada curva de fragilidad se detallan en el Anejo B.

### 3.3 Cuantificación de la sollicitación sísmica

La demanda de un determinado movimiento sísmico observado en una estructura puede caracterizarse principalmente mediante dos cantidades físicas: el desplazamiento relativo entre plantas (deriva) y las aceleraciones absolutas de piso. La deriva de entrepiso causa daños tanto estructurales como no estructurales, en elementos y sistemas no estructurales sensibles a la deriva, por ejemplo, agrietamiento de muros de relleno, rotura de acristalamientos, entre otros. La aceleración de piso (peak floor acceleration PFA) genera principalmente daños en elementos no estructurales, anclados o no anclados, sensibles a aceleraciones, por ejemplo, caída de escombros, rotura de tuberías, desprendimiento del falso techo, vuelco de depósitos, entre otros.

La sollicitación sísmica tanto en términos de deriva como de aceleraciones se estima a partir del registro de aceleraciones que afectó al edificio. Dicho acelerograma se obtiene a partir del registro de la estación sismológica más cercana al hospital analizado. Además, se considera dos escenarios: i) si la estación sismológica se encuentra en un tipo de suelo diferente o tiene una profundidad de lecho rocoso distinta a la del hospital en estudio, los acelerogramas registrados se modifican convenientemente, utilizando el programa DeepSoil [Hashash et al., 2017]; ii) cuando la estación más cercana está ubicada a una distancia a la fuente significativamente diferente a la del hospital analizado (más de 20 km), el acelerograma se corrige considerando Leyes de Atenuación adecuadas para el lugar y mecanismo focal. El Capítulo 2, subapartado 2.2.1 describe los conceptos de los dos escenarios considerados en este estudio. La Figura 3-1 muestra esquemáticamente la metodología de cuantificación de demanda sísmica.



1. Hipocentro; 2. Estación sismológica; 3. Lecho rocoso; 4. PGA (superficie); 5. Espectros de respuesta; 6. Espectros de respuesta del piso.

**Figura 3-1.** Metodología de cuantificación de demanda sísmica

La cuantificación de la sollicitación sísmica en términos de deriva de entrepiso se describe en subapartado 3.3.1, mientras que la estimación de aceleración de piso se describe en el subapartado 3.3.2.

### 3.3.1 Estimación de la deriva de entrepiso

En este estudio se considera la deriva de techo como estimativo de la deriva promedio de la estructura. La Figura 3-2 ilustra los pasos propuestos en este trabajo.

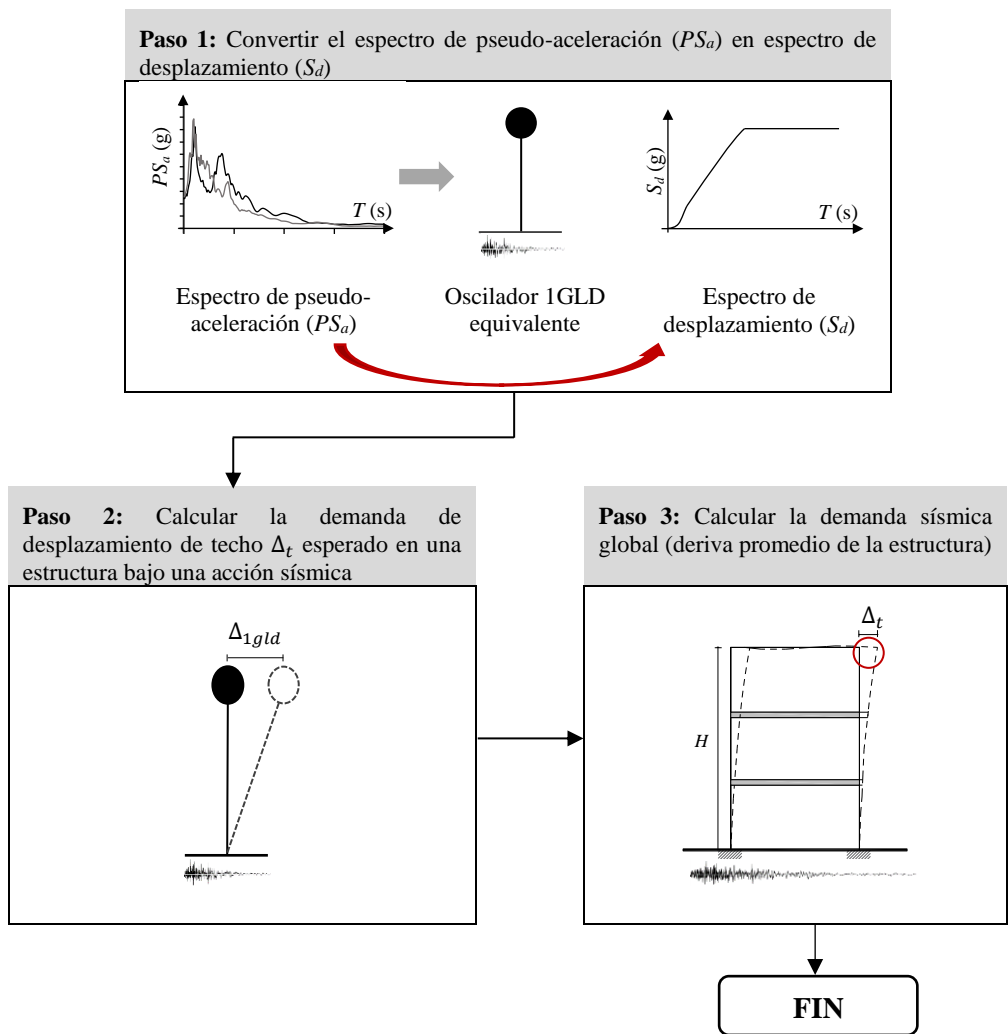


Figura 3-2. Diagrama del proceso de estimación de la deriva promedio de la estructura

A continuación, se explica el proceso para estimar la deriva promedio de la estructura.

**Paso 1:** Convertir el espectro de pseudo-aceleración ( $PS_a$ ) en espectro de desplazamiento ( $S_d$ ).

En el diseño basado en la fuerza, la aceleración espectral  $PS_a$  es el parámetro más significativo, ya que permite estimar las fuerzas estáticas equivalentes (ficticias) que generan el mismo nivel de demanda sísmica máxima que el acelerograma real. Dado que el daño está mejor correlacionado con los desplazamientos que con las fuerzas [Priestley et al., 2007], se transforma el espectro de pseudo-aceleración ( $PS_a$ ) en espectro de desplazamiento ( $S_d$ ), haciendo uso de la relación espectral descrita en la Ec. (3-1).

$$S_d(T_e, \zeta) = \left( \frac{T_e}{2\pi} \right)^2 PS_a(T_e, \zeta) \quad (3-1)$$

donde  $T_e$  es el período fundamental efectivo, es decir, es el periodo de mayor masa traslacional en la dirección de análisis. Para estimar  $T_e$ , en forma aproximada, se puede considerar los siguientes procedimientos:

1. Un análisis debidamente justificado mediante modelación, considerando en su cálculo propiedades de las secciones agrietadas.
2. Cuando el período se calcula mediante un modelo de análisis que considera secciones brutas, es decir, sin considerar la influencia del acero y la pérdida de la rigidez debido al agrietamiento del hormigón, la Norma Chilena NCh433.Of96.Mod2009/DS.61 [INN, 2011] permite determinar en forma aproximada el período fundamental efectivo como 1.5 veces el período calculado, como se muestra en la Ec. (3-2).

$$T_e = 1.5 T_1 \quad (3-2)$$

3. Fórmulas empíricas: proporcionadas en diferentes códigos de referencia internacional, por ejemplo, ASCE/SEI 7-16 [ASCE, 2016] como se muestra en la Ec. (3-3).

$$T_1 = C_t h_n^x \quad (3-3)$$

donde  $h_n$  es la altura de la estructura y los coeficientes  $C_t$  y  $x$  se determinan a partir de la información contenida en la Tabla 2-2 presentada en el Capítulo 2.

En este estudio, para obtener el periodo fundamental efectivo  $T_e$  se realiza la relación referida en la Ec. (3-4).

$$T_e = T_1 \quad (3-4)$$

Con respecto a  $PS_a$ , se caracteriza aproximadamente por el promedio de ambas ordenadas espectrales horizontales  $PS_{ax}$  y  $PS_{ay}$  en las direcciones  $x$  e  $y$  para los correspondientes períodos de mayor masa traslacional del edificio  $T_{ex}$  y  $T_{ey}$ . Dichas ordenadas se refieren a los espectros de respuesta de las componentes horizontales individuales de los acelerogramas registrados, para un amortiguamiento  $\zeta$  igual al 5% del crítico. Este parámetro se calcula según la Ec. (3-5).

$$PS_a(T_e, \zeta) = \frac{PS_{ax}(T_{ex}, \zeta) + PS_{ay}(T_{ey}, \zeta)}{2} \quad (3-5)$$

**Paso 2:** Calcular el desplazamiento máximo de techo  $\Delta_t$  esperado en una estructura bajo una acción sísmica.

En este paso del proceso se hace referencia el Método de los Coeficientes, procedimiento que se enmarca en el procedimiento de análisis estático no-lineal presentado en FEMA (273; 356; 440; 450) [FEMA, 1997; 2000; 2003; 2005] y en ASCE/SEI 41 [ASCE, 2007; ASCE, 2017]. Este

enfoque modifica la respuesta elástica lineal del sistema 1GDL (grado de libertad) equivalente, multiplicándolo por una serie de coeficientes (valores de ajuste) a efectos de inferir la respuesta inelástica máxima a nivel de techo de una estructura de múltiples grados de libertad. Los coeficientes considerados incluyen:  $C_0$ , un factor de modificación que relaciona el desplazamiento espectral de un oscilador de 1-GDL y el desplazamiento de techo elástico de una estructura de múltiples grados de libertad (N-GDL);  $C_1$ , factor que relaciona el desplazamiento inelástico máximo con el desplazamiento calculado para la respuesta elástica lineal, en un sistema de 1-GDL;  $C_2$  es un factor que toma en cuenta los efectos de degradación de rigidez, pérdida de resistencia y el estrangulamiento de los ciclos histeréticos, en la respuesta del desplazamiento máximo;  $C_3$  representa el incremento de desplazamiento, debido a los efectos  $P - \Delta$  del sistema.

En este estudio, de acuerdo la Norma Chilena NCh433.Of96.Mod2009/DS.61 [MINVU, 2011] se considera un valor de ajuste análogo, simplificado, igual a 1.3, que se obtiene como resultado de utilizar el Método de los Coeficientes a estructuras con controlada demanda de incursión inelástica. Por lo tanto, el desplazamiento máximo de techo se determina en conformidad con la Ec. (3-6).

$$\Delta_t = 1.3 S_d(T_e, \zeta) \quad (3-6)$$

donde  $S_d$  es el espectro elástico de desplazamientos, calculado de acuerdo a la Ec. (3-1) y 1.3 es el valor de ajuste análogo como resultado de utilizar el Método de los Coeficientes.

**Paso 3:** Calcular la deriva promedio de la estructura.

Para determinar el daño probable de los componentes no estructurales sensibles a la deriva de entrepiso, consiste en estimar la deriva de entrepiso promedio a lo alto del edificio (deriva global) de acuerdo a la Ec. (3-7).

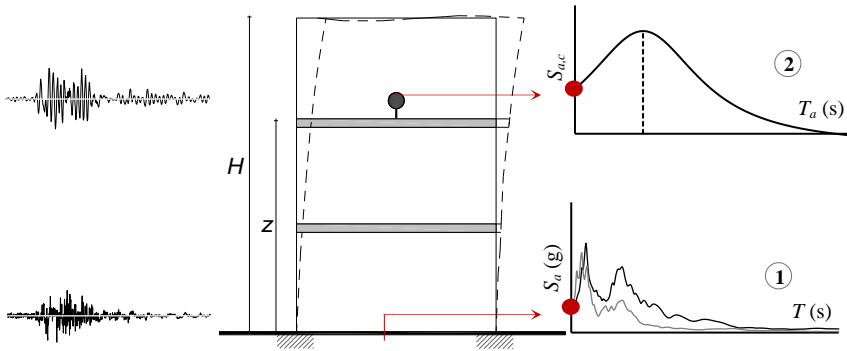
$$\bar{\delta} = \frac{\Delta_t}{H} \quad (3-7)$$

donde  $\Delta_t$  es el desplazamiento de techo de acuerdo a la Ec. (3-6) y  $H$  es la altura del edificio.

Tenga en cuenta que en el caso de requerir estimar la deriva máxima de piso, la deriva de entrepiso promedio ( $\bar{\delta}$ ) puede amplificarse dependiendo del sistema resistente estructural. Las siguientes referencias [Miranda et al., 2002; Aguiar 2007; Parra et al., 2019] entregan parámetros que relacionan la deriva máxima de piso con la deriva global de la estructura ( $\bar{\delta}$ ) de una manera simplificada.

### 3.3.2 Estimación de la aceleración máxima de piso

En este estudio, se ha considerado la propuesta presentada en el Eurocódigo 8 [CEN, 2004] para determinar la aceleración actuando sobre los componentes no estructurales, y que corresponde a la aceleración máxima de piso (PFA). En este contexto, se considera el producto de dos factores: el primero representa el efecto de los acelerogramas en el edificio y el segundo se refiere a la respuesta del edificio a dichos acelerogramas, es decir, la amplificación dinámica causada por la flexibilidad de la estructura. La Figura 3-3 ilustra gráficamente el proceso de estimación de la aceleración máxima de piso.



1. Espectros a nivel de sitio; 2. Espectros de piso

**Figura 3-3.** Ilustración del proceso de estimación de aceleración máxima de piso

El primer factor se caracteriza aproximadamente por el valor promedio de la aceleración máxima del terreno. El segundo factor, es la ordenada del espectro de piso que corresponde a la ubicación del componente no estructural en el edificio. En este estudio, se considera la formulación presentada en el Eurocódigo 8 [CEN, 2004] como se muestra en la Ec. (3-4).

$$S_{a,c} = \alpha S \left[ \frac{3 \left(1 + \frac{z}{H}\right)}{1 + \left(1 - \frac{T_a}{T_1}\right)^2} - 0.5 \right] \quad S_{a,c} \geq \alpha S \quad (3-4)$$

donde  $\alpha$  es la relación entre la aceleración máxima del terreno y la aceleración por gravedad  $g$ ;  $S$  es un factor de amplificación del suelo;  $z$  es la altura de la ubicación del componente no estructural en la estructura;  $H$  es la altura del edificio;  $T_a$  es el período del componente no estructural; y  $T_1$  es el periodo fundamental de la estructura. En este estudio, los parámetros  $\alpha$  y  $S$  son reemplazados por el valor promedio de la aceleración máxima del terreno como se muestra en la Ec. (3-5).

$$\overline{PGA} = \frac{PGA_x + PGA_y}{2} \quad (3-5)$$

donde  $PGA_x$  y  $PGA_y$  es la aceleración máxima de las dos componentes de las ordenadas espectrales de aceleración ( $S_a$ ) en ambas direcciones horizontales.

En lo que respecta a  $z$ , se distinguen dos situaciones: las instalaciones se distribuyen a lo largo de toda la altura del edificio, o en planta cubierta. En el primer caso, se toma la altura promedio ( $z = H / 2$ ). En el segundo caso, obviamente, se selecciona dicho nivel ( $z = 1$ ). Cuando el componente no estructural se encuentra a nivel de terreno, se obtiene el valor de la aceleración del suelo  $PGA$ . Además, al considerar  $T_a$  igual a cero ( $T_a = 0$ ), se obtiene directamente el valor de  $PFA$ . En consecuencia, en este estudio para estimar el  $PFA$  se realiza la relación referida en la Ec. (3-6).

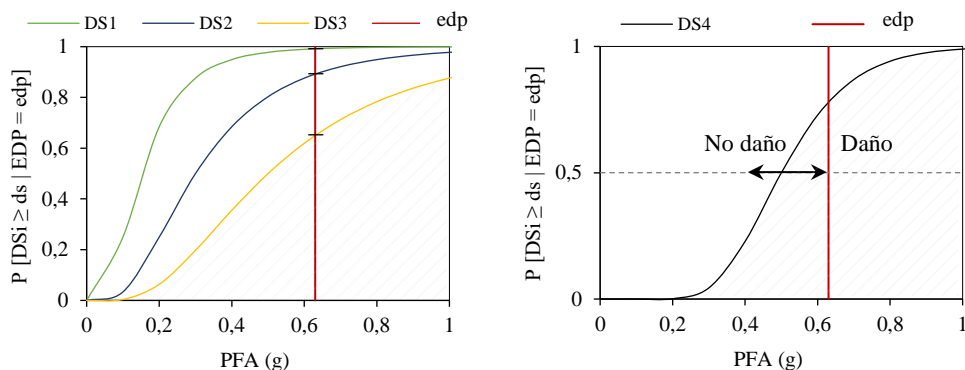
$$S_{a,c} = PFA \quad (3-6)$$



### 3.4 Evaluación del daño probable

Como se describe en el Capítulo 1 (subapartado 1.1.3), las curvas de fragilidad están definidas por una función densidad de probabilidad lognormal acumulada con parámetros  $x_m$  y  $\beta$  (mediana y desviación estándar logarítmica, respectivamente). Cada curva de fragilidad representa la probabilidad que el sistema resistente estructural o un componente y sistema no estructural alcance o exceda distintos niveles de daño, desde sin daño ( $DS_0$ ) hasta daño completo ( $DS_4$ ).

En este estudio, se considera dos escenarios para anticipar el daño probable: i) cuando un determinado sistema resistente estructural o un componente no estructural tiene varias curvas de fragilidad sísmica, se considera el estado de daño que exhibe la mayor probabilidad de ocurrencia para un determinado nivel de demanda sísmica (desplazamiento espectral, derivas de entrepisos y aceleraciones de piso o del suelo); y ii) cuando el componente y sistema no estructural tiene una sola curva de fragilidad se considera que si la demanda sísmica alcanza o excede el valor de la demanda media (50%) que detona el daño, se producirá el daño, en caso contrario, se considera que no se ha alcanzará el nivel de daño caracterizado por la curva de fragilidad. Gráficamente, considerando como referencia el valor de la demanda media que produce el daño, si el valor de la demanda sísmica se ubica a la izquierda significa que no se producirá el daño, caso contrario significa que se detonará daño. La Figura 3-4 ilustra la interpretación de las curvas de fragilidad en los dos escenarios considerados.



Probabilidades de alcanzar daños:  $DS_0 = 0.83\%$ ;  $DS_1 = 9.97\%$ ;  $DS_2 = 24.2\%$ ;  $DS_3 = 65.0\%$ ;  $DS_4 = 0\%$

Daño máximo probable:  $DS_{probable} = DS_3$

a) Fragilidad sísmica para componentes con varias curvas de fragilidad

Probabilidades de alcanzar daños:  $DS_0 = 20.0\%$ ;  $DS_4 = 80\%$

Daño máximo probable:  $DS_{probable} = DS_4$

b) Fragilidad sísmica para componentes con una sola curva de fragilidad

Figura 3-4. Escenarios para anticipar el daño probable

## 4 CASOS DE ESTUDIO

Este capítulo está orientado a proporcionar información relevante de los diecisiete hospitales estudiados. Los hospitales han sido seleccionados por su comportamiento durante eventos sísmicos anteriores, en los cuales se observó desde colapso global hasta respuesta completamente funcional, así como por la repercusión en la modificación de las normativas de referencia internacionales. Esta información es empleada en la calibración de la herramienta automatizada propuesta.

Desafortunadamente, existe información limitada acerca del desempeño funcional de hospitales durante otros eventos sísmicos importantes, no pudiendo ser descrita en este capítulo. Los casos de estudio se encuentran localizados en diferentes partes del mundo, comprende desde experiencias pasadas como el terremoto  $M_w$  6.6 de San Fernando (Estados Unidos, 1971) hasta eventos sísmicos actuales como el terremoto  $M_w$  7.1 de Puebla (México, 2017).

Para su mejor comprensión, este capítulo se ha organizado en dos apartados. Por una parte, se describe los aspectos relevantes de los casos de estudio, comprende una síntesis general de los edificios hospitalarios analizados. Además, proporciona información como: principales características de los hospitales analizados, movimientos sísmicos que generaron los daños observados, acelerogramas registrados y daños observados en los componentes y sistemas no estructurales.

- 4 CASOS DE ESTUDIO
- 4.1 Aspectos relevantes considerados en el estudio de casos reales
- 4.2 Análisis de casos reales

Por otro lado, se presenta un análisis de todos los casos de estudio, mostrando información destacada en cada una de las infraestructuras hospitalarias. La primera parte comprende: i) vistas generales del hospital, uso de fotografías, planos y/o esquemas generales; ii) distancia entre la fuente y la estación sismológica de referencia; y iii) excitación sísmica de cada caso de estudio. Todo esto en relación a lo explicado en el Capítulo 2 (subapartados 2.2.1 y 2.2.2). La segunda parte, con ayuda de fotografías y Anejo C, describe los daños del hospital analizado (bloque individual) tanto en sus elementos estructurales como componentes y sistemas no estructurales. La Figura 4-1 ilustra la localización de los 13 eventos sísmicos de los 17 casos de estudio.

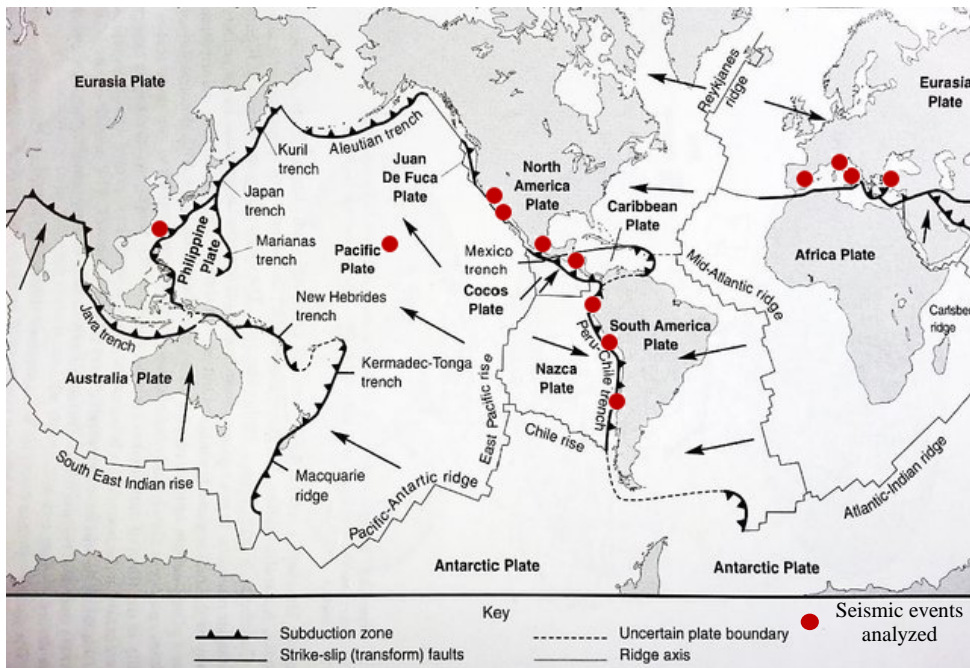


Figura 4-1. Localización de eventos sísmicos de los casos de estudio [Fowler, 1990]

## 4.1 Aspectos relevantes considerados en el estudio de casos reales

En este apartado se describe la información relevante requerida en el estudio de casos reales. El subapartado 4.1.1 resume los criterios de selección de casos de estudio, mientras que el subapartado 4.1.2 describe la información de los registros sísmicos seleccionados, correspondientes a cada hospital analizado.

### 4.1.1 Criterios de selección de casos de estudio

Durante el terremoto  $M_w$  6.6 de San Fernando (Estados Unidos, 1971), varios hospitales presentaron daños entre extenso y completo, por lo que no brindaron servicios a las personas afectadas ante la situación de emergencia. Entre los hospitales afectados, se tiene al emblemático Hospital Olive View. El daño fue casi catastrófico, las columnas de las dos plantas bajas generalmente fallaron en cizalle. En las plantas superiores se observó menores daños estructurales. No obstante, se visualizó una gran cantidad de grietas y daño en componentes y

sistemas no estructurales [Chopra et al., 1973; Benfer y Coffman, 1973; Mahin et al., 1976; PAHO, 2000a; Jankowski, 2009; FEMA, 2007; Guevara, 2014]. A partir de este evento sísmico, los criterios de diseño se modificaron, puntualmente en hospitales. En consecuencia, se desarrolló la primera Ley de Seguridad Sísmica del Hospital “*Hospital Seismic Safety Act*” [CSSC, 2001], enfocándose únicamente en la resistencia estructural.

Sin embargo, con el terremoto  $M_w$  6.7 de Northridge (Estados Unidos, 1994) nuevamente se observaron deficiencias en el diseño de hospitales. El nuevo edificio del Hospital Olive View, diseñado en forma conservadora en 1976 en el mismo lugar del antiguo Hospital Olive View, fue dotado con una capacidad resistente a cargas laterales. Para ello, el nuevo Hospital Olive View fue diseñado con una estructura de muros de corte de hormigón armado en las dos plantas inferiores y muros de corte de acero en las cuatro plantas superiores. Dicho hospital durante el terremoto de 1994, no evidenció daños estructurales. No obstante, exhibió daños entre extenso a completo en sus elementos arquitectónicos, instalaciones, equipos médicos y contenidos. En particular, en elementos arquitectónicos interiores como desprendimiento de falso techo. Daño en la instalación contra incendios desde la tercera hasta la última planta (interacción entre las placas del falso techo con los rociadores) produciéndose fuga de agua. Daños a algunos equipos, en particular en anclajes tanto en la Planta Central como en el depósito de oxígeno. Asimismo, daños en ascensores, algunos exhibieron daños severos (rieles de contrapeso descarrilados y doblados), entre otros [Goltz, 1994; Reitherman et al., 1995; Shakal et al., 1995; Çelebi, 1997; FEMA, 2007]. Demostrando de esta manera que la Ley protegía a los elementos estructurales, pero no suficientemente a los componentes y sistemas no estructurales, en consecuencia, se amplió para incluirlos y se denominó Proyecto de Ley del Senado “*Senate Bill*” SB 1953 [1994].

En el terremoto  $M_w$  7.6 de Kocaeli (Turquía, 1999), el Hospital Adapazari SSK exhibió grietas en las columnas y en las paredes de mampostería. Respecto a los componentes y sistemas no estructurales, se evidenció pérdida de energía eléctrica. Sin embargo, la energía suministrada por el generador de emergencia SAI (sistema de alimentación ininterrumpida) fue suficiente durante unas 11 horas aproximadamente. El sistema de suministro de agua no presentó daños, sin embargo, el sistema de saneamiento exhibió algunas rupturas. La instalación de comunicaciones quedó ininterrumpida. Algunas botellas de reserva de oxígeno se cayeron al no contar con anclajes de sujeción, sin embargo, no provocaron daño alguno. En los quirófanos y en algunas salas, varios monitores instalados en estanterías cayeron al piso. De igual forma, varias estaciones de enfermeras se deslizaron [Tang, 2000; Pickett, 2003; Achour, 2007]. Producto de este evento sísmico el hospital analizado limitó sus servicios, es decir, hospital parcialmente funcional. De manera similar, ocurrió en el terremoto  $M_w$  7.7 de Chi-Chi (Taiwán, 1999) el Hospital Shiu – Tuan, de pórticos de hormigón armado no exhibió daño estructural. No obstante, los daños en los componentes y sistemas no estructurales, específicamente, en instalaciones y en equipos médicos fueron determinantes para requerir la evacuación del hospital en su totalidad [Soong et al., 2000a; Soong et al., 2000b; Lee and Loh, 2000]. Se originan en este sentido una base de normas más estrictas, tanto a nivel estructural como en componentes y sistemas no estructurales.

Durante los terremotos de El Salvador de enero y febrero de 2001,  $M_w$  7.7 y 6.6, respectivamente, gran parte del sistema nacional de salud presentó daños que causaron la pérdida de función, en consecuencia, evacuación de los principales hospitales ubicados cerca de la zona epicentral. La pérdida de función se debió en la mayoría de los hospitales a daños en componentes y sistemas no estructurales. Por ejemplo, el Hospital Nacional San Rafael presentó daños, puntualmente en los muros de relleno de mampostería y desprendimiento de revestimientos en las fachadas. En el interior del edificio, se evidenció la caída de falso techo y de vidrios. Además, se visualizó vuelco de las botellas de reserva de gases médicos (falta de elementos de fijación) [Boroschek, 2001; OPS, 2001; Boroschek, 2004]. De modo similar, en el terremoto  $M_w$  6.7 de Hawái (2006), en el Hospital de la Comunidad de Kona, el daño no estructural fue principalmente en falsos techos y particiones. Dichos daños se atribuyen fundamentalmente a la falta de arriostres y anclajes

sísmicos. Algunas placas del falso techo cayeron, aparentemente, ninguna lámpara cayó del techo por completo (lámparas parcialmente giradas). El daño en particiones consistió en la presencia de muchas grietas, puntualmente alrededor de algunos marcos de puertas. El hospital recuperó la función (100%) aproximadamente después de dos semanas [RMS, 2006; Chock et al., 2006; EERI, 2006; FEMA, 2007].

De igual forma, durante el terremoto  $M_w$  8.0 de Pisco (Perú, 2007), en el Hospital Regional de Ica colapsaron sus componentes y sistemas no estructurales. Se evidenció mayor daño en los elementos arquitectónicos tales como acabados, mampostería, entre otros. Respecto a las instalaciones, el daño en tuberías fue entre extenso a completo, y el equipo médico, gran parte (quirúrgico) quedó inutilizado, incluyendo camas. No obstante, el servicio de emergencia continuó funcionando [EERI, 2007; Loaiza, 2007; Hopkins et al., 2008; OPS, 2010]. Estos tres últimos casos de estudio continúan evidenciando que existió un diseño sísmico limitado para proteger los componentes y sistemas no estructurales, la función o la inversión de los hospitales. Además, las prácticas deficientes de construcción contribuyeron en la causa de la pérdida de función en los hospitales.

En el terremoto  $M_w$  6.3 de L'Aquila (Italia, 2009), el Hospital San Salvatore debió ser completamente evacuado debido a los daños en varios bloques del hospital, tanto en sus elementos estructurales como componentes y sistemas no estructurales. El hospital exhibió un daño estructural de falla de corte de algunas columnas en la planta baja que comprende el pórtico de entrada principal y la entrada de emergencia. No obstante, presentaron una falla parcial sin colapso en la parte superior. El daño no estructural presentado fue extenso. Respecto a los componentes no estructurales, se observó en la envolvente (última planta), el desprendimiento parcial a completo (colapso denominado “fuera del plano”) del sistema de fachada, bloqueando la entrada al servicio de emergencia. Algunos equipos de climatización no habían sido anclados y estaban ligeramente deslizados, pero en funcionamiento. El equipo médico, exhibió daños menores, no obstante, cayeron escombros sobre las camas. Algunas botellas de gas médico rodaron de su posición inicial (no estaban sujetas con cadenas). Se observó un ligero movimiento en estanterías y contenidos de oficina, pero sin daño evidente [Rossetto et al., 2009; Cimellaro et al., 2010; Rossetto et al., 2011; Price et al., 2012].

En el terremoto del Maule  $M_w$  8.8 (Chile, 2010), 84 Establecimientos de Salud, de 135 ubicados en el área epicentral, presentaron algún nivel de daño. De estos hospitales, 51 continuaron con su funcionamiento sin mayores problemas, 17 resultaron completamente inhabilitados, 62 de ellos presentaron daños severos y 5 hospitales resultaron con daños estructurales considerables: Talca, Curicó, Hualañé, Constitución y Parral [Minsal, 2010]. Se analiza el Hospital Dr. Guillermo Grant Benavente “La Torre de Pacientes Críticos”. Es importante indicar, que un edificio del Hospital Dr. Guillermo Grant Benavente (adyacente al edificio de La Torre de Pacientes Críticos) inaugurado 15 días antes del terremoto, no presentó ningún daño, pese que se encontraba en la zona epicentral, debido a un adecuado diseño tanto en los elementos estructurales como componentes y sistemas no estructurales. El diseño estructural, es un sistema mixto de muros y pórticos de hormigón armado, permitiendo acoger las dependencias del otro edificio (La Torre), el cual evidenció daños. A continuación, se explican los dos casos de estudio afectados durante el terremoto del Maule 2010.

La Torre de Pacientes Críticos, construida en 1990, conocida como La Torre HGGB, exhibió daños estructurales de carácter leve en su estructura resistente. Sin embargo, se evidenció un gran daño en los componentes y sistemas no estructurales, especialmente en el interior del hospital, tales como fisuras/grietas en las particiones, caída del falso techo, e instalaciones (gas y electricidad no presentaron mayores problemas). Esta situación, generó polvo en suspensión, sumado a la ruptura de tuberías en instalaciones de agua, saneamiento, el cual produjo inundación en las primeras plantas, en consecuencia, hospital evacuado [DICTUC S.A., 2010; Villouta, 2010;

Minsal, 2010]. Por otro lado, en Chile se produjo en muchos sitios la licuefacción del suelo, que provocó daños severos en el Hospital de Curanilahue inaugurado en el año 2008, consta de 10 bloques estructuralmente independientes con alturas que varían de una a seis plantas. Se observaron desplazamientos permanentes de sus bloques, asentamientos del suelo y distorsión (el bloque central de 6 plantas, el cual fue el más afectado). Se analiza el Bloque B (menos afectado), el daño no estructural se limitó en gran medida a las particiones interiores y falso techo. Las instalaciones con mayor afectación fueron sistemas de agua potable, saneamiento, electricidad, grupos electrógenos, gases médicos y seguridad. No se evidenció daño en las instalaciones que cruzan las distintas alas (flexibilidad en los sistemas) [Bray and Frost, 2010; Minsal, 2010; Servicio de salud Arauco [2010, 2011a y 2011b]. En este contexto, se puede decir que este terremoto marcó un precedente importante en las normativas de referencia internacionales. Actualmente existe una Norma Técnica NCh3357: “Diseño sísmico de componentes y sistemas no estructurales” [INN 2015], que establece los criterios mínimos de diseño sísmico que deben satisfacer los anclajes de equipos y otros componentes no estructurales.

Durante el terremoto  $M_w$  5.1 de Lorca (España, 2011), el Hospital Rafael Méndez, no exhibió daños estructurales. No obstante, en los elementos arquitectónicos exteriores exhibió pequeñas fisuras en la mampostería y en el sistema de acristalamiento. En los componentes arquitectónicos interiores, el daño se localizó en algunas particiones y en el falso techo. Se observó un daño moderado en determinadas zonas, ocasionando daño en algunas instalaciones. Respecto al daño en el equipo médico, en un quirófano se observó una ligera fisura en la conexión de la lámpara quirúrgica. La mayoría de las conexiones del equipo médico evidenció daño ligero, sin comprometer su funcionamiento. Los depósitos de gases médicos no presentaron daño visible. De acuerdo a los informes técnicos y fotografías, no existieron zonas obstaculizadas por contenidos, es decir, no se apreció daño en estanterías, mobiliario, entre otros [FCC Construcción, 2009; Cabañas et al., 2011; Goula et al., 2011a; Goula et al., 2011b; Carreño et al., 2012; Valcárcel, 2013].

El terremoto  $M_w$  6.0 de Emilia (Italia, 2012), afectó al Hospital Santa María Bianca, construido entre 1990 y 2000, y conformado por 25 bloques independientes, se analiza el edificio de Servicios Generales. El hospital no exhibió daños estructurales evidentes. No obstante, los daños en los componentes y sistemas no estructurales limitaron la función del hospital. En los elementos arquitectónicos exteriores se observó colapso en los acabados, puntualmente los ubicados en la última planta. En el equipo de climatización, se observó deslizamientos respecto a su posición inicial. De acuerdo a los informes técnicos, el edificio experimentó mayor agitación en las plantas superiores, de hecho, el daño en contenidos fue generalmente alto. Asimismo, se observó en algunas zonas del hospital caída total de los archivadores y estanterías, en consecuencia, bloqueando la salida de las oficinas y también una de las salidas de emergencia del edificio [Masi et al., 2013].

En un evento sísmico reciente como el terremoto  $M_w$  7.8 de Muisne (Ecuador, 2016), seis hospitales generales ubicados en la zona epicentral (Provincia de Manabí) presentaron algún tipo de daño. Por ejemplo, únicamente un hospital permaneció funcional (Hospital IESS Portoviejo), otro hospital permaneció parcialmente funcional (Hospital SOLCA Portoviejo), otro hospital con daños menores, sin embargo, evacuado (Hospital Rodríguez Zambrano) y tres hospitales exhibieron daños entre extenso y completo, en consecuencia, fueron evacuados y demolidos (Hospital Miguel Hilario Alcívar, Hospital General de Chone Dr. Napoleón Dávila Córdova y Hospital IESS Manta). A continuación, se explican los cuatro casos de estudio.

El Hospital Miguel Hilario Alcívar, edificio reforzado tras el terremoto de 1998, hospital evacuado. Daño estructural aparentemente leve en su sistema resiste estructural de muros de corte de hormigón armado, además, exhibió ligeras fisuras en las columnas en planta baja y desprendimiento de acabados. Sin embargo, se observó daño no estructural entre extenso a

completo en la mampostería localizada en las dos primeras plantas inferiores, ocasionando daño en las instalaciones. Asimismo, exhibió daño en el sistema de falso techo, acabados, acristalamiento, etc. Además, existió daño moderado en equipos médicos y contenidos, ubicados en las dos plantas inferiores [Nikolaou et al., 2016; Lanning et al. 2016a; Tola y Tech, 2016; Aguiar, 2016a; SOLEICO S.A., 2016; Morales, 2017]. En contraste con el Hospital General de Chone Dr. Napoleón Dávila Córdova, el edificio exhibió daños moderados en el sistema resistente de pórticos de hormigón armado con paredes de relleno de mampostería sin refuerzo. Además, se produjo impacto entre los edificios, juntas aproximadamente de 50.8 mm (2”) de espesor (separación insuficiente entre edificios y diferencias respecto a las alturas, en consecuencia, se evidenció la amplificación de los efectos dañinos de impacto). Respecto a los componentes y sistemas no estructurales el daño fue extenso a completo, puntualmente en los muros de mampostería, instalaciones (equipos eléctricos, mecánicos y sistemas de distribución), caída de escombros sobre equipos médicos y contenidos [Lanning et al., 2016; Tola y Tech, 2016; Morales, 2017].

El Hospital IESS Manta, sistema resistente de pórticos de hormigón armado con paredes de relleno de mampostería sin refuerzo. En los elementos estructurales (vigas y columnas) se observó pequeñas grietas diagonales, localizadas en su mayoría en el nudo de viga-columna. A pesar, que el daño en los elementos estructurales fue de leve a moderado, el daño en los componentes no estructurales fue extenso a completo, lo que ocasionó una evacuación total del edificio. Los principales daños fueron por la caída de la mampostería de ladrillo tanto en los exteriores como interiores; existiendo una combinación de daños tanto fuera del plano como en el plano. La mayoría de las paredes interiores se caracterizaban por ser de altura parcial y no estaban fijas en ninguna dirección horizontal. Asimismo, se evidenció que el sistema de acristalamiento contaba con vidrios de seguridad. No obstante, no fueron diseñados para la deriva sísmica. Gran parte del sistema del falso techo cayó parcial o completamente, no se observaron arriostres laterales. Daño extenso a completo en conductos de climatización, tuberías en general, cables eléctricos y de comunicación, equipos médicos, contenidos, entre otros. Se evidenció la ausencia y/o inadecuado anclaje o fijación en los componentes no estructurales [Aguiar, 2016b; Lanning et al. 2016a; Tola and Tech, 2016; Nikolaou et al., 2016; Morales, 2017].

El Hospital Rodríguez Zambrano, con un sistema resistente estructural de pórticos de hormigón armado no exhibió daños aparentes. No obstante, en los componentes y sistemas no estructurales exhibió un daño entre leve a moderado en las dos plantas bajas. El daño se centró en algunas paredes interiores no estructurales, se apreció grietas diagonales y de tensión diagonal (unas pocas paredes). Se observó desprendimiento del revestimiento de algunas particiones. Daño menor respecto a los falsos techos. En la quinta planta se exhibió un ligero desplazamiento de la escalera de emergencia de hormigón armado respecto al sistema resistente del edificio. Daño leve en equipos médicos, no obstante, continuaron en operación. En la sexta planta alta (adición de estructura metálica), algunas paredes interiores presentaron un daño completo. Además, en esta planta se produjo inundación, a causa del daño de la instalación del equipo de hemodiálisis [Nikolaou et al., 2016; Aguiar et al. 2016].

Finalmente, otro evento sísmico reciente como el terremoto  $M_w$  7.1 de Puebla (México, 2017), el Hospital de Gineco Obstetricia N.-3, de sistema resistente estructural de pórticos de hormigón armado no exhibió daños visibles. Sin embargo, el daño en elementos no estructurales fue leve, principalmente en particiones interiores, falso techo y revestimientos. Las particiones (mampostería de ladrillo) presentaron pequeñas fisuras. Los ascensores continuaron en funcionamiento, y los paneles prefabricados de la fachada exhibieron ligeros movimientos, debido aparentemente a las conexiones oxidadas [ROMACO, 2017].

### 4.1.2 Registros sísmicos seleccionados

Este subapartado describe, las principales características de los hospitales analizados, las acciones sísmicas que les afectaron y los daños que se produjeron, de acuerdo a las consideraciones descritas en el Capítulo 2 (subapartados 2.2.1 y 2.2.2). Esta información se utiliza en la calibración de la herramienta automatizada propuesta.

La Tabla 4-1 resume las características de los movimientos sísmicos que produjeron los daños observados en los hospitales descritos. El año (se refiere a la construcción o diseño). Se considera, la regularidad en planta, regularidad en alzado, configuración irregular (habitualmente en planta), planta baja blanda, columnas cortas y el riesgo de impacto. Finalmente, tanto la clasificación del tipo de suelo como la estimación del período fundamental de la estructura; en las dos o una dirección horizontal del edificio (x, y), es de acuerdo a la normativa americana ASCE/SEI 7-16 [2016].

**Tabla 4-1.** Principales características de los hospitales analizados

| País (ciudad)                | Año  | Plantas/<br>altura<br>(m) | Regularidad<br>(plan./alz.) | Config.<br>irreg. | Planta<br>baja<br>blanda | Columnas<br>cortas | Riesgo<br>de<br>impacto | Tipo<br>de<br>suelo | Per.<br>fund.<br>(s) |
|------------------------------|------|---------------------------|-----------------------------|-------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|
| EEUU<br>(Sylmar)             | 1965 | 6/18.5                    | SÍ/SÍ                       | SÍ                | SÍ                       | NO                 | SÍ                      | C                   | 0.44/<br>0.64        |
| EEUU<br>(Sylmar)             | 1976 | 6/29.1                    | SÍ/SÍ                       | NO                | NO                       | NO                 | NO                      | C                   | 0.60                 |
| Turquía<br>(Adazapari)       | 1985 | 6/20.2                    | NO/SÍ                       | NO                | NO                       | NO                 | SÍ                      | B                   | 0.46                 |
| Taiwán<br>(Nantou)           | 1997 | 9/30                      | NO/SÍ                       | NO                | NO                       | NO                 | NO                      | C                   | 0.99/<br>0.63        |
| El Salvador<br>(El Salvador) | 1990 | 6/18.5                    | SÍ/NO                       | SÍ                | NO                       | NO                 | SÍ                      | D                   | 0.64                 |
| EEUU<br>(Hawái)              | 1972 | 3/ 9.5                    | NO/NO                       | SÍ                | NO                       | NO                 | SÍ                      | C                   | 0.35                 |
| Perú (Ica)                   | 1964 | 4/13.18                   | NO/NO                       | SÍ                | NO                       | SÍ                 | SÍ                      | D                   | 0.34                 |
| Italia<br>(L'Aquila)         | 1980 | 3/10.40                   | NO/NO                       | SÍ                | SÍ                       | NO                 | SÍ                      | C                   | 0.38                 |
| Chile<br>(Concepción)        | 1984 | 6/21.9                    | NO/SÍ                       | NO                | NO                       | SÍ                 | NO                      | C                   | 0.49                 |
| Chile<br>(Curanilahue)       | 2007 | 5/17.30                   | NO/SÍ                       | NO                | NO                       | NO                 | SÍ                      | D                   | 0.62                 |
| España<br>(Lorca)            | 1990 | 4/12.6                    | NO/NO                       | SÍ                | SÍ                       | NO                 | SÍ                      | D                   | 0.46                 |
| Italia<br>(Mirandola)        | 1990 | 4/14.2                    | NO/SÍ                       | SÍ                | NO                       | NO                 | SÍ                      | D                   | 0.51                 |
| Ecuador<br>(Bahía)           | 1999 | 5/14.25                   | SÍ/SÍ                       | NO                | NO                       | SÍ                 | SÍ                      | D                   | 0.51/<br>0.36        |
| Ecuador<br>(Chone)           | 1982 | 7/21.6                    | NO/NO                       | SÍ                | NO                       | SÍ                 | SÍ                      | D                   | 0.74/<br>0.49        |
| Ecuador<br>(Manta)           | 1970 | 4/16                      | NO/SÍ                       | NO                | NO                       | NO                 | NO                      | D                   | 0.39/<br>0.57        |
| Ecuador<br>(Manta)           | 1984 | 7/21.6                    | SÍ/NO                       | NO                | NO                       | SÍ                 | SÍ                      | C                   | 0.74/<br>0.49        |
| México D.F.                  | 1963 | 7/23.4                    | NO/NO                       | NO                | NO                       | NO                 | NO                      | D                   | 0.80/<br>0.52        |



La Tabla 4-2 presenta los datos generales del terremoto y de la estación sismológica más próxima al hospital analizado. Se seleccionan entradas sísmicas representativas obtenidas a partir de referencias especializadas. Variables como nombre del terremoto, fecha y magnitud han sido obtenidas del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) [USGS, 2017]. La siguiente información como nombre de la estación sismológica,  $R_{rup}$  (km) distancia de ruptura (más cercana),  $v_{s,30}$  (m/s) velocidad de las ondas de corte ( $S$ ) en los primeros 30 m de profundidad y tipo de suelo corresponden a las siguientes referencias.

- Para eventos sísmicos de San Fernando (1971), Northridge (1994), Kocaeli (1999), Chi-Chi (1999), L'Aquila (2009) es de acuerdo a la base de datos de Pacific Earthquake Engineering Research Center [PEER, 2017].
- Terremoto de El Salvador (2001) es según la información brindada por el Departamento de Mecánica Estructural de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, El Salvador, Centro América, Red acelerométrica [UCA, 2001].
- Terremoto de Hawái (2006), es de acuerdo a la base de datos Strong-Motion Virtual Data Center [VDC, 2006] y  $v_{s,30}$  (m/s) de acuerdo a [Wong et al., 2015].
- Terremoto de Pisco (2007), información obtenida desde Japan-Peru Center for Earthquake Engineering Research and Disaster Mitigation [CISMID, 2007].
- Terremoto del Maule (2010), de acuerdo al Servicio Sismológico del Departamento de Geofísica [GUC, 2010], Red Nacional de Acelerógrafos del Departamento de Ingeniería Civil [RENADIC, 2010], para el caso de estudio en Concepción y Curanilahue, respectivamente. La información de  $v_{s,30}$  (m/s) y  $R_{rup}$  (km) distancia de ruptura, es de acuerdo a lo citado en [Boroschek et al., 2012].
- Terremoto de Lorca (2011), de acuerdo a la red acelerométrica del Instituto Geográfico Nacional [IGN, 2011] y  $v_{s,30}$  (m/s) de acuerdo a [Goula et al., 2011b].
- Terremoto Emilia (2012), de acuerdo a la base de datos de Italian Strong Motion Network [RAN, 2012]. Tipo de suelo de acuerdo a lo citado en [Lai et al., 2012].
- Terremoto de Muisne (2016), de acuerdo a la base de datos de la Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC) del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN) [RENAC, 2016]. La  $v_{s,30}$  (m/s) y  $R_{rup}$  (km) distancia de ruptura, de acuerdo a lo citado en [Nikolaou et al., 2016].
- Terremoto de Puebla (2017), de acuerdo a la base de datos de la Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería de la UNAM [RAII-UNAM, 2017].

**Tabla 4-2.** Movimientos sísmicos que generaron los daños observados

| País (Terremoto)          | Fecha      | $M_w$ | Profundidad hip. (km) | Estación    | $R_{rup}$ (km) | $v_{s,30}$ (m/s) | Tipo de suelo <sup>a</sup> |
|---------------------------|------------|-------|-----------------------|-------------|----------------|------------------|----------------------------|
| EEUU (San Fernando)       | 02/09/1971 | 6.6   | 8.9                   | Pacoima Dam | 1.81           | 2016             | A                          |
| EEUU (Northridge)         | 17/01/1994 | 6.7   | 18.2                  | Olive View  | 5.3            | 440              | C                          |
| Turquía (Kocaeli)         | 17/08/1999 | 7.6   | 17                    | Izmit       | 7.21           | 811              | B                          |
| Taiwán (Chi-Chi)          | 20/09/1999 | 7.7   | 33                    | CHY080      | 2.69           | 496              | C                          |
| El Salvador (El Salvador) | 13/01/2001 | 7.7   | 60                    | HSRF        | 83             | -                | D                          |
| EEUU (Hawái)              | 15/10/2006 | 6.7   | 38.9                  | KeaLakekua  | -              | 450              | C                          |
| Perú (Pisco)              | 15/08/2007 | 8.0   | 39                    | ICA2        | 36.9           | 250              | D                          |
| Italia (L'Aquila)         | 06/04/2009 | 6.3   | 8.8                   | AQV         | 6.27           | 475              | C                          |
| Chile (Maule)             | 27/02/2010 | 8.8   | 22.9                  | CCSP        | 34–35          | 390              | C                          |
|                           |            |       |                       | CONC        | 34–35          | 230              | D                          |
| España (Lorca)            | 11/05/2011 | 5.1   | 1.0                   | Lorca       | -              | 360              | C                          |
| Italia (Emilia)           | 20/05/2012 | 6.0   | 6.3                   | RAN - MRN   | -              | -                | D                          |
| Ecuador (Muisne)          | 16/04/2016 | 7.8   | 20.6                  | ACHN        | 34             | 200              | D                          |
|                           |            |       |                       | AMNT        | 76             | 496              | C                          |
| México (Puebla)           | 19/09/2017 | 7.1   | 48                    | SCT B-2     | -              | -                | D                          |

<sup>a</sup> Clasificación de acuerdo a ASCE/SEI 7-16 [2016]

La Tabla 4-3 resume información de los acelerogramas registrados en las estaciones sismológicas de referencia. Los acelerogramas han sido analizados con el programa SeismoSignal [SeismoSoft, 2016]. El parámetro  $I_A$  es la intensidad de Arias [Arias, 1970], "Pulso" se refiere a la relevancia de los pulsos de velocidad (efectos de proximidad de falla o de directividad) y la duración significativa corresponde al intervalo entre el 5% y el 95% de la intensidad de Arias [Trifunac y Brady, 1975].

Además, los registros sísmicos de tres hospitales han sido corregidos, de acuerdo al apartado 3.3. Se ha considerado dos escenarios: i) cuando la estación sismológica corresponde a un tipo de suelo diferente o tiene una profundidad de lecho rocoso distinta a la del hospital en estudio. Por ejemplo, Hospital Olive View (Terremoto 1971, Estados Unidos) y Hospital IESS (Terremoto 2016, Ecuador). La información del perfil del suelo tanto para el caso de estudio para Estados Unidos como para el caso de estudio en Ecuador, se resume en el Anejo C; y ii) cuando la estación sismológica más cerca al hospital analizado se encuentra a una distancia significativa (más de 70 km), se corrige mediante Ley de Atenuación propia del sitio. Por ejemplo, Hospital de Curanilahue (Chile 2010), el subapartado 2.2 resume la información de la Ley de Atenuación considerada para este caso de estudio.

**Tabla 4-3.** Acelerogramas registrados

| País (Terremoto)          | Componente horizontal 1 |                      |       |                            | Componente horizontal 2 |                      |       |                            | Componente vertical |                      |       |                            |
|---------------------------|-------------------------|----------------------|-------|----------------------------|-------------------------|----------------------|-------|----------------------------|---------------------|----------------------|-------|----------------------------|
|                           | PGA (g)                 | I <sub>A</sub> (m/s) | Pulso | Duración significativa (s) | PGA (g)                 | I <sub>A</sub> (m/s) | Pulso | Duración significativa (s) | PGA (g)             | I <sub>A</sub> (m/s) | Pulso | Duración significativa (s) |
| EEUU (San Fernando)       | 1.22 <sup>a</sup>       | 8.95 <sup>a</sup>    | SÍ    | 7.02 <sup>a</sup>          | 1.24 <sup>a</sup>       | 8.15 <sup>a</sup>    | SÍ    | 7.26 <sup>a</sup>          | 0.69 <sup>a</sup>   | 4.28 <sup>a</sup>    | SÍ    | 6.84 <sup>a</sup>          |
|                           | 0.47 <sup>b</sup>       | 1.30 <sup>b</sup>    | SÍ    | 7.02 <sup>b</sup>          | 0.81 <sup>b</sup>       | 3.51 <sup>b</sup>    | SÍ    | 7.26 <sup>b</sup>          | 0.30 <sup>b</sup>   | 0.81 <sup>b</sup>    | SÍ    | 6.84 <sup>b</sup>          |
| EEUU (Northridge)         | 0.60                    | 2.60                 | SÍ    | 6.80                       | 0.84                    | 5.01                 | SÍ    | 5.32                       | 0.54                | 1.14                 | SÍ    | 8.44                       |
| Turquía (Kocaeli)         | 0.23                    | 0.81                 | NO    | 13.27                      | 0.17                    | 0.56                 | NO    | 15.07                      | 0.15                | 0.5                  | NO    | 16.72                      |
| Taiwán (Chi-Chi)          | 0.28                    | 1.82                 | NO    | 24.14                      | 0.17                    | 1.19                 | NO    | 26.97                      | 0.14                | 0.69                 | NO    | 26.80                      |
| El Salvador (El Salvador) | 0.49                    | 3.06                 | NO    | 13.82                      | 0.48                    | 3.32                 | NO    | 15.81                      | 0.24                | 1.21                 | NO    | 21.28                      |
| EEUU (Hawái)              | 0.52                    | 2.19                 | NO    | 10.12                      | 0.37                    | 1.93                 | NO    | 10.16                      | 0.29                | 0.65                 | NO    | 11.63                      |
| Perú (Pisco)              | 0.27                    | 2.93                 | SÍ    | 86.72                      | 0.33                    | 3.56                 | SÍ    | 85.47                      | 0.19                | 1.44                 | SÍ    | 87.85                      |
| Italia (L'Aquila)         | 0.66                    | 2.84                 | NO    | 7.56                       | 0.56                    | 2.00                 | NO    | 7.67                       | 0.53                | 0.99                 | NO    | 5.93                       |
| Chile (Maule)             | 0.61                    | 14.26                | NO    | 73.84                      | 0.65                    | 17.32                | NO    | 69.70                      | 0.58                | 11.26                | NO    | 62.95                      |
|                           | 0.40 <sup>a</sup>       | 8.70 <sup>a</sup>    | NO    | 80.69 <sup>a</sup>         | 0.29 <sup>a</sup>       | 5.67 <sup>a</sup>    | NO    | 88.22 <sup>a</sup>         | 0.37 <sup>a</sup>   | 7.51 <sup>a</sup>    | NO    | 66.13 <sup>a</sup>         |
| España (Lorca)            | 0.27 <sup>b</sup>       | 4.05 <sup>b</sup>    | NO    | 80.69 <sup>b</sup>         | 0.20 <sup>b</sup>       | 2.64 <sup>b</sup>    | NO    | 88.22 <sup>b</sup>         | 0.25 <sup>b</sup>   | 3.49 <sup>b</sup>    | NO    | 66.13 <sup>b</sup>         |
|                           | 0.36                    | 0.51                 | SÍ    | 0.96                       | 0.15                    | 0.11                 | SÍ    | 3.56                       | 0.11                | 0.05                 | SÍ    | 3.40                       |
| Italia (Emilia)           | 0.26                    | 0.72                 | NO    | 11.51                      | 0.26                    | 0.87                 | NO    | 12.02                      | 0.30                | 0.49                 | NO    | 11.83                      |
| Ecuador (Muisne)          | 0.32                    | 4.79                 | NO    | 31.89                      | 0.36                    | 5.04                 | NO    | 25.73                      | 0.17                | 0.62                 | NO    | 34.40                      |
|                           | 0.32                    | 4.79                 | NO    | 31.89                      | 0.36                    | 5.04                 | NO    | 25.73                      | 0.17                | 0.62                 | NO    | 34.40                      |
|                           | 0.37                    | 4.98                 | NO    | 20.95                      | 0.49                    | 6.27                 | NO    | 23.34                      | 0.20                | 0.028                | NO    | 36.52                      |
|                           | 0.40 <sup>a</sup>       | 2.41 <sup>a</sup>    | NO    | 17.41 <sup>a</sup>         | 0.51 <sup>a</sup>       | 2.21 <sup>a</sup>    | NO    | 16.26 <sup>a</sup>         | 0.16 <sup>a</sup>   | 0.40 <sup>a</sup>    | NO    | 21.80 <sup>a</sup>         |
|                           | 0.54 <sup>b</sup>       | 9.72 <sup>b</sup>    | NO    | 20.41 <sup>b</sup>         | 0.64 <sup>b</sup>       | 12.66 <sup>b</sup>   | NO    | 20.12 <sup>b</sup>         | 0.24 <sup>b</sup>   | 1.18 <sup>b</sup>    | NO    | 28.73 <sup>b</sup>         |
|                           | 0.40                    | 2.41                 | NO    | 17.41                      | 0.51                    | 2.21                 | NO    | 16.26                      | 0.16                | 0.40                 | NO    | 21.80                      |
| México (Puebla)           | 0.09                    | 1.19                 | SÍ    | 45.04                      | 0.09                    | 0.52                 | SÍ    | 58.73                      | 0.04                | 0.08                 | SÍ    | 54.48                      |

<sup>a</sup> Acelerograma original de la estación sismológica; <sup>b</sup> Acelerograma modificado

La Tabla 4-4 describe los daños observados en los hospitales descritos en la Tabla 4-1. El daño se clasifica en términos de niveles de daño tales como daño nulo (N); daño leve (L); daño moderado (M); daño extenso (E) y daño completo (C) descritos en el Capítulo 3.

**Tabla 4-4.** Daños observados en los hospitales analizados

| Elementos estructurales y componentes y sistemas no estructurales | Caso de estudio |    |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |    |     |    |     |     |
|---|-----------------|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|----|-----|-----|
|   | 01              | 02 | 03  | 04 | 05  | 06  | 07  | 08  | 09 | 10  | 11  | 12  | 13 | 14  | 15 | 16  | 17  |
| <b>Elementos estructurales</b>                                    | E               | L  | L   | N  | M   | N   | L   | M   | L  | M   | N   | N   | L  | M   | M  | N   | N   |
| <b>1. Elementos arquitectónicos</b>                               |                 |    |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |    |     |    |     |     |
| Exteriores  | C               | N  | L   | M  | E   | L   | L   | E   | N  | M   | L   | M   | M  | E   | C  | L   | N   |
| Interiores  | C               | E  | M   | E  | E   | M   | E   | E   | C  | E   | M   | M   | C  | C   | C  | M   | L   |
| <b>2. Instalaciones</b>   |                 |    |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |    |     |    |     |     |
| Equipos de sistemas críticos                                      | C               | E  | E   | C  | M   | M   | C   | E   | E  | E   | L   | E   | C  | C   | C  | L   | N   |
| Sistemas distribuidos   | C               | C  | N   | E  | E   | N   | E   | M   | C  | E   | N   | L   | E  | C   | C  | M   | N   |
| <b>3. Equipamiento médico</b>                                     |                 |    |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |    |     |    |     |     |
| 3.1. Servicios Médicos  |                 |    |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |    |     |    |     |     |
| Servicios Asistenciales   | E               | E  | M   | E  | M   | M   | E   | M   | E  | M   | L   | N/A | E  | E   | E  | M   | L   |
| Servicio de Diagnóstico y Tratamiento                             | E               | E  | N/A | C  | L   | N/A | N/A | L   | E  | E   | L   | N/A | E  | E   | E  | L   | N   |
| Servicio de Análisis y Medicación                                 | N/A             | E  | N/A | M  | N/A | N/A | N/A | N/A | E  | N/A | N/A | N/A | E  | N/A | E  | N/A | N/A |
| Servicios Generales y de Apoyo                                    | N/A             | E  | M   | M  | N/A | N/A | E   | N/A | E  | N/A | N   | M   | E  | E   | E  | N/A | N/A |
| 3.2. Gases Médicos  |                 |    |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |    |     |    |     |     |
| Suministro de gases médicos                                       | C               | C  | N   | E  | E   | N   | E   | M   | E  | E   | N   | N   | C  | C   | C  | N   | N   |
| <b>4. Contenido</b>   |                 |    |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |    |     |    |     |     |
| Mobiliario, accesorios, estanterías, etc.                         | C               | C  | E   | C  | E   | M   | C   | E   | C  | C   | N   | E   | C  | C   | C  | M   | N   |

N: Nulo, L: Leve, M: Moderado, E: Extenso, C: Completo

## 4.2 Análisis de casos reales

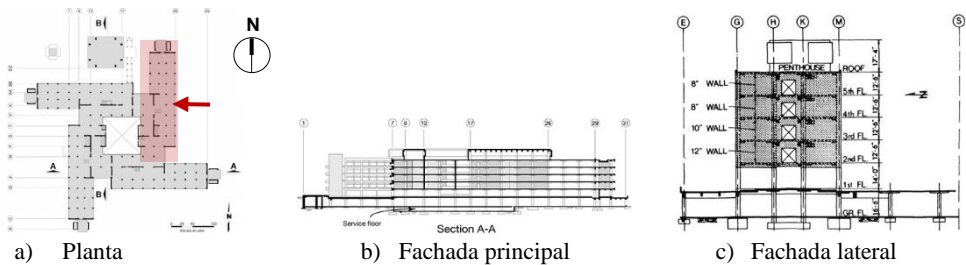
En este apartado se describen los diecisiete (17) casos de estudio. En la primera parte se describe: i) vistas generales del hospital (uso de fotografías, planos y/o esquemas generales); ii) distancia a la fuente y a la estación sismológica de referencia, y (iii) excitación sísmica. La segunda parte, con ayuda de fotografías y Anejo C, se describe los daños del hospital analizado (bloque individual) tanto en sus elementos estructurales como en componentes y sistemas no estructurales. Las referencias bibliográficas de las fotografías contenidas en este apartado de casos de estudio se ubican en la sección de “Créditos de fotos” de este documento.

## Hospital Olive View (Medical Center)

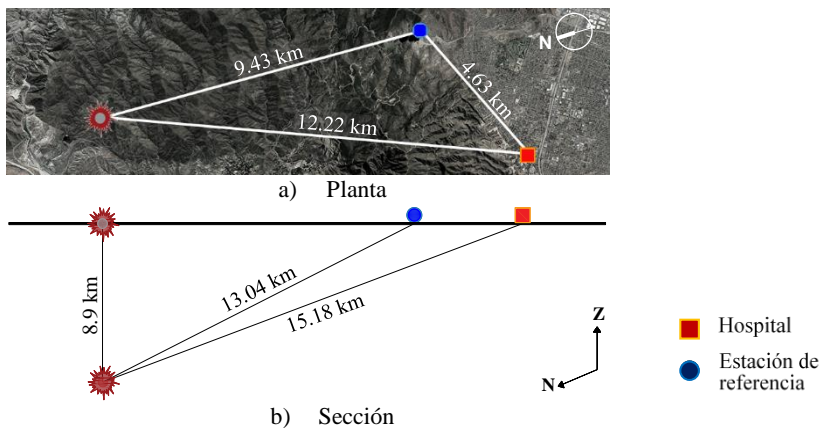
**Ciudad / estado (provincia) / país:** San Fdo. / California / EE.UU.

**Coordenadas geográficas:** 34.3254 ° N, 118.445 ° W

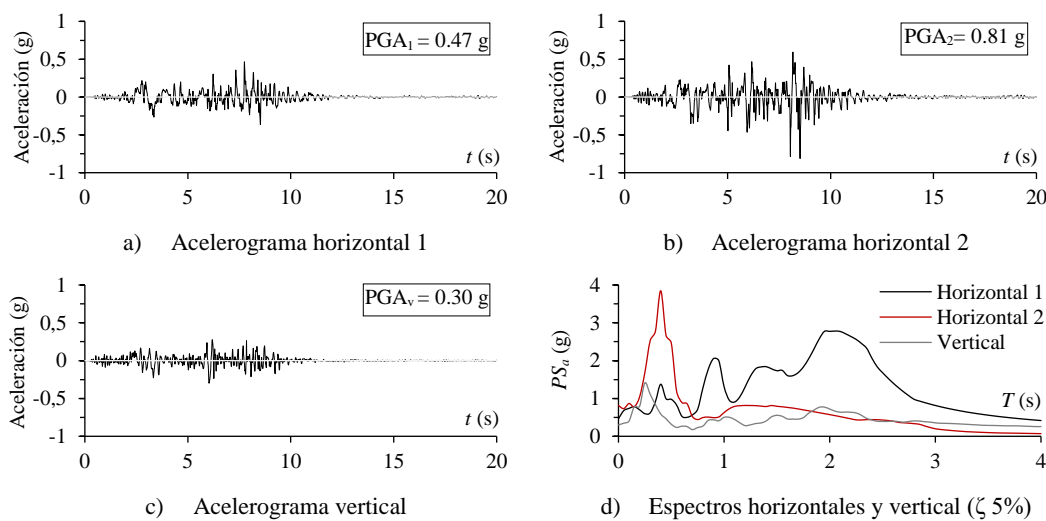
01



**Figura 4-2.** Vistas generales del Hospital Olive View



**Figura 4-3.** Distancia a la fuente y a la estación sísmológica de referencia para el caso 1

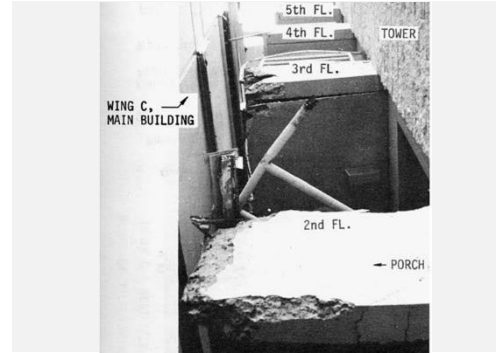


**Figura 4-4.** Excitación sísmica para el caso 1

# Hospital Olive View (Medical Center)

# 01

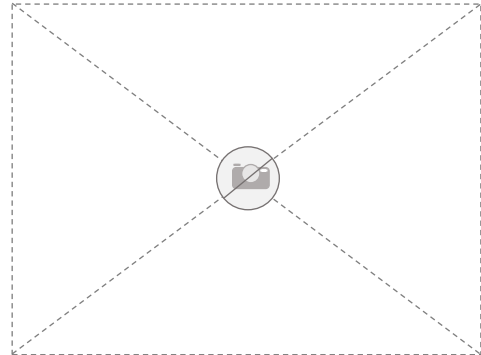
## DAÑOS OBSERVADOS



a) Daño estructural. Deformación en las 2 plantas bajas (planta blanda)

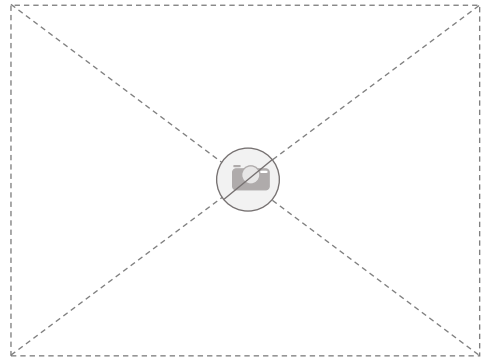
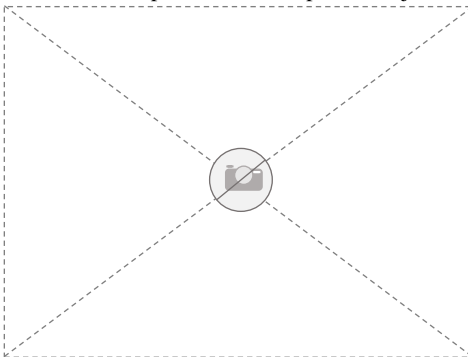
b) Daño estructural. Impacto entre bloques (edificio y torre de escaleras)

**Figura 4-5.** Daños estructurales en el caso 1



a) Daño en elementos arquitectónicos. Daño completo en las dos plantas bajas

b) Daño en instalaciones. Daño completo



c) Daño en equipamiento médico. Daño extenso y completo

d) Daño en contenidos. Daño completo

**Figura 4-6.** Daños no estructurales en el caso 1

## Hospital Olive View - UCLA Medical Center

# 02

Ciudad / estado (provincia) / país: Los Ángeles / California / EE.UU.

Coordenadas geográficas: 34.326° N 118.445° W



a) Planta

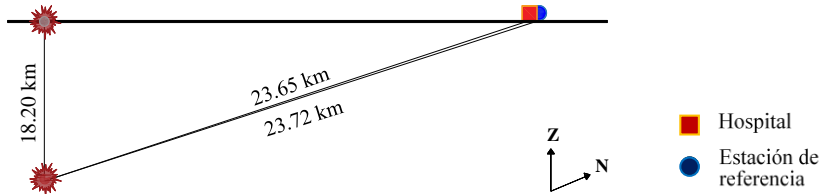
b) Fachada principal

c) Fachada lateral

**Figura 4-7.** Vistas generales del Hospital Olive View - UCLA Medical Center

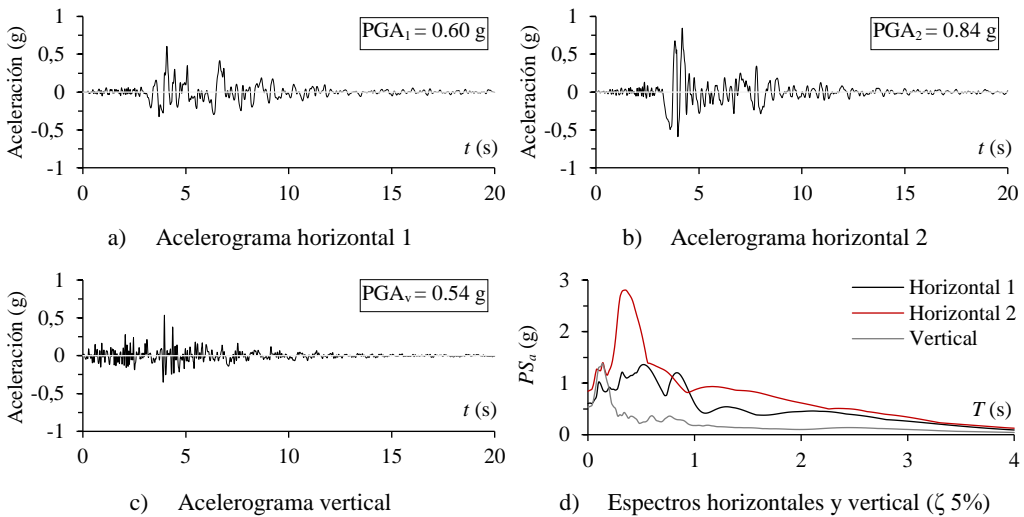


a) Planta



b) Sección

**Figura 4-8.** Distancia a la fuente y a la estación sísmológica de referencia para el caso 2



a) Acelerograma horizontal 1

b) Acelerograma horizontal 2

c) Acelerograma vertical

d) Espectros horizontales y vertical ( $\zeta$  5%)

**Figura 4-9.** Excitación sísmica para el caso 2

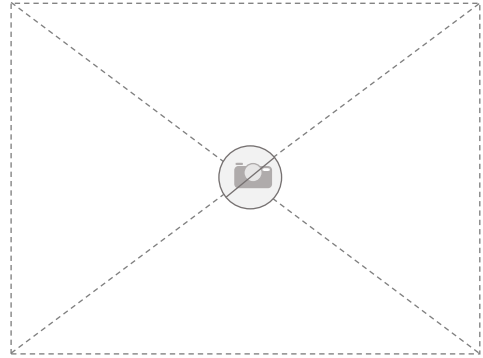
## Hospital Olive View - UCLA Medical Center

# 02

### DAÑOS OBSERVADOS

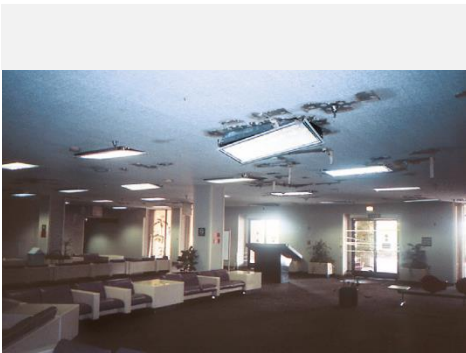


a) Daño estructural. No se evidenció daño



b) Daño estructural

**Figura 4-10.** Daños estructurales en el caso 2



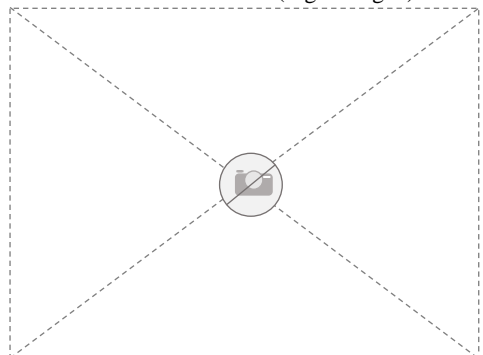
a) Daño en elementos arquitectónicos. Daño al falso techo



b) Daño en instalaciones. Rotura de tuberías de red de incendios (fuga de agua)



c) Daño en equipamiento médico. Caída del equipo de radiología



d) Daño en contenidos

**Figura 4-11.** Daños no estructurales en el caso 2



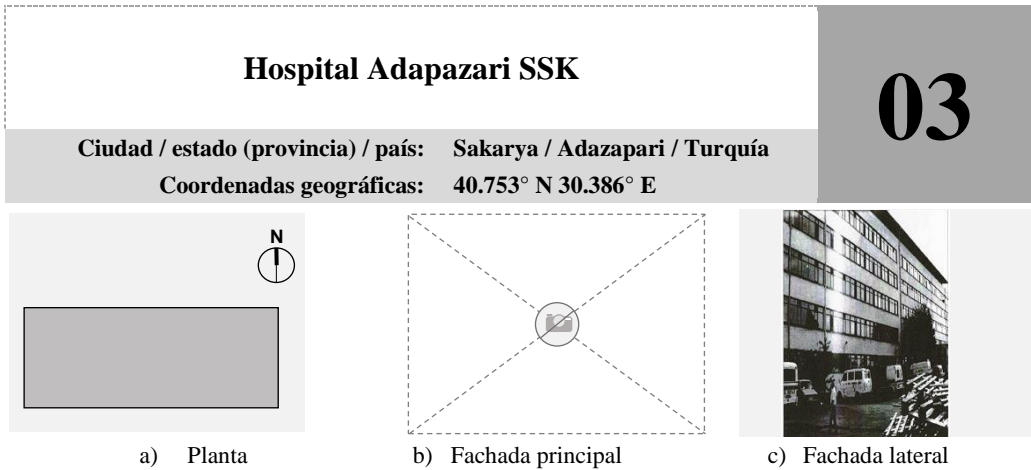


Figura 4-12. Vistas generales del Hospital Adapazari SSK

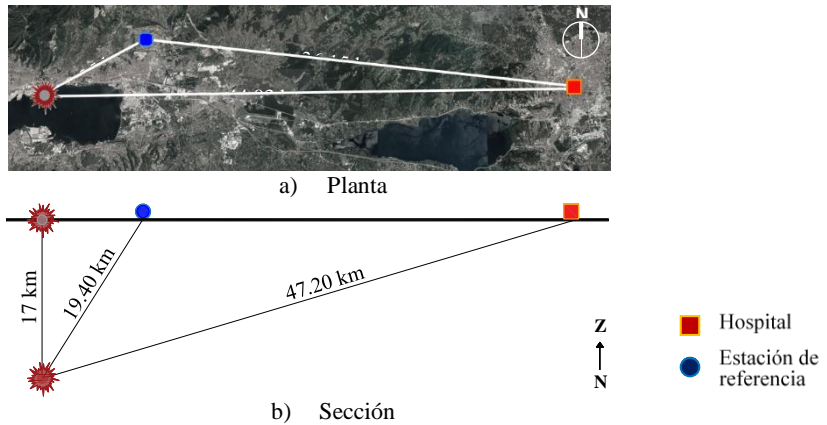


Figura 4-13. Distancia a la fuente y a la estación sísmológica de referencia para el caso 3

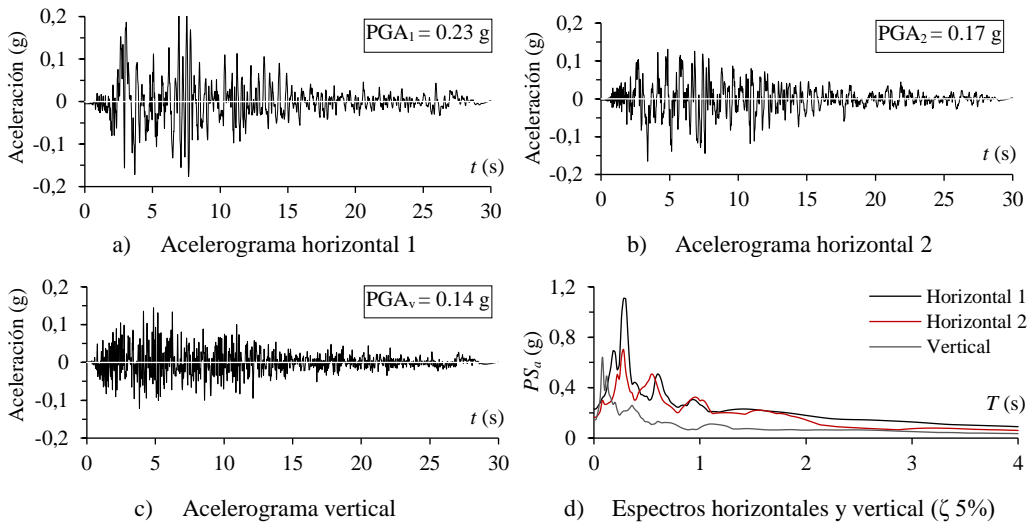
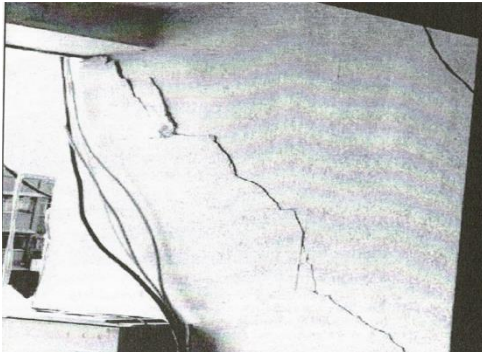


Figura 4-14. Excitación sísmica para el caso 3

# Hospital Adapazari SSK

# 03

## DAÑOS OBSERVADOS



a) Daño estructural. Daño en muro de mampostería

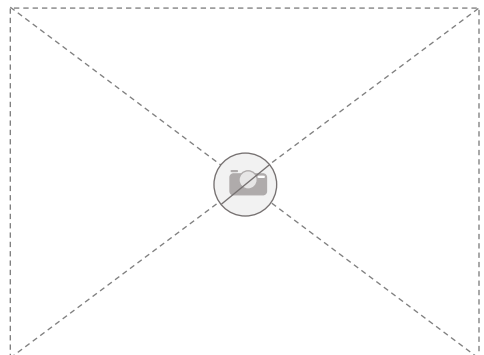


b) Daño estructural. Daño en junta

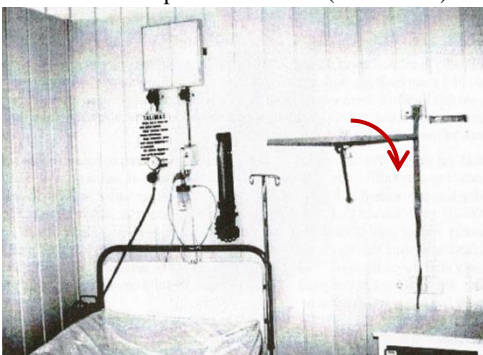
**Figura 4-15.** Daños estructurales en el caso 3



a) Daño en elementos arquitectónicos. Daño en mampostería exterior (envolvente)



b) Daño en instalaciones. Algunas rupturas en el sistema de saneamiento



c) Daño en equipamiento médico. Monitor sin arriostres y/o anclajes cae



d) Daño en contenidos. Caída de material (estanterías, archivadores, etc.)

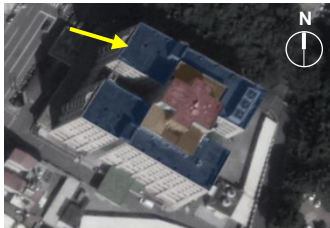
**Figura 4-16.** Daños no estructurales en el caso 3

## Hospital Shiu - Tuan

# 04

Ciudad / estado (provincia) / país: Nantou / Nantou / Taiwán

Coordenadas geográficas: 23.800° N 120.713° E



a) Planta

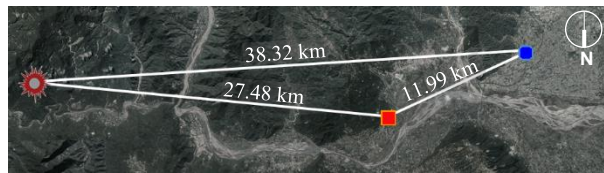


b) Fachada principal

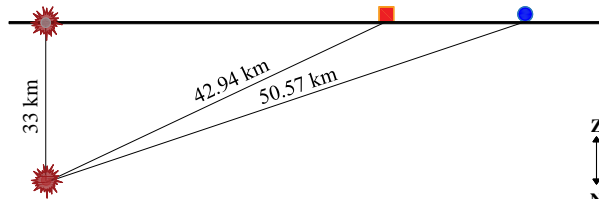


c) Fachada lateral

**Figura 4-17.** Vistas generales del Hospital Shiu – Tuan



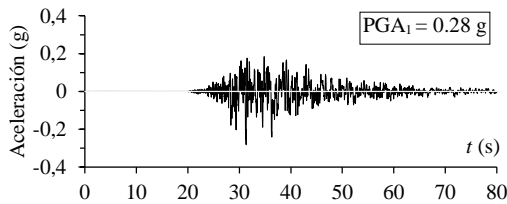
c) Planta



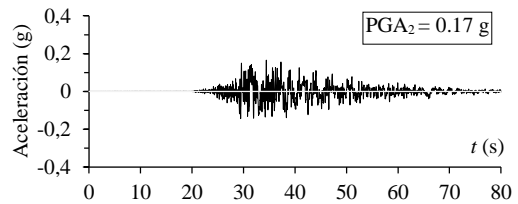
d) Sección

■ Hospital  
● Estación de referencia

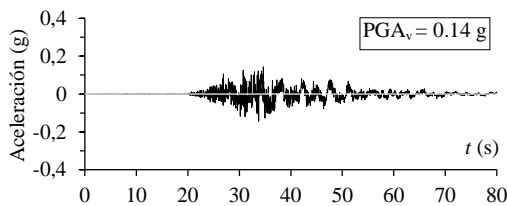
**Figura 4-18.** Distancia a la fuente y a la estación sismológica de referencia para el caso 4



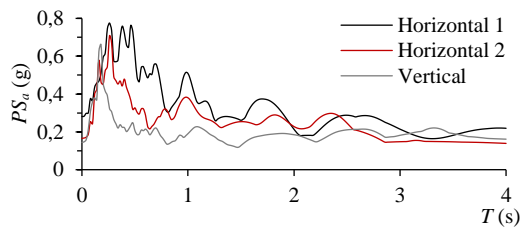
e) Acelerograma horizontal 1



f) Acelerograma horizontal 2



g) Acelerograma vertical



h) Espectros horizontales y vertical ( $\zeta$  5%)

**Figura 4-19.** Excitación sísmica para el caso 4

## Hospital Shiu - Tuan

# 04

### DAÑOS OBSERVADOS



a) Daño estructural. Sin daño visible. No obstante, daño visible en fachada

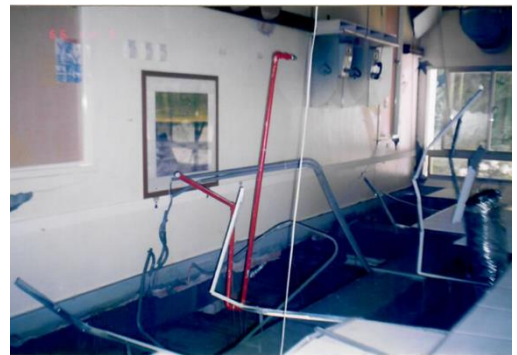


b) Daño estructural. Sin daño visible. No obstante, daño visible en fachada

**Figura 4-20.** Daños estructurales en el caso 4



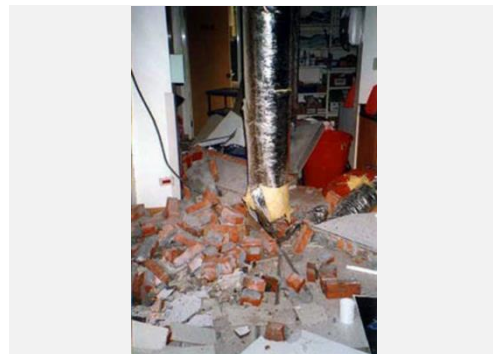
a) Daño en elementos arquitectónicos. Caída de techo falso y partición de bloques de vidrio



b) Daño en instalaciones. Caída de tuberías de protección contra incendios



c) Daño en equipamiento médico. Daño en quirófano



d) Daño en contenidos. Vaciamiento de muro de mampostería sobre los archivadores

**Figura 4-21.** Daños no estructurales en el caso 4

## Hospital Nacional San Rafael

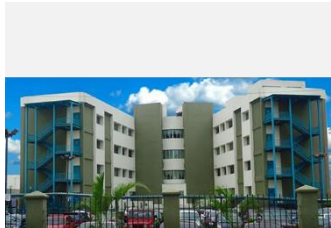
# 05

Ciudad / estado (provincia) / país: Santa Tecla / La Liber. / El Salv.

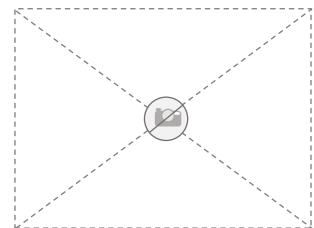
Coordenadas geográficas: 13.670° N 89.278° W



a) Planta



b) Fachada principal

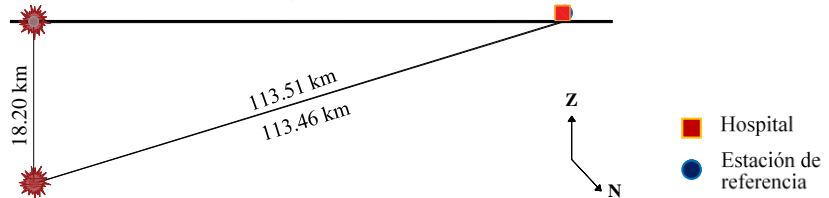


c) Fachada lateral

**Figura 4-22.** Vistas generales del Hospital Nacional San Rafael

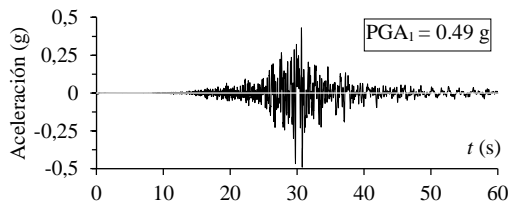


a) Planta

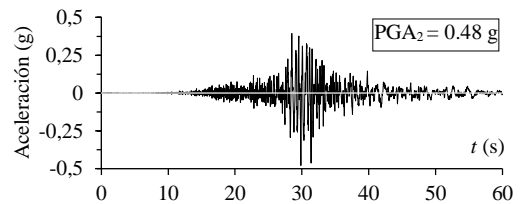


b) Sección

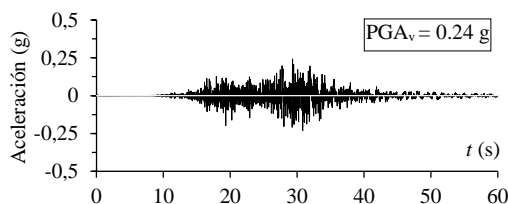
**Figura 4-23.** Distancia a la fuente y a la estación sísmológica de referencia para el caso 5



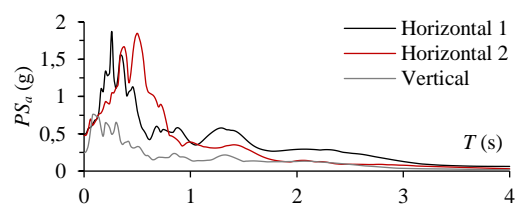
a) Acelerograma horizontal 1



b) Acelerograma horizontal 2



c) Acelerograma vertical



d) Espectros horizontales y vertical ( $\zeta$  5%)

**Figura 4-24.** Excitación sísmica para el caso 5

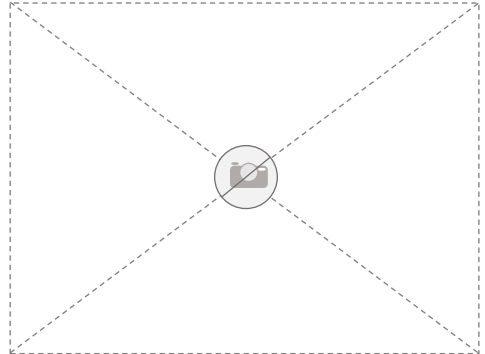
## Hospital Nacional San Rafael

# 05

### DAÑOS OBSERVADOS



a) Daño estructural. Leve a moderado

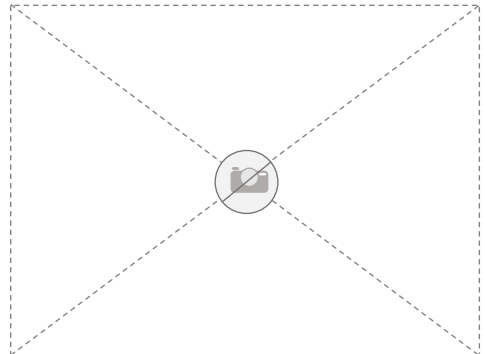


b) Daño estructural. Leve a moderado

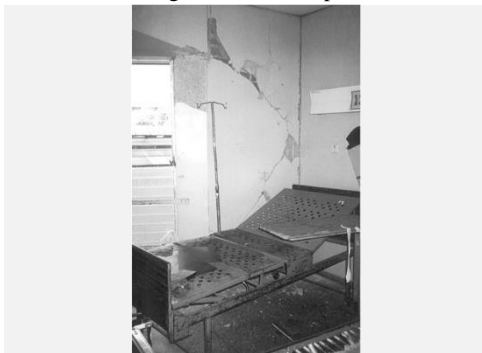
**Figura 4-25.** Daños estructurales en el caso 5



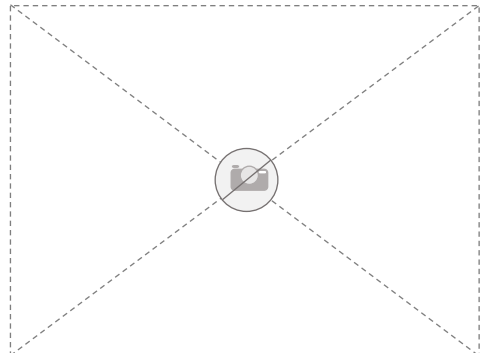
a) Daño en elementos arquitectónicos. Grietas diagonales en mampostería



b) Daño en instalaciones.



c) Daño en equipamiento médico. Caída de escombros



d) Daño en contenidos. Daño severo

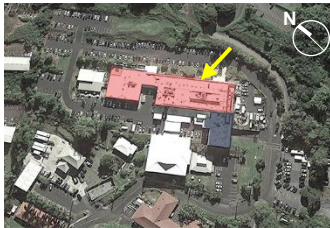
**Figura 4-26.** Daños no estructurales en el caso 5

## Hospital de la Comunidad de Kona

# 06

Ciudad / estado (provincia) / país: Kealakekua / Hawái / EE.UU.

Coordenadas geográficas: 19.520 ° N 155.917 ° W



a) Planta



b) Fachada principal

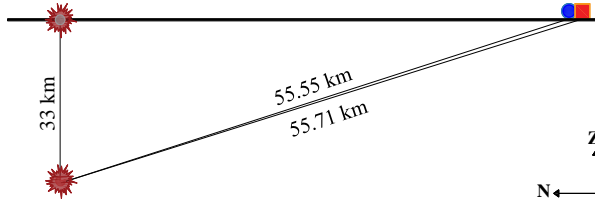


c) Fachada lateral

**Figura 4-27.** Vistas generales del Hospital de la comunidad de Kona



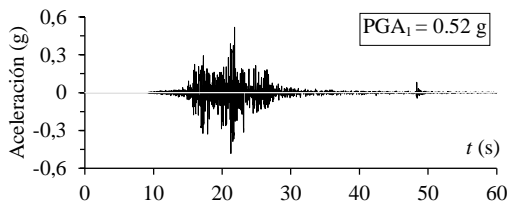
a) Planta



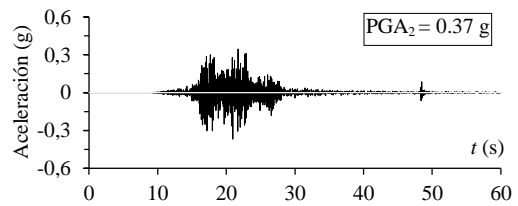
b) Sección

■ Hospital  
● Estación de referencia

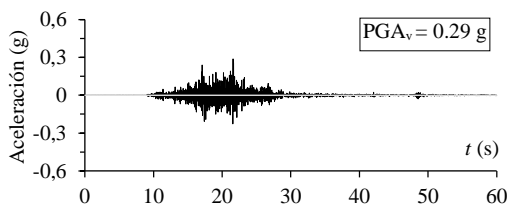
**Figura 4-28.** Distancia a la fuente y a la estación sísmológica de referencia para el caso 6



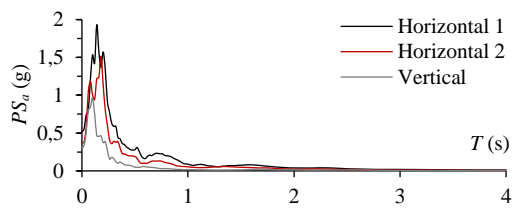
a) Acelerograma horizontal 1



b) Acelerograma horizontal 2



c) Acelerograma vertical



d) Espectros horizontales y vertical ( $\zeta$  5%)

**Figura 4-29.** Excitación sísmica para el caso 6

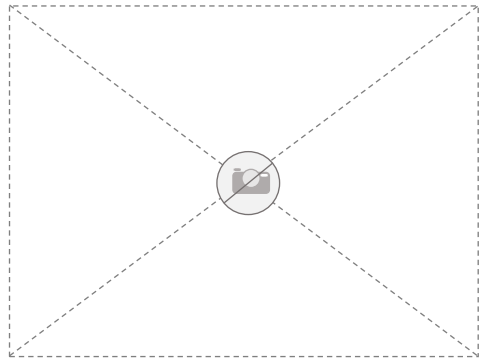
# Hospital de la Comunidad de Kona

# 06

## DAÑOS OBSERVADOS



a) Daño estructural. Desprendimiento del revestimiento

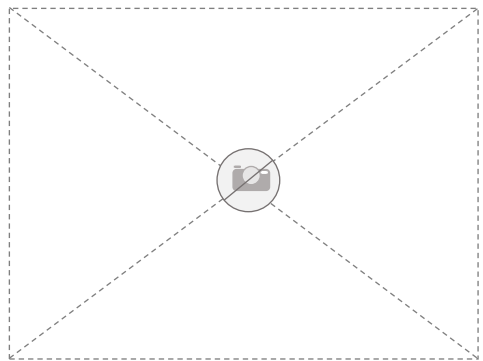


b) Daño estructural

**Figura 4-30.** Daños estructurales en el caso 6



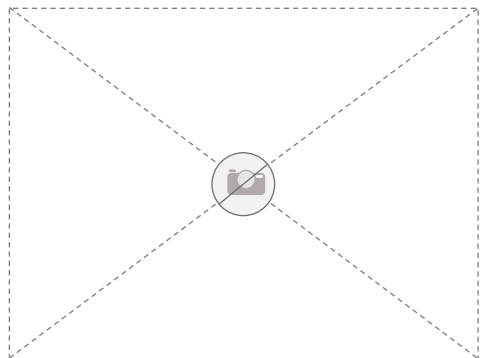
a) Daño en elementos arquitectónicos. Caída de falso techo y grietas en las particiones de yeso



b) Daño en instalaciones. Sin daño aparente



c) Daño en equipamiento médico. Sin daño aparente (Quirófano)



d) Daño en contenidos

**Figura 4-31.** Daños no estructurales en el caso 6

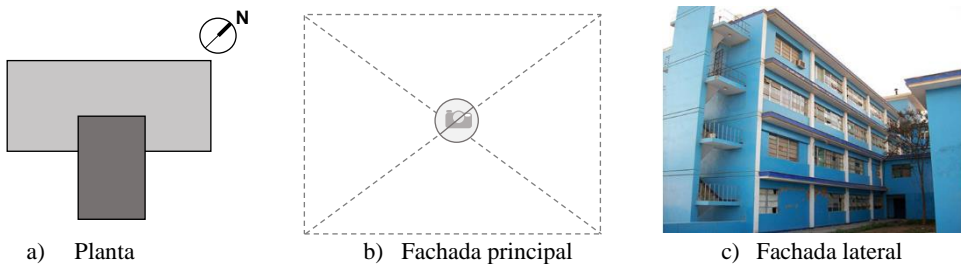


## Hospital Regional de Ica

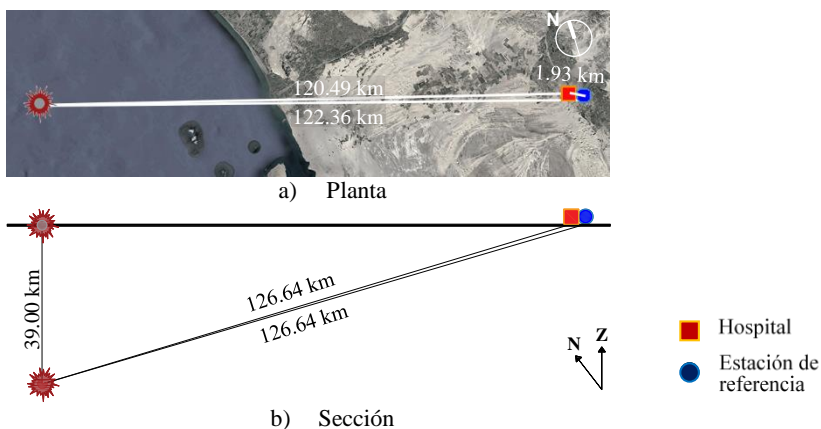
Ciudad / estado (provincia) / país: **Ica / Ica / Perú**

Coordenadas geográficas: **14.074° S 75.742° W**

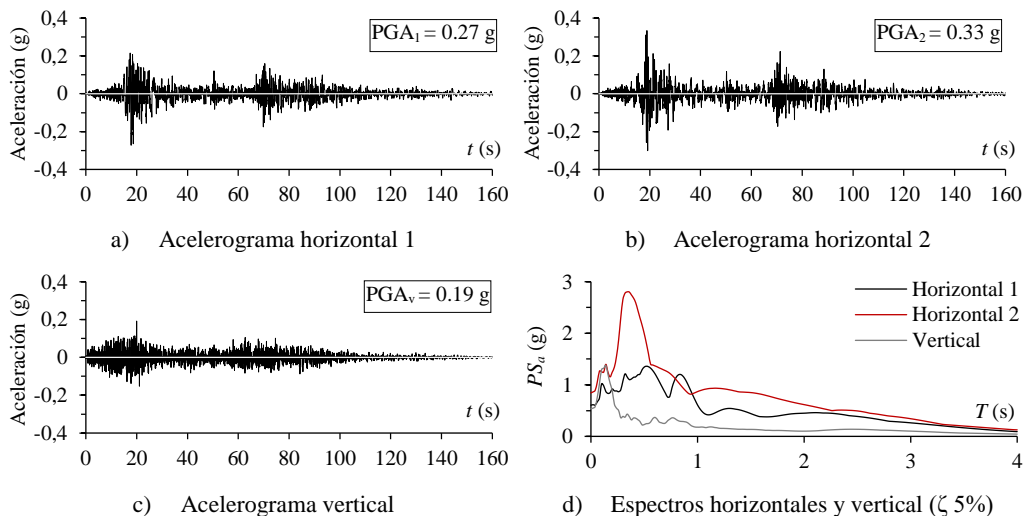
07



**Figura 4-32.** Vistas generales del Hospital Regional Ica



**Figura 4-33.** Distancia a la fuente y a la estación sísmológica de referencia para el caso 7



**Figura 4-34.** Excitación sísmica para el caso 7

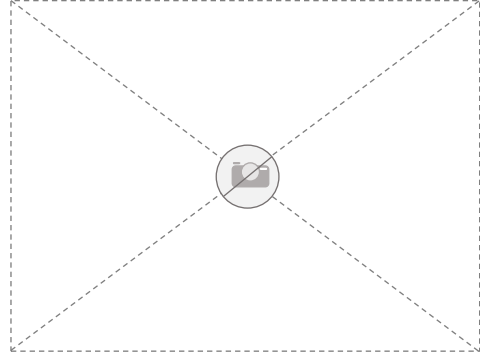
## Hospital Regional de Ica

# 07

### DAÑOS OBSERVADOS



- a) Daño estructural. Sin daño aparente en la estructura. Daño extenso en las juntas (ascensor y alas)

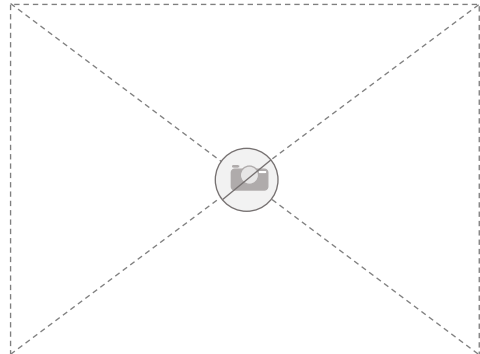


- b) Daño estructural

**Figura 4-35.** Daños estructurales en el caso 7



- a) Daño en elementos arquitectónicos. Quirófano



- b) Daño en instalaciones. Colapso de tuberías



- c) Daño en equipamiento médico. Deslizamiento de depósitos



- d) Daño en contenidos. Caída de material (estanterías, archivadores, etc.)

**Figura 4-36.** Daños no estructurales en el caso 7

## Hospital San Salvatore

Ciudad / estado (provincia) / país: Coppito / L'Aquila / Italia

Coordenadas geográficas: 42.365° N 13.352° E

08



Figura 4-37. Vistas generales del Hospital San Salvatore

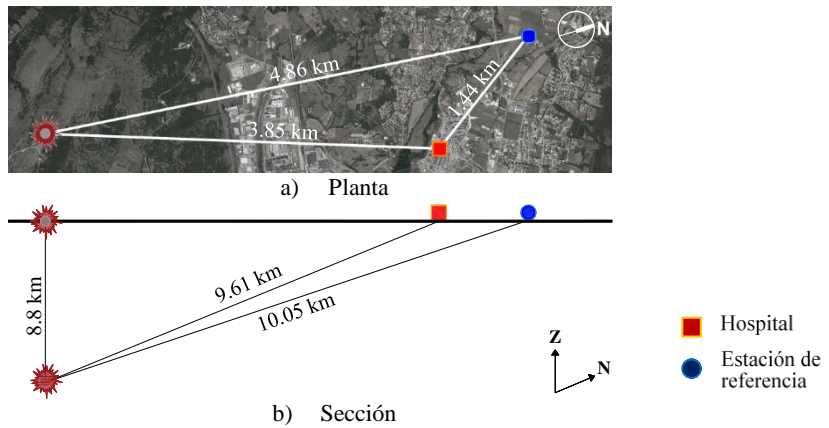


Figura 4-38. Distancia a la fuente y a la estación sísmológica de referencia para el caso 8

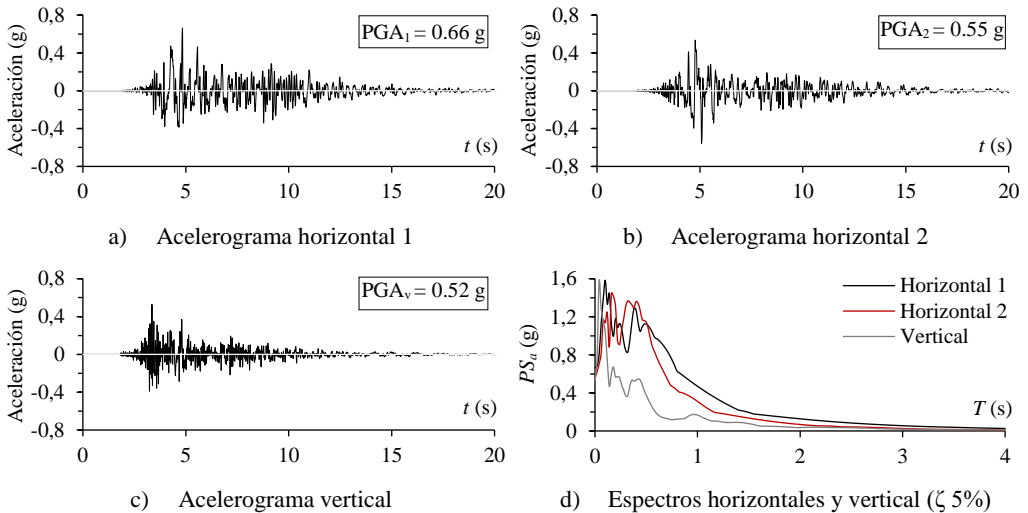


Figura 4-39. Excitación sísmica para el caso 8

## Hospital San Salvatore

# 08

### DAÑOS OBSERVADOS



a) Daño estructural. Falla de corte en una columna



b) Daño estructural. Ausencia de refuerzo transversal en una columna

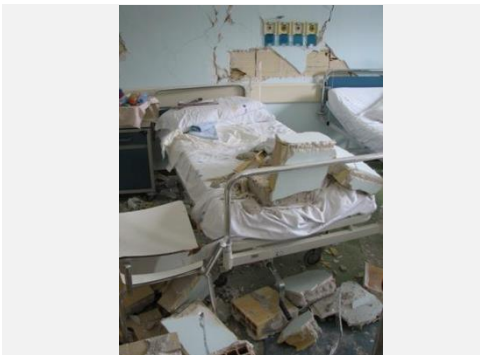
**Figura 4-40.** Daños estructurales en el caso 8



a) Daño en elementos arquitectónicos. Colapso de la envolvente



b) Daño en instalaciones. Ligero desplazamiento en equipos de climatización



c) Daño en equipamiento médico. Caída de escombros sobre camas médicas



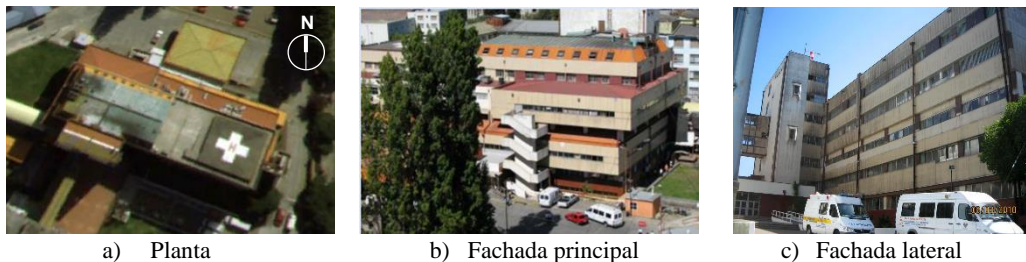
d) Daño en contenidos. No se evidenció daño

**Figura 4-41.** Daños no estructurales en el caso 8

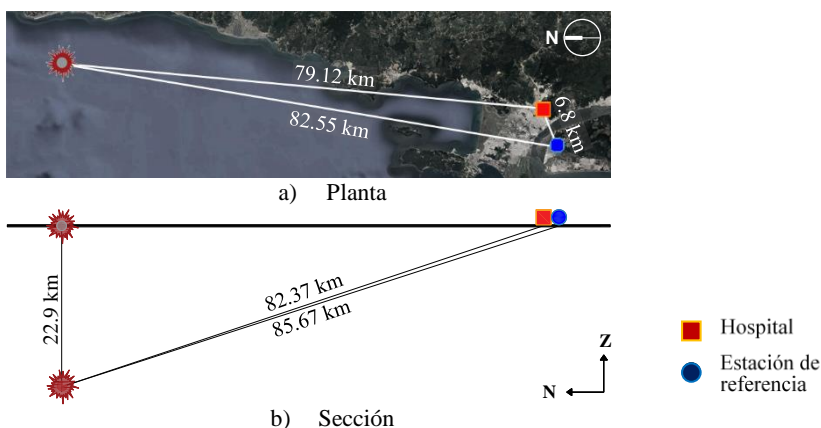
## Hospital Dr. Guillermo Grant Benavente “La Torre de Pacientes Críticos”

**Ciudad / estado (provincia) / país: Concepción / Chile**  
**Coordenadas geográficas: 36.824° S 73.037° W**

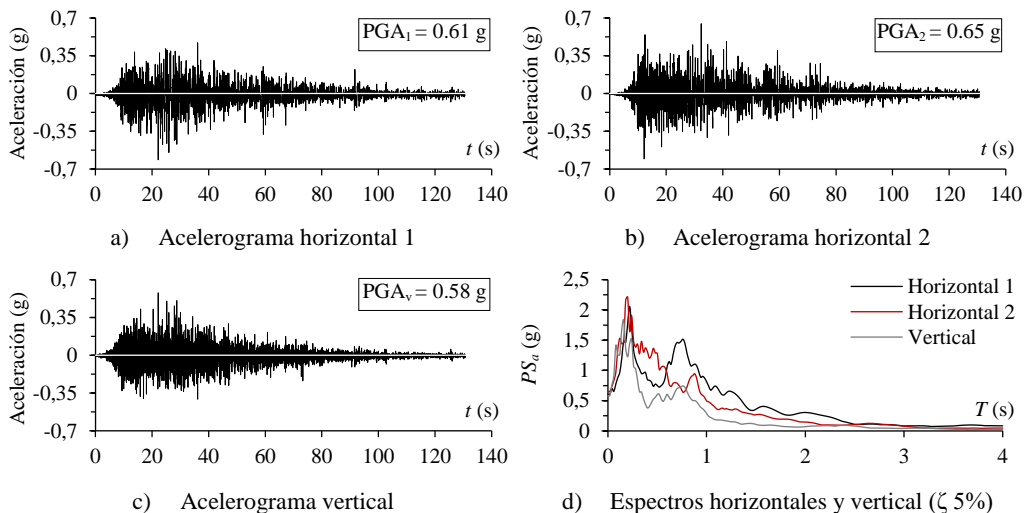
# 09



**Figura 4-42.** Vistas generales del Hospital “La Torre”



**Figura 4-43.** Distancia a la fuente y a la estación sísmológica de referencia para el caso 9



**Figura 4-44.** Excitación sísmica para el caso 9

## Hospital Dr. Guillermo Grant Benavente “La Torre de Paciente Crítico”

# 09

### DAÑOS OBSERVADOS



a) Daño estructural. Armadura descubierta en una columna de hormigón



b) Daño estructural. Daño en una viga perimetral externa de la planta baja

**Figura 4-45.** Daños estructurales en el caso 9



a) Daño en elementos arquitectónicos. Desprendimiento de acabados



b) Daño en instalaciones. Caída del falso techo



c) Daño en equipamiento médico. Deslizamiento de equipos



d) Daño en contenidos. Deslizamiento de contenidos en general

**Figura 4-46.** Daños no estructurales en el caso 9

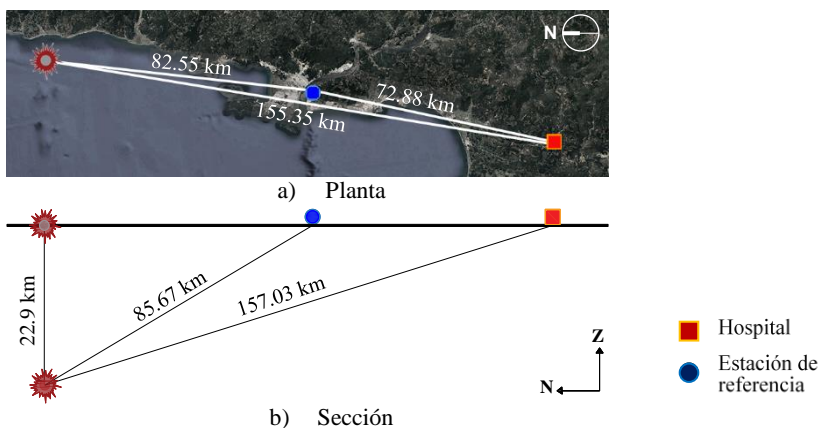
# Hospital de Curanilahue

10

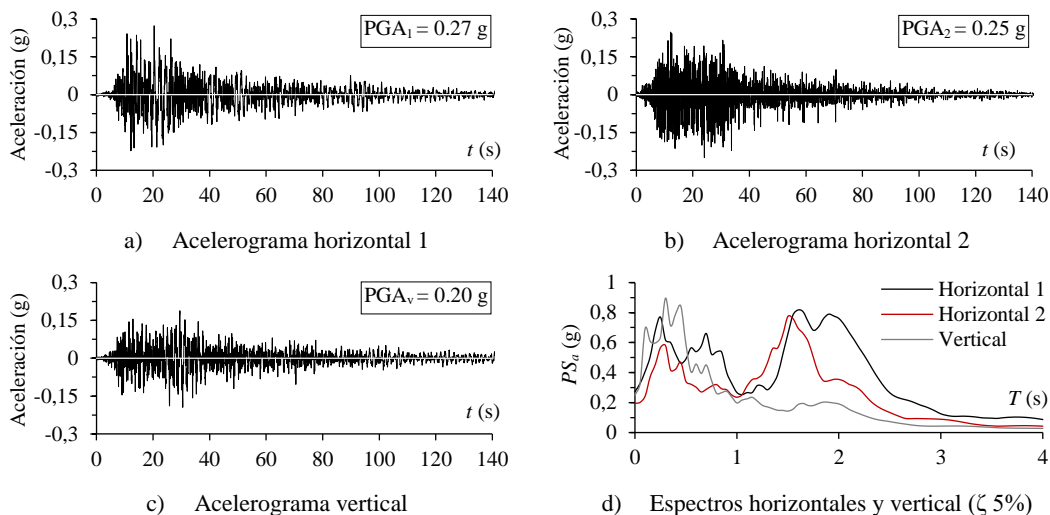
Ciudad / estado (provincia) / país: Curan. / Reg. del Bío Bío/ Chile  
 Coordenadas geográficas: 37.473° S 73.347° W



**Figura 4-47.** Vistas generales del Hospital de Curanilahue



**Figura 4-48.** Distancia a la fuente y a la estación sísmológica de referencia para el caso 10



**Figura 4-49.** Excitación sísmica para el caso 10

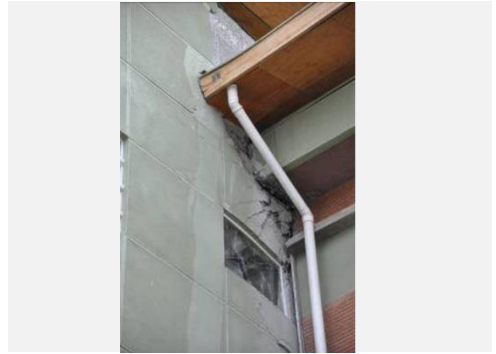
# Hospital de Curanilahue

# 10

## DAÑOS OBSERVADOS



a) Daño estructural. Asentamiento del bloque

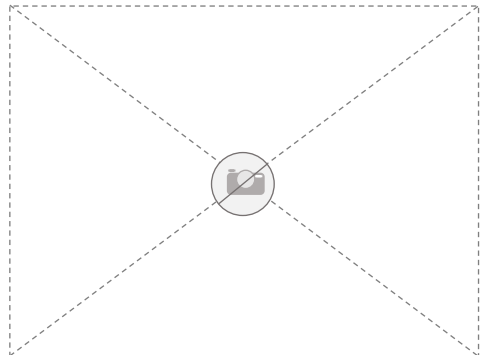


b) Daño estructural. Impacto entre edificios

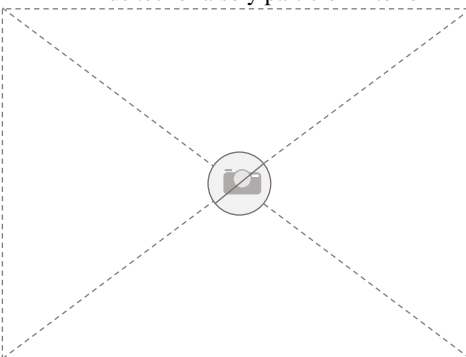
**Figura 4-50.** Daños estructurales en el caso 10



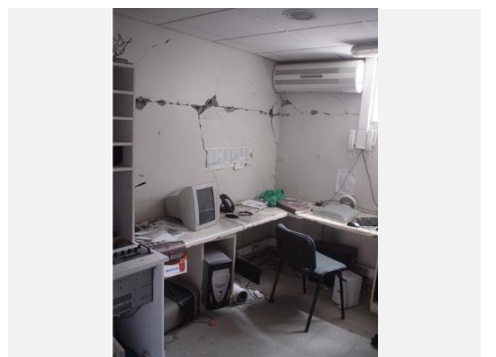
a) Daño en elementos arquitectónicos. Caída de techo falso y partición interior



b) Daño en instalaciones



c) Daño en equipamiento médico



d) Daño en contenidos. Vuelco, deslizamiento

**Figura 4-51.** Daños no estructurales en el caso 10



## Hospital Rafael Méndez

# 11

Ciudad / estado (provincia) / país: Lorca / Murcia / España

Coordenadas geográficas: 37.644° N 1.735° W



a) Planta



b) Fachada principal

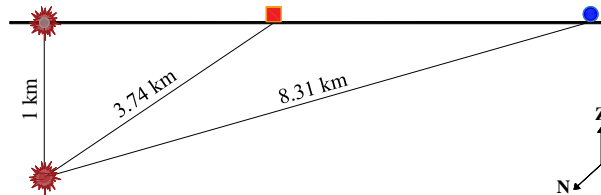


c) Fachada lateral

**Figura 4-52.** Vistas generales del Hospital Rafael Méndez



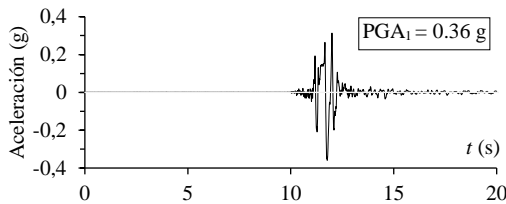
a) Planta



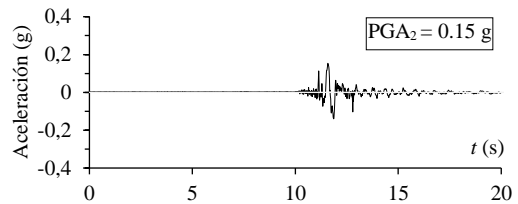
b) Sección

■ Hospital  
● Estación de referencia

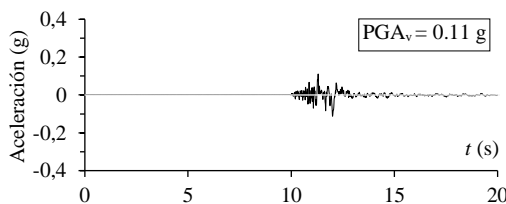
**Figura 4-53.** Distancia a la fuente y a la estación sísmológica de referencia para el caso 11



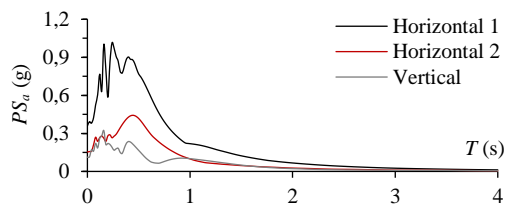
a) Acelerograma horizontal 1



b) Acelerograma horizontal 2



c) Acelerograma vertical



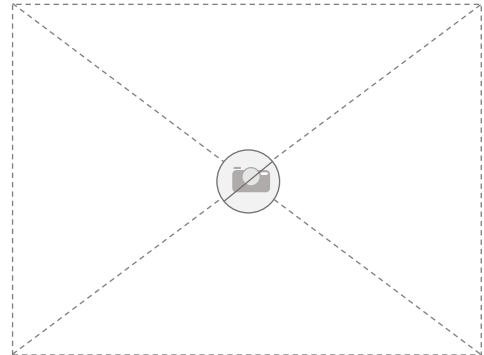
d) Espectros horizontales y vertical ( $\zeta$  5%)

**Figura 4-54.** Excitación sísmica para el caso 11

Hospital Rafael Méndez

11

DAÑOS OBSERVADOS



a) Daño estructural. Desplazamiento de la junta

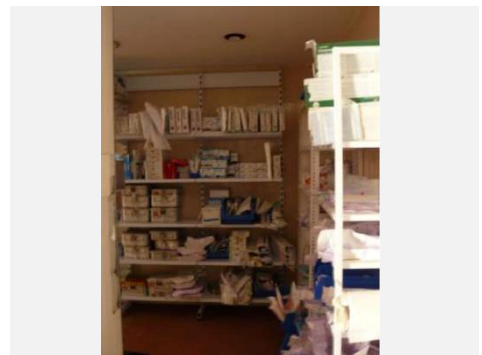
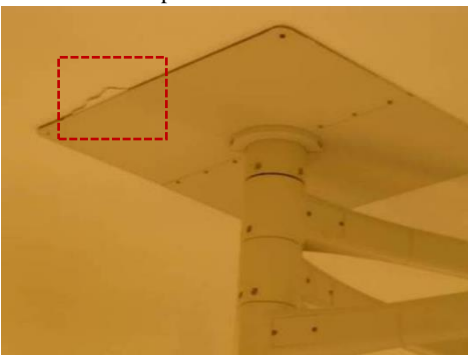
b) Daño estructural

Figura 4-55. Daños estructurales en el caso 11



a) Daño en elementos arquitectónicos. Desprendimiento de acabados

b) Daño en instalaciones. Caída del falso techo



c) Daño en equipamiento médico. Conexión de la lámpara quirúrgica

d) Daño en contenidos. No se evidenció daño

Figura 4-56. Daños no estructurales en el caso 11

## Hospital Santa María Bianca (Edificio de Servicios Generales)

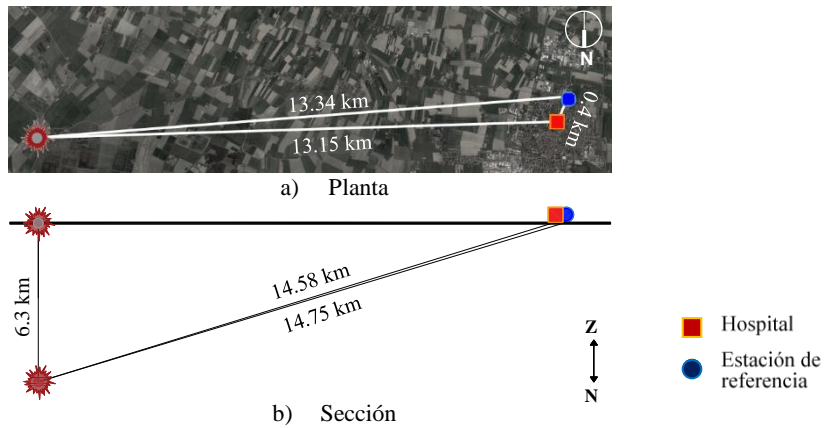
# 12

Ciudad / estado (provincia) / país: **Mirandola / Módena / Italia**

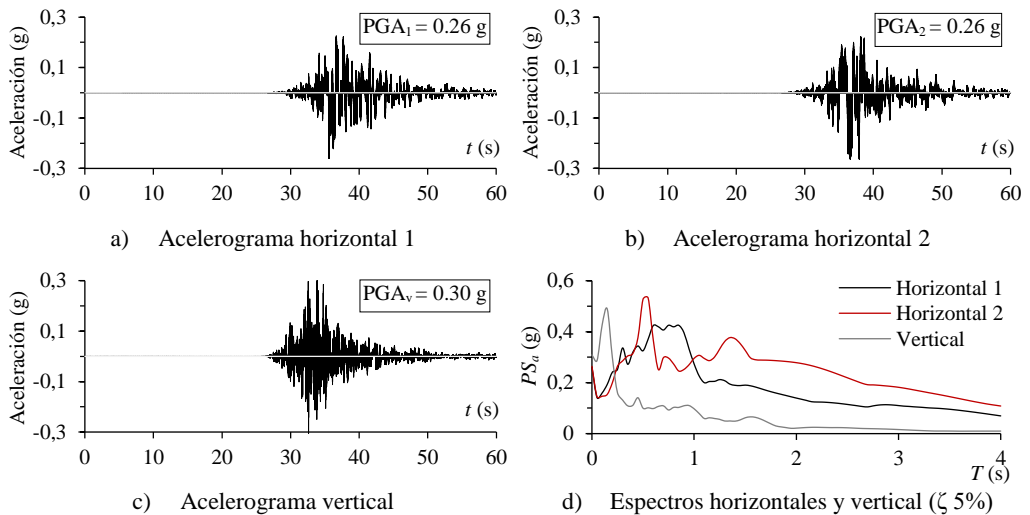
Coordenadas geográficas: **44.881° N 11.063° E**



**Figura 4-57.** Vistas generales del Hospital Santa María Bianca (edificio de servicios generales)



**Figura 4-58.** Distancia a la fuente y a la estación sísmológica de referencia para el caso 12



**Figura 4-59.** Excitación sísmica para el caso 12

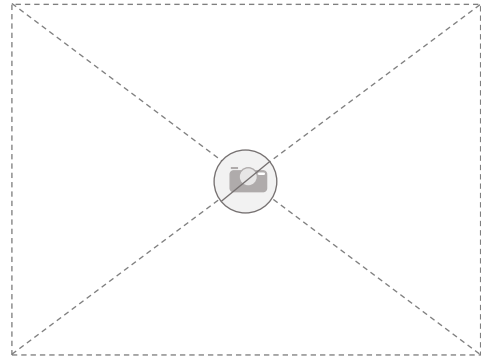
**Hospital Santa María Bianca  
(Edificio de servicios generales)**

**12**

**DAÑOS OBSERVADOS**

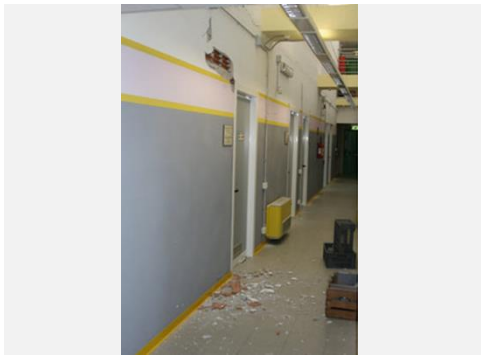


a) Daño estructural. Daño en la junta.  
Separación de bloques

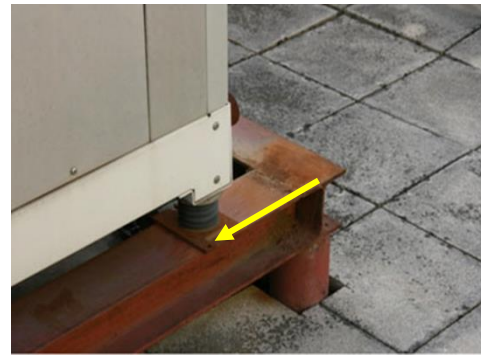


b) Daño estructural

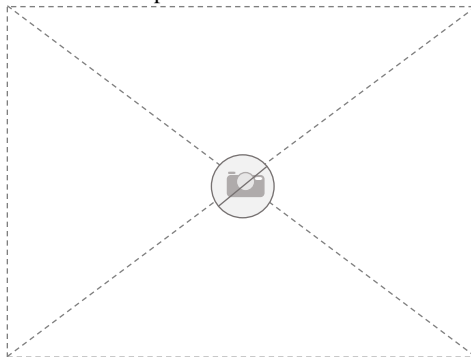
**Figura 4-60.** Daños estructurales en el caso 12



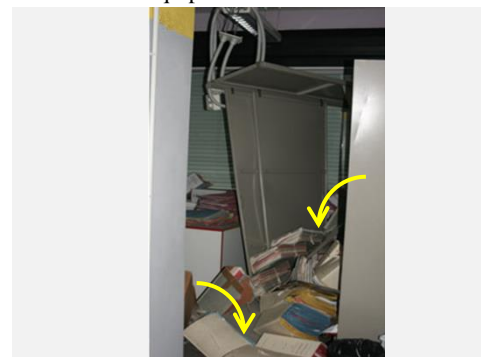
a) Daño en elementos arquitectónicos.  
Desprendimiento de acabados



b) Daño en instalaciones. Desplazamiento de  
equipos de climatización



c) Daño en equipamiento médico



d) Daño en contenidos. Vuelco de los  
archivadores

**Figura 4-61.** Daños no estructurales en el caso 12

## Hospital Miguel H. Alcívar

Ciudad / estado (provincia) / país: Bahía de C. / Manabí / Ecuador

Coordenadas geográficas: 0.621° N 80.427° W

13



Figura 4-62. Vistas generales del Hospital Miguel H. Alcívar

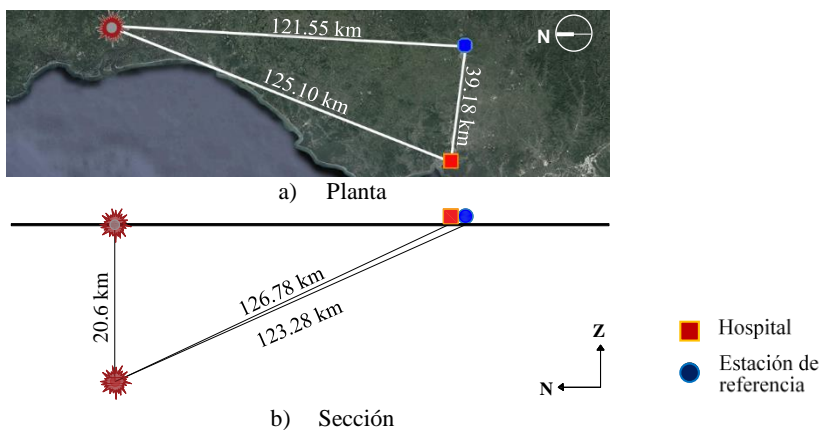


Figura 4-63. Distancia a la fuente y a la estación sísmológica de referencia para el caso 13

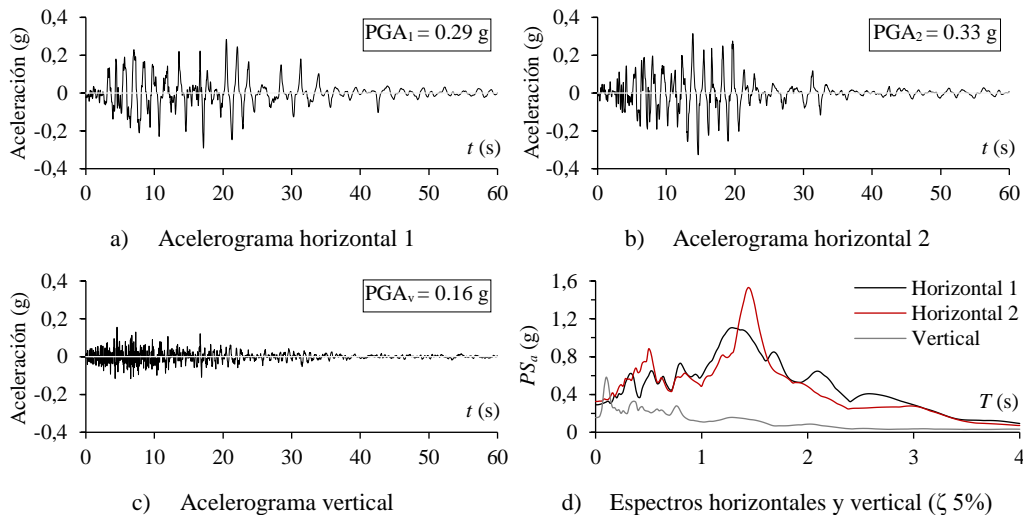


Figura 4-64. Excitación sísmica para el caso 13

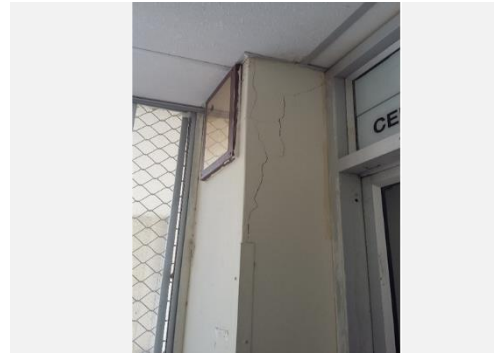
## Hospital Miguel H. Alcívar

# 13

### DAÑOS OBSERVADOS



a) Daño estructural. Sin daño evidente



b) Daño estructural. Fisuras en el revestimiento de una columna

**Figura 4-65.** Daños estructurales en el caso 13



a) Daño en elementos arquitectónicos. Caída de una partición interior



b) Daño en instalaciones. Rotura de cables y tuberías



c) Daño en equipamiento médico. Caída de equipo de Rayos X



d) Daño en contenidos. Caída de mobiliario y accesorios

**Figura 4-66.** Daños no estructurales en el caso 13



## Hospital General de Chone Dr. Napoleón Dávila Córdova

# 14

### DAÑOS OBSERVADOS



a) Daño estructural. Posible salida de la plomada en la planta superior



b) Daño estructural. Vista posterior. Deformación del Bloque 2

**Figura 4-70.** Daños estructurales en el caso 14 (Bloque 2)



a) Daño en elementos arquitectónicos. Caída de particiones interiores



b) Daño en instalaciones. Daño en las tuberías



c) Daño en equipamiento médico. Caída de escombros en hospitalización



d) Daño en contenidos. Escombros sobre mobiliario

**Figura 4-71.** Daños no estructurales en el caso 14 (Bloque 2)



## Hospital IESS Manta

Ciudad / estado (provincia) / país: Manta / Manabí / Ecuador

Coordenadas geográficas: 0.955° S 80.724° W

15



Figura 4-72. Vistas generales del Hospital IESS

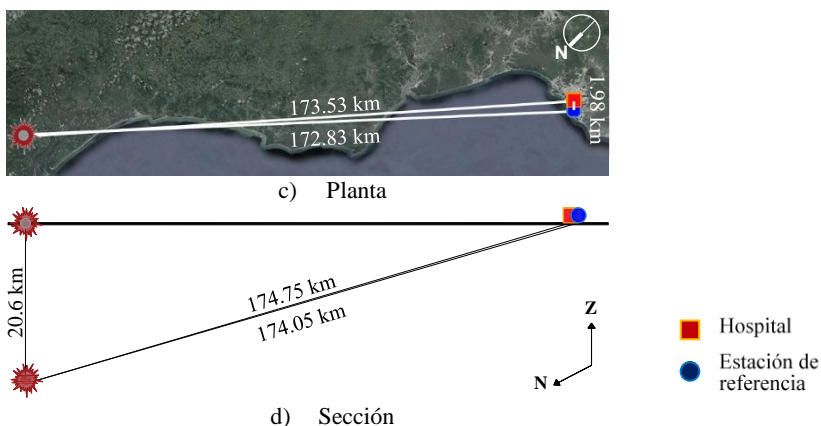


Figura 4-73. Distancia a la fuente y a la estación sismológica de referencia para el caso 15

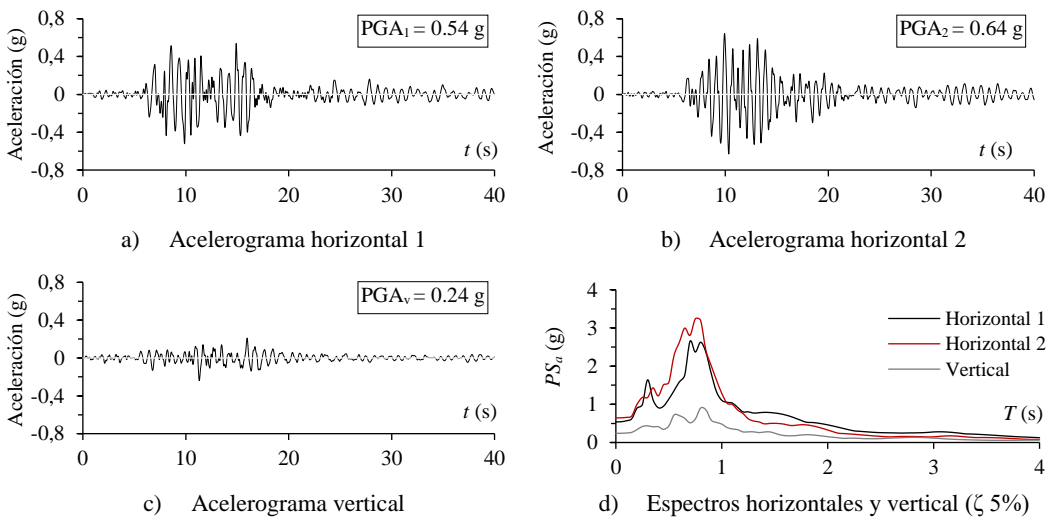


Figura 4-74. Excitación sísmica para el caso 15

## Hospital IESS

# 15

### DAÑOS OBSERVADOS



a) Daño estructural. Fisuras en un nudo viga-columna



b) Daño estructural. Fisuras en un nudo viga-columna

**Figura 4-75.** Daños estructurales en el caso 15



a) Daño en elementos arquitectónicos. Daño en fachadas y acristalamiento



b) Daño en instalaciones. Caída de tuberías y ductos



c) Daño en equipamiento médico. Daño en unidades de atención hospitalaria



d) Daño en contenidos. Escombros sobre mobiliario

**Figura 4-76.** Daños no estructurales en el caso 15

## Hospital Rodríguez Zambrano

# 16

Ciudad / estado (provincia) / país: Manta / Manabí / Ecuador

Coordenadas geográficas: 0.954° S 80. 742° W



a) Planta

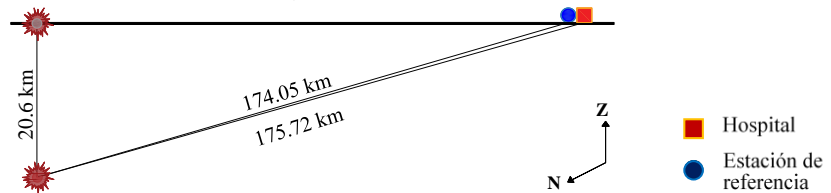
b) Fachada principal

c) Fachada lateral

Figura 4-77. Vistas generales del Hospital Rodríguez Zambrano

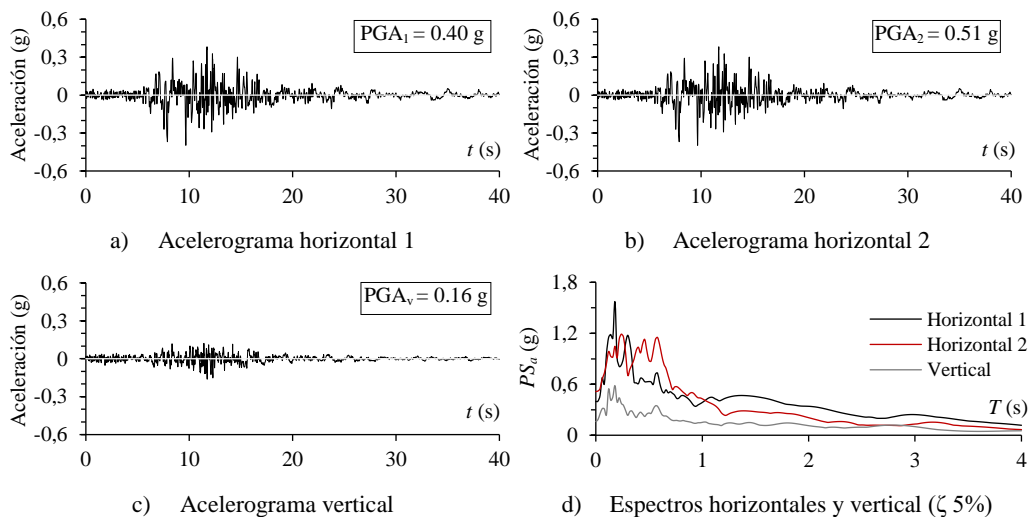


a) Planta



a) Sección

Figura 4-78. Distancia a la fuente y a la estación sísmológica de referencia para el caso 16



a) Acelerograma horizontal 1

b) Acelerograma horizontal 2

c) Acelerograma vertical

d) Espectros horizontales y vertical ( $\zeta$  5%)

Figura 4-79. Excitación sísmica para el caso 16

Hospital Rodríguez Zambrano

16

DAÑOS OBSERVADOS



a) Daño estructural. Sin daño evidente

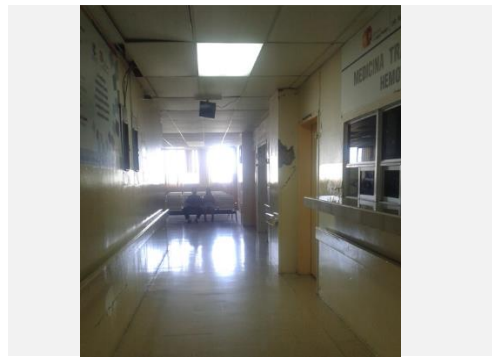


b) Daño estructural. Sin daño evidente

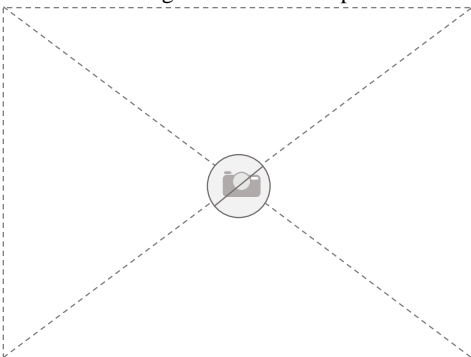
Figura 4-80. Daños estructurales en el caso 16



a) Daño en elementos arquitectónicos. Grietas diagonales en la mampostería



b) Daño en instalaciones. Sin daño



c) Daño en equipamiento médico



d) Daño en contenidos. Caída de escombros en oficinas de administración

Figura 4-81. Daños no estructurales en el caso 16

## Hospital de Gineco Obstetricia N.-3 (Centro Médico Nacional La Raza)

# 17

Ciudad / estado (provincia) / país: México CDMX / México / México

Coordenadas geográficas: 19.466° N 99.144° W



Figura 4-82. Vistas generales del Hospital de Gineco Obstetricia 3

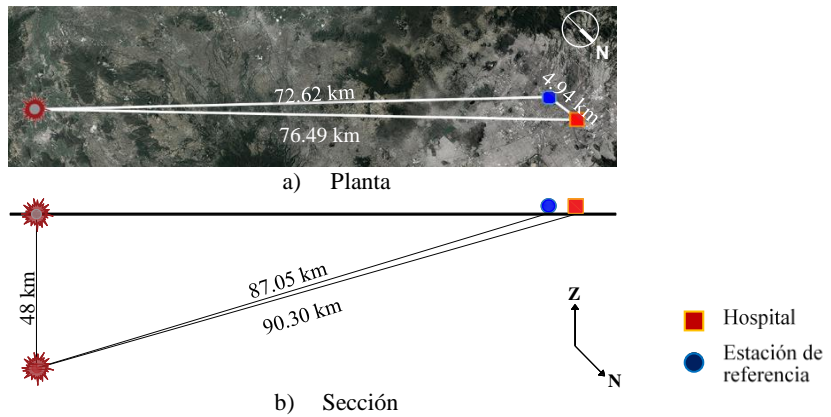


Figura 4-83. Distancia a la fuente y a la estación sísmológica de referencia para el caso 17

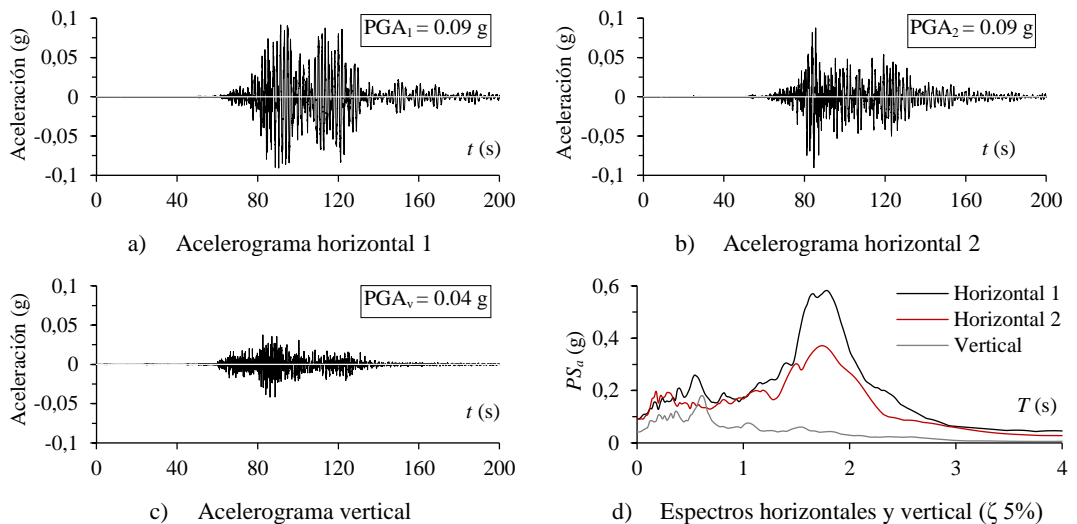
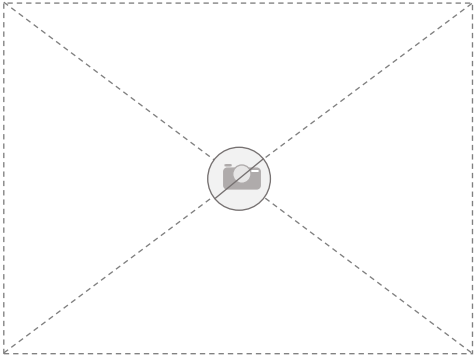


Figura 4-84. Excitación sísmica para el caso 17

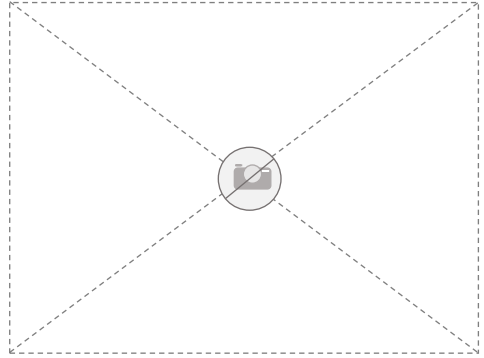
**Hospital de Gineco Obstetricia N.-3  
(Centro Médico Nacional La Raza)**

**17**

**DAÑOS OBSERVADOS**



a) Daño estructural. Sin daño visible



b) Daño estructural. Sin daño visible

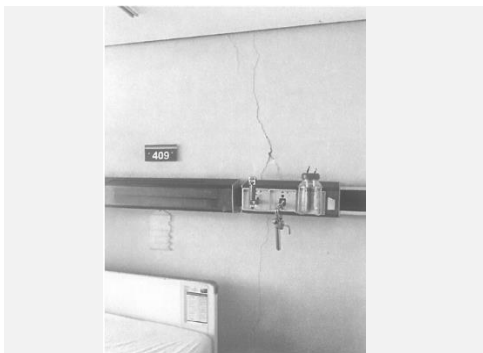
**Figura 4-85. Daños estructurales en el caso 17**



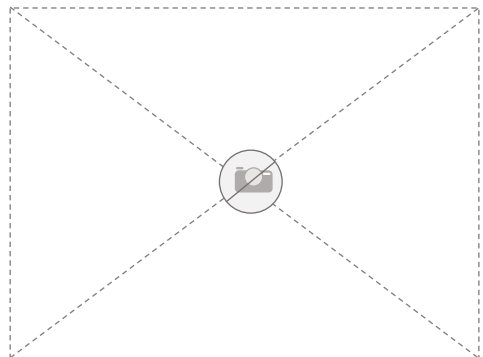
a) Daño en elementos arquitectónicos. Caída de techo falso y partición de bloques de vidrio



b) Daño en instalaciones. Sin daño aparente



c) Daño en equipamiento médico. Daño leve, fisuras en muros de mampostería



d) Daño en contenidos. Sin daño aparente

**Figura 4-86. Daños no estructurales en el caso 17**



## 5 IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN UNA HERRAMIENTA AUTOMATIZADA

- 5 IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN UNA HERRAMIENTA AUTOMATIZADA
  - 5.1 Estructura de la herramienta automatizada propuesta
  - 5.2 Calibración y validación de la herramienta automatizada
  - 5.3 Empleo de la herramienta automatizada para anticipar daños en infraestructura hospitalaria con diseño convencional y no convencional bajo escenarios sísmicos
  - 5.4 Análisis y discusión de resultados

En este capítulo se presenta la implementación de la metodología propuesta mediante una herramienta automatizada de apoyo a la toma de decisiones en materia de inversión en rehabilitación sísmica de estructuras existentes y/o protección sísmica de infraestructura hospitalaria futura. La herramienta permite evaluar la susceptibilidad de daños por sismos, considerando las fuerzas inerciales actuando sobre la estructura y las derivas de entrepiso inducidas por estas fuerzas inerciales. La herramienta propuesta no considera efectos de interacción suelo-estructura. Asimismo, no permite anticipar el comportamiento del suelo como consecuencia del terremoto tales como licuefacción, deslizamientos o asentamientos del terreno, entre otros. En particular, la herramienta automatizada se enfoca en anticipar el daño probable relacionado con la pérdida de función en infraestructuras hospitalarias ante un determinado escenario de evento sísmico.

Este capítulo se encuentra organizado en cuatro apartados. Apartado 5.1 presenta una descripción detallada de la estructura de la herramienta automatizada propuesta. Apartado 5.2 describe la metodología de calibración y validación de la herramienta automatizada. Apartado 5.3 presenta el empleo de la herramienta automatizada para anticipar daños en infraestructura hospitalaria con diseño convencional y no convencional bajo escenarios sísmicos.



Finalmente, el análisis y la discusión de resultados se presenta en el Apartado 5.4.

### 5.1 Estructura de la herramienta automatizada propuesta

En este apartado se presenta la implementación de la metodología propuesta para la evaluación rápida de la susceptibilidad de pérdida de función por sismos en infraestructura hospitalaria mediante una herramienta automatizada. La estimación del daño tanto estructural como no estructural se efectúa utilizando curvas de fragilidad disponibles en bases de datos como las de FEMA P-58, HAZUS y documentos de pruebas experimentales o métodos analíticos, como se describe en el subapartado 2.2.3.3. Las acciones sísmicas han sido estimadas a partir de acelerogramas registrados en las estaciones sismológicas más cercanas a los hospitales estudiados, como se describe en el subapartado 3.3. La herramienta automatizada es calibrada comparando los daños observados en los casos reales con los estimados usando la herramienta propuesta, obtenidos de evaluar las curvas de fragilidad disponibles para las demandas sísmicas estimadas. La herramienta ha sido validada con los pesos encontrados mediante la metodología de calibración propuesta en este estudio.

La evaluación del “Índice de Pérdida de Función” o “Índice de Seguridad Hospitalaria SI” de la infraestructura hospitalaria se efectúa a partir del desempeño sísmico tanto estructural como no estructural. La evaluación de pérdida de función se clasifica en: i) pérdida de función baja y/o nula; ii) pérdida de función temporal; y iii) pérdida de función permanente. El subapartado 3.2.3 describe cada grado de pérdida de función. La Figura 5-1 ilustra la metodología a nivel conceptual.

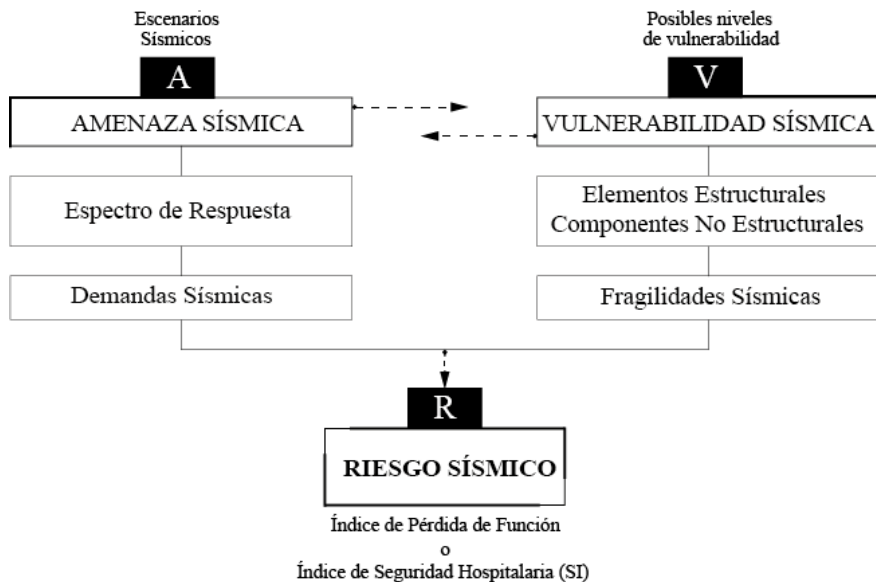


Figura 5-1. Propuesta conceptual de la metodología propuesta para la herramienta automatizada

A continuación, en los subapartados 5.1.1 y 5.1.2 se explica la estructura de la herramienta automatizada para estimar tanto el desempeño sísmico estructural como no estructural, respectivamente. En el subapartado 5.1.3 se presenta las demandas sísmicas de los casos de estudio en el escenario de sismo registrado.

### 5.1.1 Estructura de la herramienta automatizada para estimar el desempeño sísmico estructural

Es importante destacar que el presente análisis no constituye ni pretende reemplazar un estudio detallado del riesgo sísmico de la estructura. El objetivo de la herramienta es únicamente proporcionar un instrumento simplificado para la evaluación del desempeño sísmico del sistema resistente estructural. Complementariamente, la herramienta puede ser utilizada para verificar si se alcanza una armonía entre el desempeño sísmico de elementos estructurales y no estructurales, requerida por las filosofías de diseño actuales.

La metodología propuesta, consiste en seleccionar entre las 21 curvas de fragilidad sísmica para elementos estructurales descritas en el subapartado 3.2.4, la curva de fragilidad sísmica aplicable a la infraestructura analizada. Los tipos de sistemas resistentes considerados en la herramienta corresponden a pórticos de hormigón armado, muros de corte de hormigón armado, y pórticos de hormigón armado con paredes de relleno de mampostería sin refuerzo. Asimismo, se considera como variable de selección de las curvas de fragilidad el número de plantas o altura del edificio, y el diseño sísmico considerado según el código de diseño utilizado, calificado como alto, medio o bajo. En el Anejo B se resume cada estado de daño de las fragilidades sísmicas para cada sistema resistente estructural. El parámetro de demanda sísmica considerado es el desplazamiento espectral, en metros (m), de acuerdo al planteamiento propuesto en el subapartado 3.3.1. Para determinar el daño probable del sistema resistente en infraestructuras hospitalarias analizadas se considera el planteamiento del apartado 3.4. En consecuencia, se determina el **desempeño sísmico estructural** ( $I_{STR}$ ) de la infraestructura hospitalaria, de acuerdo a lo descrito en el subapartado 3.2.1, como: daño leve, ocupación inmediata; daño moderado, control de daño; daño extenso, seguridad de la vida; y daño completo, prevención de colapso.

### 5.1.2 Estructura de la herramienta automatizada para estimar el desempeño sísmico en componentes y sistemas no estructurales

La metodología propuesta para estimar el desempeño sísmico no estructural ( $I_{NSTR}$ ) se basa principalmente en las estrategias de Evaluación Visual Rápida (RVS) en edificaciones esenciales descritas en [Lang et al., 2009; Perrone et al., 2015; FEMA, 2015; De Angelis y Pecce, 2015; WHO/PAHO, 2015] explicadas en el subapartado 2.2.3. Sin embargo, estos métodos prestan poca o nula atención a la variable relacionada con la pérdida de función y con la amenaza sísmica del sitio.

En este contexto, a fin de evaluar la influencia de cada categoría en la pérdida de función en infraestructuras hospitalarias cuantificada mediante un Índice de Vulnerabilidad  $I_{NSTR_i}$  (denominada con el subíndice  $i$ , donde  $i$  varía entre 1 y 4). La metodología propuesta en este trabajo consiste en obtener inicialmente la vulnerabilidad sísmica cuantificada mediante un Índice de Vulnerabilidad para cada categoría asociada con la subcategoría analizada  $I_{NSTR_{ij}}$  (denominada con el subíndice  $j$ , donde  $j$  varía entre 1 y 5). Este estudio considera cuatro categorías de componentes y sistemas no estructurales tales como: i) elementos arquitectónicos, incluye subcategoría exterior e interior; ii) instalaciones, incluye subcategoría de equipos de sistemas críticos y de sistemas distribuidos; iii) equipamiento médico, se agrupa en dos subcategorías. Por un lado, la subcategoría de Servicios Médicos, se ha considerado los Servicios Asistenciales, Servicio de Diagnóstico y Tratamiento, Servicio de Análisis y Medicación, y Servicios Generales y de Apoyo, también como subcategorías con el objetivo de comprobar si las curvas de fragilidad sísmicas con mayor similitud posible para equipos médicos eran las adecuadas (ver Apartado 3.1). Por otro lado, la subcategoría de Gases Médicos, incluye sistemas de suministro de gas médico; y iv) categoría de contenidos, incluye mobiliario, accesorios, estanterías y similares.

Los componentes y sistemas no estructurales de cada categoría se encuentran organizados en bloques denominados como “nombre del componente no estructural” asociado a cada “tipo de componente”. El “tipo de componente” corresponde al componente no estructural en su condición agrupado (denominado con el subíndice  $k$ ). Asimismo, el “tipo de componente” se encuentra asociado a los “subtipos de componentes” (denominado con el subíndice  $l$ ) y corresponde a las 125 curvas de fragilidad sísmica descritas en el subapartado 3.2.5. Además, cada estado de daño de las curvas de fragilidad sísmica se resume en el Anejo B.

El “tipo de componente” agrupado se caracteriza: i) por el tipo de material de cada componente y sistema no estructural; ii) por los sistemas de sujeción (anclajes) de los componentes; y/o iii) por los niveles de diseño sísmico SDC (por sus siglas en inglés, Seismic Design Category). Para los límites máximos anteriores a la adopción de códigos con criterios de detalle sísmico (edificios antiguos), se deben seleccionar las fragilidades sísmicas asociadas con el nivel de diseño sísmico A/B. Para considerar los niveles de diseño sísmico C, D y E/F se evalúa el nivel de detallamiento sísmico de los componentes y sistemas no estructurales, es decir, la incorporación de arriostres, anclajes y certificaciones sísmicas de componentes y sistemas críticos. El nivel detallamiento sísmico se encuentra especificado en memorias técnicas y planos arquitectónicos, entre otros. Además, dicha información se puede obtener o constatar mediante la inspección visual de la infraestructura hospitalaria a analizar. Para más información, el subapartado 3.2.5 describe ampliamente los niveles de diseño sísmico SDC. Por otra parte, es importante mencionar que las fragilidades sísmicas no seleccionadas en el caso de estudio no interfieren en el resultado global de la pérdida de función en la infraestructura analizada. A continuación, se explica cronológicamente los procedimientos de cálculo:

**Paso 1.** Para automatizar la base de datos de los “subtipos de componentes” asociado a cada curva de fragilidad sísmica (125 curvas de fragilidad sísmica) con el daño anticipado, se considera:

1. Incorporación de las demandas sísmicas estimadas de acuerdo al subapartado 3.3 en la base de datos de la herramienta propuesta.
2. Automatización de la evaluación del daño probable en cada curva de fragilidad, de acuerdo al subapartado 3.4.

**Paso 2.** Para determinar el Índice Primario de Vulnerabilidad de la categoría asociada a la subcategoría analizada ( $I_{PVij}$ ), se considera:

1. **Importancia operativa de cada “tipo de componente”** ( $k$ ), se cuantifica mediante un coeficiente de ponderación ( $P_{ijk}$ ). En otras palabras, corresponde al nivel de importancia (peso inicial) del “tipo de componente” en la pérdida de operación de la categoría asociada a la subcategoría analizada. Asimismo, cada subcategoría adquiere un valor ponderado ( $P_s$ ) en cada categoría como la suma de los pesos considerados en cada “tipo de componente”. La suma de los valores ponderados (pesos) de las subcategorías es el 100% de la categoría respectiva.

Los pesos iniciales correspondientes a cada “tipo de componente” son obtenidos: i) de los resultados de las metodologías de Evaluación Visual Rápida (RVS) de acuerdo al subapartado 2.2.3; ii) del análisis global de literatura de daños reales como se describe en el Capítulo 4, así como la información de los casos de estudio no descritos en este estudio, sin embargo, contribuyeron para los valores de los pesos iniciales; y iii) opinión de expertos.

El peso inicial ( $P_{ijk}$ ) es clave en esta metodología, debido al efecto decisivo en el resultado final. Por lo tanto, los valores de los pesos asumidos como punto de partida en este procedimiento deben calibrarse y validarse.

2. **Importancia de la respuesta de los “subtipos de componentes”** ( $l$ ), para cada subtipo de componente no estructural se consideran cinco posibles estados de daño  $DS_l$ : nulo (no daño);  $DS_{0_l}$ ; leve  $DS_{1_l}$ ; moderado  $DS_{2_l}$ ; extenso  $DS_{3_l}$ ; y completo  $DS_{4_l}$ , asociados a un valor numérico llamado “índice del estado de daño” ( $DS_{ijkl}$ ). El valor de ( $DS_{ijkl}$ ) asignado a cada ( $DS_l$ ) se determina de acuerdo a los criterios expuestos por [Lang et al., 2009; Perrone et al., 2015], y son iguales a 0, 2, 4, 8 y 16, respectivamente. En otras palabras, según las características de los “subtipos de componentes” en la infraestructura hospitalaria se debe seleccionar entre las 125 fragilidades sísmicas, el “subtipo de componente” ( $l$ ) que corresponda. Por consiguiente, para relacionar el daño anticipado con los estados de daño a nivel cuantitativo, es como se expresa en la Ec. (5-1).

$$DS_{ijkl} = DS_l \times P_{ijk} \quad (5-1)$$

donde  $DS_l$  es igual a cero (0) si el  $l$ -ésimo daño del componente no estructural es igual a cero (0);  $DS_l$  es igual a dos (2) si el  $l$ -ésimo daño del componente no estructural es igual a uno (1);  $DS_l$  es igual a cuatro (4) si el  $l$ -ésimo daño del componente no estructural es igual a dos (2);  $DS_l$  es igual a ocho (8) si el  $l$ -ésimo daño del componente no estructural es igual a tres (3);  $DS_l$  es igual a dieciséis (16) si el  $l$ -ésimo daño del componente no estructural es igual a cuatro (4).  $P_{ijk}$  es el peso inicial.

Para obtener la importancia de cada “tipo de componente” ( $k$ ) es como se expresa en la Ec. (5-2).

$$DS_{ijk} = \sum_l DS_{ijkl} \quad (5-2)$$

Por consiguiente, el Índice Primario de Vulnerabilidad de cada categoría asociada a la subcategoría analizada ( $I_{PV_{ij}}$ ), se obtiene como se expresa en la Ec. (5-3).

$$I_{PV_{ij}} = \frac{\sum_k DS_{ijk}}{\sum_k P_{DS_{ijk}}} \quad (5-3)$$

donde  $P_{DS_{ijk}}$  es la puntuación asignada al nivel máximo posible de vulnerabilidad para el “tipo de componente”, es decir, es igual a  $16P_{ijk}$ .

**Paso 3.** Para determinar el Índice de Vulnerabilidad de cada categoría asociada a la subcategoría analizada ( $I_{NSTR_{ij}}$ ), es decir, influencia de cada subcategoría ( $j$ ) en la pérdida de operación de la categoría correspondiente, se considera:

1. Relación del daño máximo anticipado ( $P_{DS_{ij}}$ ) de la categoría asociado a la subcategoría analizada con el daño máximo posible del “tipo de componente” en su condición agrupado ( $P_{DS_{ijk}}$ ). La Ec. (5-4) expresa dicha relación.

$$P_{DS_{4ij}} = \frac{\sum_k P_{DS_{4ijk}}}{\sum_i \sum_j \sum_k P_{DS_{4ijk}}} \quad (5-4)$$

2. Factor de regulación ( $\varphi_{ij}$ ) del efecto de número de “tipo de componentes” de la categoría asociada a la subcategoría analizada. La Ec. (5-5) expresa dicha relación.

$$\varphi_{ij} = \frac{\sum_i \sum_j n_{ij}}{n_{ij}} \quad (5-5)$$

donde  $n_{ij}$  es el número máximo del “tipo de componente” en su condición agrupado de la categoría ( $i$ ) asociada a la subcategoría ( $j$ ) analizada.

3. **Importancia de cada categoría asociada a la subcategoría analizada** ( $\bar{W}_{ij}$ ), corresponde a la combinación de la Ec. (5-4) y (5-5). La Ec.(5-6) expresa la relación.

$$W_{ij} = P_{DS_{4ij}} \times \varphi_{ij} \quad (5-6)$$

En consecuencia, mediante el valor promedio de la Ec. (5-6) se tiene la importancia de cada categoría asociada a la subcategoría analizada. La Ec. (5-7) expresa la relación.

$$\bar{W}_{ij} = \frac{W_{ij}}{\sum_i \sum_j W_{ij}} \quad (5-7)$$

4. **Índice de Vulnerabilidad preliminar de cada categoría asociada a la subcategoría analizada** ( $I_{NSTR_{p_{ij}}}$ ), corresponde al producto entre el Índice Primario de Vulnerabilidad ( $I_{PV_{ij}}$ ) y el valor promedio de la importancia de cada categoría asociada a la subcategoría analizada ( $\bar{W}_{ij}$ ), como se muestra en la Ec. (5-8).

$$I_{NSTR_{p_{ij}}} = I_{PV_{ij}} \times \bar{W}_{ij} \quad (5-8)$$

5. **Índice de Vulnerabilidad de cada categoría asociada a la subcategoría analizada** ( $I_{NSTR_{ij}}$ ), es decir, influencia de cada categoría asociada a cada subcategoría en la pérdida de operación, y se calcula de acuerdo a la Ec. (5-9).

$$I_{NSTR_{ij}} = I_{NSTR_{p_{ij}}} (AF \times ASF) \quad (5-9)$$

donde AF y ASF son factores de modificación asociados a valores numéricos. Los factores de modificación se basan en las directrices de la metodología de FEMA 154 [FEMA, 2015], la metodología de evaluación del comportamiento sísmico de los edificios de hormigón armado existentes en Japón [JBDPA, 2005] y el método de detección rápida para edificios hospitalarios y escuelas [Lang et al., 2009], descritas en el subapartado 2.2.3. El valor cuantitativo de los factores de modificación se define de acuerdo a [Lang et al., 2009] descrita en el subapartado 2.2.3.2 que modifican el valor estimado en la Ec. (5-8) acorde a la realidad actual del edificio, tales como: i) factor de edad de la infraestructura hospitalaria  $AF$ ; y ii) factor de estado real de la infraestructura hospitalaria  $ASF$ . El factor de edad  $AF$  se combina con el valor numérico obtenido de la diferencia entre el año del evento sísmico/evaluación del hospital y el año de diseño/construcción del proyecto. Respecto al factor de estado real  $ASF$  se considera

opciones tales como: i) infraestructura nueva; ii) infraestructura recientemente rehabilitada; iii) infraestructura que necesita ser rehabilitada; y iv) estructura deteriorada. Esta estrategia libera en cierta medida la necesidad de modificar el Índice de Vulnerabilidad, acorde al contexto actual de la infraestructura hospitalaria.

**Paso 4.** Para conocer la influencia en porcentaje (%) de cada categoría analizada en la pérdida de función en la infraestructura hospitalaria denominado como Índice de Vulnerabilidad, se procede primero como se muestra en la Ec. (5-10).

$$\overline{I_{NSTR_{ij}}} = \frac{I_{NSTR_{ij}}}{\sum_i \sum_j I_{NSTR_{ij}}} \quad (5-10)$$

donde  $\overline{I_{NSTR_{ij}}}$  corresponde al valor promedio del Índice de Vulnerabilidad de la categoría asociada a la subcategoría analizada.

La Ec. (5-11) expresa la relación en porcentajes (%) del Índice de Vulnerabilidad ( $\overline{I_{NSTR_i}}$ ).

$$\overline{I_{NSTR_i}} = \sum_j \overline{I_{NSTR_{ij}}} \quad (5-11)$$

**Paso 5.** Para representar el nivel operativo de cada categoría asociado con la subcategoría analizada ( $DS_{ij}$ ), es decir, el estado de daño, se procede como se muestra en la Ec. (5-12).

$$DS_{ij} = I_{PV_{ij}} (AF \times ASF) \quad (5-12)$$






La evaluación del nivel operativo de la categoría asociado a la subcategoría analizada es mediante el uso de colores, similar a la presentación de resultados del desempeño no estructural.

**Paso 6.** Para obtener el **desempeño sísmico no estructural** ( $I_{NSTR}$ ) se procede como se muestra en la Ec. (5-13).

$$I_{NSTR} = \sum_i \sum_j I_{NSTR_{ij}} \quad (5-13)$$

Para relacionar el valor cuantitativo de la Ec. (5-13) con los niveles de daño, se ha considerado los umbrales de daño de acuerdo a RISK-EU [Milutinovic y Trendafiloski, 2003] como se describe en la Tabla 5-1. Además, cada nivel de daño se encuentra asociado a un color, por ejemplo, color verde daño leve y color rojo daño completo.

**Tabla 5-1.** Umbrales de daños RISK-EU [Milutinovic y Trendafiloski, 2003]

| Color   | Nivel de daño | Descripción     | Índices de pérdida         |             |
|---|---------------|-----------------|----------------------------|-------------|
|  | Ningún daño   | DS <sub>0</sub> | Sin daños                  | 0.00        |
|  | Leve/Ligero   | DS <sub>1</sub> | Daño insignificante a leve | 0.00 - 0.05 |
|  | Moderado      | DS <sub>2</sub> | Daño leve a moderado       | 0.05 - 0.20 |
|  | Extenso       | DS <sub>3</sub> | Daño moderado a extenso    | 0.20 - 0.50 |
|  | Completo      | DS <sub>4</sub> | Daño extenso a completo    | 0.50 - 1.00 |

La respuesta del **desempeño sísmico no estructural** ( $I_{NSTR}$ ) es expresada de acuerdo a lo descrito en el subapartado 3.2.2 como: daño leve, totalmente operativo; daño moderado, ocupación

inmediata; daño extenso, seguridad de la vida; y daño completo, prevención de colapso. Para más detalles de la estructura y formulario físico de la herramienta automatizada refiérase al Anejo D.

### 5.1.3 Demandas sísmicas de los casos de estudio en el escenario de sismo registrado

Las demandas sísmicas han sido estimadas de acuerdo al planteamiento del subapartado 3.3. Los parámetros de demanda de ingeniería (EDP) considerados son el desplazamiento espectral (m) para las fragilidades sísmicas de la estructura, mientras que la deriva de entrepiso (rad), la aceleración máxima de piso (PFA) o aceleración máxima del suelo (PGA) para fragilidades sísmicas de componentes y sistemas no estructurales. La Tabla 5-2 muestra las demandas sísmicas estimadas.

**Tabla 5-2.** Demandas sísmicas estimadas para los casos de estudio (sismo registrado)

| País<br>(Terremoto)       | Caso<br>de<br>estudio | Demandas sísmicas estimadas   |                            |         |         |           |         |
|---------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|---------|---------|-----------|---------|
|                           |                       | Desplaza.<br>espectral<br>(m) | Deriva<br>entrep.<br>(rad) | PGA (g) | PFA (g) |           |         |
|                           |                       |                               |                            |         | Nivel 0 | Nivel 0.5 | Nivel 1 |
| California (San Fernando) | 1                     | 0.157                         | 0.0110                     | 0.64    | 0.64    | 1.12      | 1.60    |
| California (Northridge)   | 2                     | 0.116                         | 0.0052                     | 0.72    | 0.72    | 1.27      | 1.81    |
| Turquía (Kocaeli)         | 3                     | 0.019                         | 0.0013                     | 0.20    | 0.20    | 0.35      | 0.50    |
| Taiwán (Chi-Chi)          | 4                     | 0.072                         | 0.0031                     | 0.24    | 0.24    | 0.42      | 0.60    |
| El Salvador (El Salvador) | 5                     | 0.077                         | 0.0054                     | 0.48    | 0.48    | 0.85      | 1.21    |
| Hawái (Kiholo Bay)        | 6                     | 0.012                         | 0.0016                     | 0.44    | 0.44    | 0.78      | 1.11    |
| Perú (Pisco)              | 7                     | 0.020                         | 0.0020                     | 0.30    | 0.30    | 0.53      | 0.76    |
| Italia (L'Aquila)         | 8                     | 0.046                         | 0.0058                     | 0.61    | 0.61    | 1.07      | 1.52    |
| Chile (Maule)             | 9                     | 0.062                         | 0.0036                     | 0.63    | 0.63    | 1.10      | 1.57    |
|                           | 10                    | 0.069                         | 0.0052                     | 0.26    | 0.26    | 0.46      | 0.65    |
| España (Lorca)            | 11                    | 0.034                         | 0.0035                     | 0.26    | 0.26    | 0.45      | 0.64    |
| Italia (Emilia)           | 12                    | 0.028                         | 0.0026                     | 0.26    | 0.26    | 0.46      | 0.66    |
|                           | 13                    | 0.038                         | 0.0034                     | 0.35    | 0.35    | 0.61      | 0.88    |
|                           | 14                    | 0.079                         | 0.0047                     | 0.35    | 0.35    | 0.61      | 0.88    |
| Ecuador (Muisne)          | 15                    | 0.078                         | 0.0063                     | 0.59    | 0.59    | 1.03      | 1.48    |
|                           | 16                    | 0.056                         | 0.0034                     | 0.46    | 0.46    | 0.80      | 1.14    |
| México (Puebla)           | 17                    | 0.018                         | 0.0010                     | 0.09    | 0.09    | 0.16      | 0.23    |

## 5.2 Calibración y validación de la herramienta automatizada

En este apartado se presenta la metodología de calibración propuesta en este estudio a fin de obtener los pesos calibrados ( $P_{ijk_h}$ ), es decir, el valor numérico de la importancia de cada tipo de componente no estructural en la pérdida de función del hospital analizado. Dichos pesos permitirían, adicionalmente, validar la metodología de la herramienta automatizada propuesta. En particular, se evalúa la adecuación de los pesos iniciales presentados como valores de partida en

la calibración de cada caso de estudio con el daño observado. A continuación, se detalla la metodología de calibración propuesta.

### 5.2.1 Metodología de calibración de la herramienta automatizada propuesta

En este subapartado se presenta la metodología propuesta para la calibración de los pesos de las categorías asignando valores a cada “tipo de componente” en su condición agrupado, como por ejemplo características de las particiones, falsos techos, entre otras, que forman parte de la subcategoría. La calibración consiste en asumir variaciones a los pesos  $P_{ijk_a}$  de tal manera que se produzca un ajuste entre los valores calculados y los valores observados (registrados en los casos reales). Los pesos establecidos inicialmente  $P_{ijk}$  son obtenidos como se menciona en el subapartado 5.1.2. Una vez que los pesos iniciales son determinados, se utiliza un método recursivo para su ajuste. Como parte de este trabajo se analizaron los datos de  $N$  infraestructuras hospitalarias. Cada infraestructura hospitalaria (denominada con el subíndice  $h$ ) es calibrada en orden desde  $h = 1$  hasta  $h = N$ . Es importante destacar que el orden consecutivo propuesto de los casos de estudio responde al año del evento sísmico, es decir, se tiene una variedad en la severidad del terremoto en los casos de estudio de manera alternada. De esta manera, se va calibrando cada “tipo de componente” que forma parte de cada subcategoría de las cuatro categorías de los componentes y sistemas no estructurales, por ejemplo, categoría de elementos arquitectónicos, el peso ( $P_s$ ) correspondiente a la subcategoría exterior es el 34% y subcategoría interior el 66%. Consecuentemente, una vez que los pesos  $P_{ijk_h}$  se ajustan al caso  $h$ , dichos valores sirven como condición inicial para el caso  $h + 1$ . Un diagrama de flujo para su cálculo es presentado en la Figura 5-2.

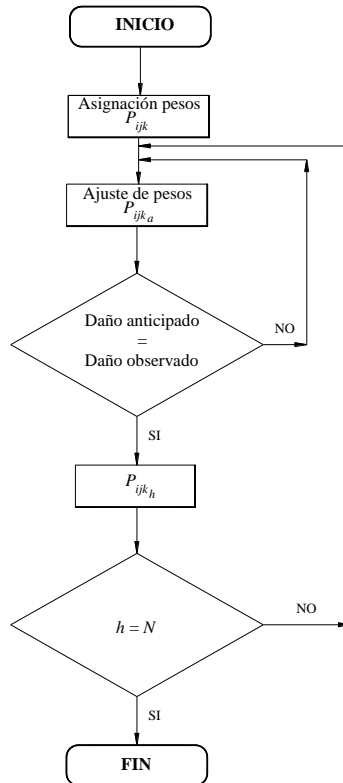


Figura 5-2. Metodología de calibración de la herramienta automatizada propuesta



Finalmente, cuando los pesos  $P_{ijk_a}$  se ajustan al caso número  $N$ , se realiza el análisis de sensibilidad que se describe a continuación. Para conocer la importancia de la variable de entrada, es decir, el peso inicial  $P_{ijk}$  respecto al peso encontrado  $P_{ijk_e}$ , se propone el siguiente proceso: i) se estima un valor representativo de los valores de los pesos calibrados de todos los casos de estudio para cada tipo de componente que forma cada subcategoría. En este estudio, se propone como estadístico la media aritmética ( $\bar{x}$ ); ii) se localizan todas las incertidumbres individuales de las variables a partir de la desviación estándar ( $\sigma$ ) para cuantificar la dispersión respecto al valor de la media aritmética; iii) se calcula el intervalo de confianza de la media al 95% de confianza de cada una de las subcategorías con la finalidad de cuantificar la fiabilidad de las estimaciones con un confianza determinada; iv) para determinar si la media aritmética ( $\bar{x}$ ) se aproxima al peso final requerido se estima el error relativo ( $\epsilon_r$ ). El error relativo es la relación entre el error absoluto ( $\epsilon_a$ ) y el valor de la media aritmética  $\bar{x}$ , en cada tipo de componentes que forman la subcategoría de cada categoría analizada. El error relativo representado en porcentaje (%) determina la precisión de la medición, en otras palabras, indica la proporción del error con respecto al valor exacto de la medición.

### 5.2.2 Pesos de ponderación de entrada

En este estudio, el peso inicial considerado para cada tipo de componentes no estructurales es de acuerdo a lo considerado en el subapartado 5.1.2. Para su mejor comprensión, en el Anejo D se describe el peso inicial para cada tipo de componente no estructural, conjuntamente con el formulario físico de la herramienta propuesta. La Tabla 5-3 resume los pesos ( $P_s$ ) de cada subcategoría que constituye cada categoría de elementos arquitectónicos, instalaciones, equipamiento médico y contenidos. Los pesos son el resultado de la suma del peso específico correspondiente de cada tipo de componente no estructural de cada subcategoría.

**Tabla 5-3.** Pesos de entrada (%) para subcategorías de componentes y sistemas no estructurales

| Categoría          | Elementos arquitectónicos |          | Instalaciones                |                   | Equipamiento médico |               | Contenidos                                |
|--------------------|---------------------------|----------|------------------------------|-------------------|---------------------|---------------|---|
|                    | Exterior                  | Interior | Equipos de sistemas críticos | Sistemas distrib. | Servicios Médicos   | Gases médicos |   |
| Subcategorías      |                           |          |                              |                   |                     |               | Mobiliario, accesorios, estanterías, etc. |
| Peso ( $P_s$ ) (%) | 34                        | 66       | 44                           | 56                | 55                  | 45            | 100                                       |
| Total (%)          | 100                       |          | 100                          |                   | 100                 |               | 100                                       |

### 5.2.3 Proceso de calibración de la herramienta automatizada con los daños observados en los casos de estudio

Este subapartado presenta los resultados obtenidos en el proceso de calibración de los casos de estudio, aplicando la metodología propuesta mediante el uso de una herramienta automatizada descrita en el subapartado 5.1. Se presenta la influencia de cada componente y sistema no estructural (categoría y subcategoría) en la pérdida de operación de los componentes no estructurales. Los daños observados son de acuerdo a la información de los casos reales descritos en el Capítulo 4 y Anejo C.

La Tabla 5-4 muestra la calibración efectuada entre el daño observado y el daño anticipado en el caso de estudio 1, correspondiente al terremoto de San Fernando 1971. Asimismo, la tabla indica el grado de pérdida de función.

Tabla 5-4. Calibración caso de estudio 1

| Análisis de la infraestructura hospitalaria | Daño    |          | Visualización de resultados   |
|---|---------|----------|---|
|   | Observ. | Anticip. |   |
| <b>Desempeño sísmico estructural</b>        | E       | E        | <p>Influencia de cada categoría y subcategoría en pérdida de función</p> <p><b>Nivel de pérdida de función:</b><br/>Pérdida de función permanente</p> |
| <b>1. Elementos arquitectónicos</b>         |         |          |   |
| Exteriores (EX)                             | C       | C        |   |
| Interiores (IN)                             | C       | C        |   |
| <b>2. Instalaciones</b>                     |         |          |   |
| Equipos de sistemas críticos (SC)           | C       | C        |   |
| Sistemas distribuidos (SD)                  | C       | C        |   |
| <b>3. Equipamiento médico</b>               |         |          |   |
| <b>3.1. Servicios médicos</b>               |         |          |   |
| Servicios Asistenciales (SA)                | E       | E        |   |
| Diagnóstico y Tratamiento (DT)              | E       | E        |   |
| Servicio de Análisis y Medicación (AM)      | N/A     | N/A      |   |
| Servicios Generales y de Apoyo (SE)         | N/A     | N/A      |   |
| <b>3.2. Gases médicos</b>                   |         |          |   |
| Suministro de Gas Médico (GM)               | C       | C        |   |
| <b>4. Contenido</b>                         |         |          |   |
| Mobiliario, accesorios, estanterías (CO)    | C       | C        |   |
| <b>Desempeño sísmico no estructural</b>     |         | C        |   |

Para el caso 1 (Terremoto de San Fernando, 1971), la pérdida de función es permanente. Infraestructura hospitalaria fuera de servicio por un par de semanas, meses o en forma indefinida.

De manera similar, se ha efectuado el proceso de calibración con los casos de estudio restantes y los resultados obtenidos son presentados en el Anejo C. El proceso de calibración permite inferir que el enfoque de agrupación de las curvas de fragilidad con mayor similitud posible para evaluar el daño en los equipos médicos, a pesar de su “aparente” simplicidad, ha demostrado su eficacia. El subapartado 3.1.2 describe la agrupación de equipos médicos.

### 5.2.4 Validación de la herramienta automatizada propuesta

Este subapartado presenta los resultados de la validación de la herramienta automatizada. El proceso de validación efectuado consistió en: i) reemplazar en la herramienta automatizada los pesos iniciales por los pesos encontrados; ii) verificar si los estados de daños tanto observado como el anticipado eran iguales; y iii) comprobar si los pesos encontrados modifican el estado de daño o grado de pérdida global representado como desempeño sísmico no estructural. Los pesos encontrados para cada tipo de componente no estructural son estimados de acuerdo a la metodología de calibración propuesta en el subapartado 5.2.1.

La Tabla 5-5 resume los resultados de la validación de la herramienta automatizada en los diecisiete casos de estudio.

**Tabla 5-5.** Resultados de la validación de la herramienta automatizada propuesta

| <b>Categorías</b>         | <b>Subcategorías</b>                             | <b>Validación (%)</b>                            |    |
|---------------------------|--|--|----|
| Elementos arquitectónicos | Exterior   | 94   |    |
|                           | Interior   | 100  |    |
| Instalaciones             | Equipos de sistemas críticos                     | 100  |    |
|                           | Sistemas distribuidos críticos                   | 100  |    |
| Equipamiento médico       | Servicios Asistenciales                          | 100  |    |
|                           | Servicios Médicos                                | Servicios Centrales de Diagnóstico y Tratamiento | 94 |
|                           | Servicio de Análisis y Medicación                | 100  |    |
|                           | Servicios Generales y de Apoyo                   | 88   |    |
|                           | Gases médicos                                    | Sistemas de suministro de gas médico             | 94 |
| Contenidos                | Mobiliario, accesorios, estanterías, entre otros | 94   |    |

A partir de los resultados de la Tabla 5-5 se concluye que la categoría de elementos arquitectónicos, instalaciones y contenidos se validan entre el 94 a 100%, mientras que la categoría de equipamiento médico se valida en un 88%, puntualmente en la subcategoría de Servicios Generales y de Apoyo. El resultado derivado en las subcategorías no validadas es generalmente un estado de daño inmediatamente superior o inferior respecto al daño calibrado con el daño real observado. No obstante, no influye en la respuesta global del desempeño sísmico no estructural, es decir, los valores no validados en las subcategorías son mínimos respecto al valor calibrado.

### **5.3 Empleo de la herramienta automatizada para anticipar daños en infraestructura hospitalaria con diseño convencional y no convencional bajo escenarios sísmicos**

En este apartado se presenta los resultados obtenidos al emplear la herramienta automatizada tanto para el escenario del sismo registrado como para el escenario normativo en los casos de estudio analizados. Adicionalmente, se ha empleado la herramienta para evaluar el nivel de pérdida funcional en caso de rehabilitar sísmicamente los componentes y sistemas estructurales y no estructurales, o de diseñar o rehabilitar la infraestructura considerando sistemas de protección sísmica tales como aislación sísmica de base. En este contexto, para evaluar la pérdida funcional bajo el escenario normativo se ha seleccionado doce casos de estudio localizados en países como Estados Unidos, Italia, Chile, España, Ecuador y México. Se considera el sismo de diseño asociado, típicamente, a períodos de retorno de 475 años, y sismos con mayor intensidad sísmica asociados, por ejemplo, a períodos de retorno de 2500 años. Se analiza si se alcanza armonía entre el desempeño sísmico de los elementos estructurales y no estructurales, para la infraestructura hospitalaria en su condición actual y rehabilitada. Los efectos de rehabilitar sísmicamente sistemas estructurales y componentes no estructurales se evalúan seleccionando curvas de fragilidad correspondientes a sistemas (estructurales y no estructurales) con alto diseño sísmico del sistema resistente y con adecuado diseño y detallamiento sísmico, respectivamente.

En el subapartado 5.3.1 se describe las demandas sísmicas estimadas de acuerdo al escenario de la norma para los casos de estudio seleccionados, mientras que el subapartado 5.3.2 muestra las demandas sísmicas reducidas en el caso de diseñar o rehabilitar con aislación sísmica de base la infraestructura hospitalaria.

### 5.3.1 Demandas sísmicas de acuerdo al escenario de la norma

En este subapartado se especifica la norma sísmica de cada caso de estudio para determinar el espectro tanto para el sismo de diseño como para el sismo máximo probable/considerado. A continuación, se describe la norma de cada caso de estudio:

- Estados Unidos, código ASCE/SEI 7-16 [ASCE, 2016]. Los espectros para los períodos de retorno de 475 años y 2475 años han sido estimados a partir de una herramienta online: <https://earthquake.usgs.gov/hazards/interactive/>.
- Italia, Norma Técnica para la Construcción (Norme Tecniche per le Costruzioni) [NTC, 2018]. Se ha considerado los espectros para períodos de retorno de 475 años y 2500 años.
- Chile, Norma NCh2745:2013. Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica. [INN, 2003]. Espectros para períodos de retorno de 475 años y 1000 años.
- España, Norma de Construcción Sismorresistente: parte general y edificación NCSE-02 [NCSE- 02, 2002]. Se ha considerado el espectro para período de retorno de 475 años. El espectro de diseño es de acuerdo al Eurocode 8 [CEN, 2004]. Se aplica el coeficiente para un suelo de tipo C ( $S = 1.5$ ). El Eurocódigo admite que, si el sismo de control no supera una magnitud  $M_s = 5.5$ , se recomienda el uso del espectro de respuesta elástico tipo II. Por este motivo, el espectro en el escenario de la norma para Lorca es de tipo II.
- Ecuador, Norma Ecuatoriana de la Construcción. Peligro sísmico, diseño sismo resistente [NEC-15, 2015]. Se ha considerado los espectros para períodos de retorno de 475 años y 2500 años.
- México, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal [NTC- 17, 2017]. Se ha empleado la aplicación SASID (Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño) desarrollada en el IIUNAM (Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México), que permite obtener espectros y acelerogramas de diseño para sitios de la Ciudad de México. En el caso de México se tiene el espectro del terremoto de diseño. La dirección web en la que se accede al SASID es: [www.SASID.df.gob.mx](http://www.SASID.df.gob.mx).

La Tabla 5-6 resume las demandas sísmicas estimadas a partir de los espectros de la normativa de cada caso de estudio seleccionados. Las demandas sísmicas son calculadas con la formulación propuesta en el apartado 3.4 del Capítulo 3.

**Tabla 5-6.** Demandas sísmicas en el escenario normativo

| País<br>(Terremoto)        | Caso<br>de<br>estudio | Escenario<br>sísmico | Demandas sísmicas            |                            |         |            |              |            |
|----------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------|---------|------------|--------------|------------|
|                            |                       |                      | Desplaz.<br>espectral<br>(m) | Deriva<br>entrep.<br>(rad) | PGA (g) | PFA (g)    |              |            |
|                            |                       |                      |                              |                            |         | Nivel<br>0 | Nivel<br>0.5 | Nivel<br>1 |
| California<br>(San Fdo.)   | 1                     | A                    | 0.1568                       | 0.0110                     | 0.64    | 0.64       | 1.12         | 1.60       |
|                            |                       | B <sup>0</sup>       | 0.0556                       | 0.0039                     | 0.45    | 0.45       | 0.79         | 1.13       |
|                            |                       | C <sup>1</sup>       | 0.1098                       | 0.0077                     | 0.88    | 0.88       | 1.54         | 2.20       |
| California<br>(Northridge) | 2                     | A                    | 0.1156                       | 0.0052                     | 0.72    | 0.72       | 1.27         | 1.81       |
|                            |                       | B <sup>0</sup>       | 0.0596                       | 0.0027                     | 0.45    | 0.45       | 0.79         | 1.13       |
|                            |                       | C <sup>1</sup>       | 0.1178                       | 0.0053                     | 0.88    | 0.88       | 1.54         | 2.20       |

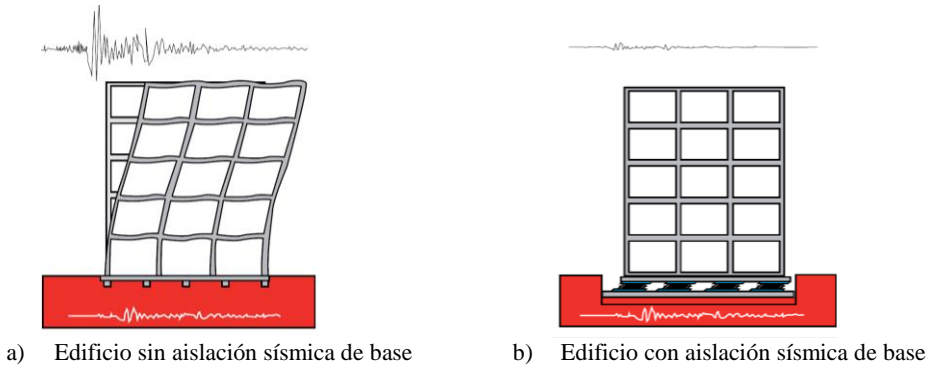
A sismo registrado; B<sup>0,\*</sup> para período de retorno de 475 y 250 años, respectivamente; C<sup>1,2,3</sup> para período de retorno de 1000, 2475 y 2500 años, respectivamente

| KkPaís<br>(Terremoto) | Caso<br>de<br>estudio | Escenario<br>sísmico | Demandas sísmicas            |                            |         |            |              |            |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------|---------|------------|--------------|------------|
|                       |                       |                      | Desplaz.<br>espectral<br>(m) | Deriva<br>entrep.<br>(rad) | PGA (g) | PFA (g)    |              |            |
|                       |                       |                      |                              |                            |         | Nivel<br>0 | Nivel<br>0.5 | Nivel<br>1 |
| Italia<br>(L'Aquila)  | 8                     | A                    | 0.0463                       | 0.0058                     | 0.61    | 0.61       | 1.07         | 1.52       |
|                       |                       | B <sup>0</sup>       | 0.0294                       | 0.0037                     | 0.35    | 0.35       | 0.61         | 0.88       |
|                       |                       | C <sup>2</sup>       | 0.0412                       | 0.0052                     | 0.47    | 0.47       | 0.82         | 1.18       |
| Chile<br>(Maule)      | 9                     | A                    | 0.0608                       | 0.0036                     | 0.63    | 0.63       | 1.10         | 1.57       |
|                       |                       | B <sup>0</sup>       | 0.0921                       | 0.0055                     | 0.53    | 0.53       | 0.93         | 1.33       |
|                       |                       | C <sup>3</sup>       | 0.1106                       | 0.0066                     | 0.58    | 0.58       | 1.02         | 1.45       |
|                       | 10                    | A                    | 0.0591                       | 0.0044                     | 0.24    | 0.24       | 0.41         | 0.59       |
|                       |                       | B <sup>0</sup>       | 0.1475                       | 0.0111                     | 0.53    | 0.53       | 0.93         | 1.33       |
| España<br>(Lorca)     | 11                    | C <sup>3</sup>       | 0.1770                       | 0.0133                     | 0.58    | 0.58       | 1.02         | 1.45       |
|                       |                       | A                    | 0.0340                       | 0.0035                     | 0.26    | 0.26       | 0.45         | 0.64       |
|                       |                       | B <sup>0</sup>       | 0.0129                       | 0.0013                     | 0.18    | 0.18       | 0.32         | 0.45       |
| Italia<br>(Emilia)    | 12                    | C <sup>3</sup>       | -                            | -                          | -       | -          | -            | -          |
|                       |                       | A                    | 0.0279                       | 0.0026                     | 0.26    | 0.26       | 0.46         | 0.66       |
|                       |                       | B <sup>0</sup>       | 0.0298                       | 0.0027                     | 0.21    | 0.21       | 0.37         | 0.53       |
| Ecuador<br>(Muisne)   | 13                    | C <sup>2</sup>       | 0.0508                       | 0.0046                     | 0.35    | 0.35       | 0.61         | 0.88       |
|                       |                       | A                    | 0.0375                       | 0.0034                     | 0.35    | 0.35       | 0.61         | 0.88       |
|                       |                       | B <sup>0</sup>       | 0.0474                       | 0.0043                     | 0.56    | 0.56       | 0.98         | 1.40       |
|                       | 14                    | C <sup>2</sup>       | 0.0853                       | 0.0078                     | 1.01    | 1.01       | 1.76         | 2.52       |
|                       |                       | A                    | 0.0786                       | 0.0047                     | 0.35    | 0.35       | 0.61         | 0.88       |
|                       |                       | B <sup>0</sup>       | 0.0947                       | 0.0057                     | 0.56    | 0.56       | 0.98         | 1.40       |
|                       | 15                    | C <sup>2</sup>       | 0.1705                       | 0.0103                     | 1.01    | 1.01       | 1.76         | 2.52       |
|                       |                       | A                    | 0.0777                       | 0.0063                     | 0.59    | 0.59       | 1.03         | 1.48       |
|                       |                       | B <sup>0</sup>       | 0.0577                       | 0.0047                     | 0.56    | 0.56       | 0.98         | 1.40       |
|                       |                       | C <sup>2</sup>       | 0.1039                       | 0.0084                     | 1.01    | 1.01       | 1.76         | 2.52       |
| 16                    | A                     | 0.0563               | 0.0034                       | 0.46                       | 0.46    | 0.80       | 1.14         |            |
|                       | B <sup>0</sup>        | 0.0964               | 0.0058                       | 0.59                       | 0.59    | 1.03       | 1.48         |            |
|                       | C <sup>2</sup>        | 0.1736               | 0.0104                       | 1.06                       | 1.06    | 1.86       | 2.65         |            |
| México<br>(Puebla)    | 17                    | A                    | 0.0183                       | 0.0010                     | 0.09    | 0.09       | 0.16         | 0.23       |
|                       |                       | B <sup>*</sup>       | 0.0731                       | 0.0041                     | 0.28    | 0.28       | 0.49         | 0.70       |
|                       |                       | C <sup>2</sup>       | -                            | -                          | -       | -          | -            | -          |

A sismo registrado; B<sup>0,\*</sup> para período de retorno de 475 y 250 años, respectivamente; C<sup>1,2,3</sup> para período de retorno de 1000, 2475 y 2500 años, respectivamente

### 5.3.2 Demandas sísmicas esperadas en caso de diseñar o rehabilitar con aislación sísmica de base

Durante eventos sísmicos recientes se ha evidenciado, en términos generales, un buen desempeño sísmico de los elementos estructurales. No obstante, dichos eventos sísmicos también han dejado en evidencia la deficiencia del desempeño sísmico de componentes y sistemas no estructurales. En esta investigación, teniendo en cuenta que entre los desafíos futuros para proteger la infraestructura crítica y estratégica se encuentra el uso inminente de sistemas de protección sísmica no convencionales, tales como aislación sísmica de base y disipación de energía. En este estudio se realiza un análisis simplificado, considerando infraestructura hospitalaria con aislación sísmica de base, para las demandas sísmicas asociadas a sismos registrados y al escenario normativo. Básicamente, los sistemas de aislación sísmica limitan o disipan la energía que el sismo trasfiere a la superestructura (componentes del edificio ubicados por sobre la interfaz de aislación), reduciendo las aceleraciones y derivas máximas de entrepiso de la estructura entre un 70 y 80%, respectivamente [Retamales y Boroschek, 2014], previniendo el daño estructural y no estructural. La Figura 5-3 muestra una comparación de la respuesta sísmica de un edificio, considerando sin aislación de base y con aislación sísmica de base.



**Figura 5-3.** Comparación de respuesta sísmica de edificio sin aislación y edificio con sísmica de base [CDT-CH, 2011]

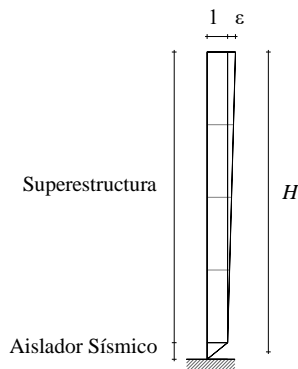
A continuación, se explica el proceso realizado para obtener las demandas sísmicas con aislación sísmica de base, tales como desplazamiento espectral  $S_d$ , deriva de entrepiso promedio  $\bar{\delta}$  y aceleración absoluta máxima de piso  $PFA$ .

**Paso 1.** Información general

1. La incorporación de aisladores sísmicos permite reducir la rigidez del sistema estructural logrando que el período de vibración de la estructura aislada ( $T_i$ ) sea mayor al período de la estructura de base fija ( $T_e$ ). En este estudio, el período de la estructura aislada corresponde a 3 s. Sin embargo, para países localizados en zonas altamente sísmicas como los Estados Unidos, Chile y Ecuador se ha considerado el período de 3.5 s. Valor adaptado de acuerdo a la práctica chilena, debido a la necesidad de alcanzar períodos más largos en países con alta sismicidad.
2. Se ha considerado un amortiguamiento del 15% y de acuerdo ASCE/SEI 7-16 [ASCE, 2016] el factor de amortiguamiento ( $B_M$ ) corresponde al valor de 1.35.

**Paso 2.** Estimación de la deriva de entrepiso promedio  $\bar{\delta}$  en infraestructura con aislación sísmica de base

Para su mejor comprensión, la Figura 5-4 ilustra gráficamente la estimación del desplazamiento de techo en relación a la base en una estructura con aislación sísmica de base.



**Figura 5-4.** Representación gráfica de estimación del desplazamiento de techo en una estructura con aislación sísmica de base

1. Se determina el desplazamiento espectral de la estructura aislada  $S_d(T_i)$ , como se indica en la Ec. (5-14).

$$S_d(T_i) = \frac{S_{d,si}(T_i)}{B_M} \quad (5-14)$$

donde  $S_{d,si}(T_i)$  es el desplazamiento espectral del aislador sísmico; y  $B_M$  es el factor de amortiguamiento considerado igual a 1.35. Se estima que del orden del 10% del desplazamiento espectral lo acomoda la estructura y el 90% lo acomoda el aislador sísmico.

2. Se determina la relación entre períodos ( $\varepsilon$ ), es decir, período de base fija ( $T_e$ ) y período de base aislada ( $T_i$ ), como se muestra en la Ec. (5-15).

$$\varepsilon = \left(\frac{T_e}{T_i}\right)^2 \quad (5-15)$$

3. Se determina el desplazamiento de techo en relación a la base. El desplazamiento de techo guarda relación con las formas modales. La forma modal depende de la razón entre el desplazamiento de la estructura aislada  $S_d(T_i)$ , y los períodos de la estructura de base fija y la estructura de base aislada. La Ec. (5-16) expresa esta relación.

$$\Delta_t = \frac{S_d(T_i) \times \varepsilon}{B_M(1 + \varepsilon)} \quad (5-16)$$

En la Ec. (5-16) el numerador representa el desplazamiento de la estructura y el denominador representa el desplazamiento de techo.

4. Para determinar la deriva de entrepiso promedio se divide el valor encontrado en la Ec. (5-16) por la altura del edificio, como se muestra en la Ec. (5-17).

$$\bar{\delta} = \frac{\Delta_t}{H} \quad (5-17)$$

**Paso 3.** Estimación de la aceleración absoluta máxima de piso con aislación sísmica de base *PFA*

1. Para determinar la aceleración máxima que se desarrolla en el interior de un edificio con aislación sísmica, es como se muestra en la Ec. (5-18).

$$PFA = \frac{PS_a(T_i)}{B_M} \quad (5-18)$$

donde  $PS_a(T_i)$  corresponde al valor promedio de las pseudo-aceleraciones espectrales en ambas direcciones horizontales asociadas al período de la estructura con aislación sísmica de base; y  $B_M$  representa el factor de reducción por amortiguamiento de 1.35.

La Tabla 5-7 resume las demandas sísmicas en el escenario de sismo registrado y en el escenario normativo, considerando la infraestructura con aislación sísmica de base.

**Tabla 5-7.** Demandas sísmicas reducidas de los casos de estudio

| País<br>(Terremoto)          | Caso<br>de<br>estudio | Escenario<br>sísmico | Demandas sísmicas            |                            |            |              |            |  |
|------------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------|------------|--------------|------------|--|
|                              |                       |                      | Desplaz.<br>espectral<br>(m) | Deriva<br>entrep.<br>(rad) | PFA (g)    |              |            |  |
|                              |                       |                      |                              |                            | Nivel<br>0 | Nivel<br>0.5 | Nivel<br>1 |  |
| California<br>(San Fdo.)     | 1                     | A                    | 0.017                        | 0.0009                     | 0.19       | 0.19         | 0.19       |  |
|                              |                       | B <sup>0</sup>       | 0.006                        | 0.0003                     | 0.08       | 0.08         | 0.08       |  |
|                              |                       | C <sup>1</sup>       | 0.012                        | 0.0006                     | 0.17       | 0.17         | 0.17       |  |
| California<br>(Northridge)   | 2                     | A                    | 0.012                        | 0.0004                     | 0.14       | 0.14         | 0.14       |  |
|                              |                       | B <sup>0</sup>       | 0.007                        | 0.0003                     | 0.08       | 0.08         | 0.08       |  |
|                              |                       | C <sup>1</sup>       | 0.014                        | 0.0005                     | 0.17       | 0.17         | 0.17       |  |
| Turquía<br>(Kocaeli)         | 3                     | A                    | 0.004                        | 0.0002                     | 0.08       | 0.08         | 0.08       |  |
|                              |                       | B <sup>0</sup>       | -                            | -                          | -          | -            | -          |  |
|                              |                       | C <sup>1</sup>       | -                            | -                          | -          | -            | -          |  |
| Taiwán (Chi-<br>Chi)         | 4                     | A                    | 0.020                        | 0.0006                     | 0.13       | 0.13         | 0.13       |  |
|                              |                       | B <sup>0</sup>       | -                            | -                          | -          | -            | -          |  |
|                              |                       | C <sup>1</sup>       | -                            | -                          | -          | -            | -          |  |
| El Salvador<br>(El Salvador) | 5                     | A                    | 0.007                        | 0.0004                     | 0.08       | 0.08         | 0.08       |  |
|                              |                       | B <sup>0</sup>       | -                            | -                          | -          | -            | -          |  |
|                              |                       | C <sup>1</sup>       | -                            | -                          | -          | -            | -          |  |
| EEUU<br>(Hawái)              | 6                     | A                    | 0.000                        | 0.0001                     | 0.01       | 0.01         | 0.01       |  |
|                              |                       | B <sup>0</sup>       | -                            | -                          | -          | -            | -          |  |
|                              |                       | C <sup>1</sup>       | -                            | -                          | -          | -            | -          |  |
| Perú (Pisco)                 | 7                     | A                    | 0.006                        | 0.0005                     | 0.24       | 0.24         | 0.24       |  |
|                              |                       | B <sup>0</sup>       | -                            | -                          | -          | -            | -          |  |
|                              |                       | C <sup>1</sup>       | -                            | -                          | -          | -            | -          |  |
| Italia<br>(L'Aquila)         | 8                     | A                    | 0.001                        | 0.0001                     | 0.03       | 0.03         | 0.03       |  |
|                              |                       | B <sup>0</sup>       | 0.003                        | 0.0003                     | 0.09       | 0.09         | 0.09       |  |
|                              |                       | C <sup>2</sup>       | 0.005                        | 0.0005                     | 0.16       | 0.16         | 0.16       |  |
| Chile<br>(Maule)             | 9                     | A                    | 0.003                        | 0.0001                     | 0.05       | 0.05         | 0.05       |  |
|                              |                       | B <sup>0</sup>       | 0.006                        | 0.0003                     | 0.10       | 0.10         | 0.10       |  |
|                              |                       | C <sup>3</sup>       | 0.007                        | 0.0003                     | 0.12       | 0.12         | 0.12       |  |
| España<br>(Lorca)            | 11                    | A                    | 0.007                        | 0.0005                     | 0.11       | 0.11         | 0.11       |  |
|                              |                       | B <sup>0</sup>       | 0.003                        | 0.0002                     | 0.04       | 0.04         | 0.04       |  |
|                              |                       | C <sup>3</sup>       | 0.011                        | 0.0006                     | 0.12       | 0.12         | 0.12       |  |
| Italia<br>(Emilia)           | 12                    | A                    | 0.000                        | 0.0001                     | 0.01       | 0.01         | 0.01       |  |
|                              |                       | B <sup>0</sup>       | 0.000                        | 0.0000                     | 0.01       | 0.01         | 0.01       |  |
|                              |                       | C <sup>3</sup>       | -                            | -                          | -          | -            | -          |  |

A sismo registrado; B<sup>0,\*</sup> para período de retorno de 475 y 250 años, respectivamente; C<sup>1,2,3</sup> para período de retorno de 1000, 2475 y 2500 años, respectivamente



| País<br>(Terremoto) | Caso<br>de<br>estudio | Escenario<br>sísmico | Demandas sísmicas            |                 |            |              |            |
|---------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|-----------------|------------|--------------|------------|
|                     |                       |                      | Desplaz.<br>espectral<br>(m) | Deriva<br>(rad) | PFA (g)    |              |            |
|                     |                       |                      |                              |                 | Nivel<br>0 | Nivel<br>0.5 | Nivel<br>1 |
| Ecuador<br>(Muisne) | 13                    | A                    | 0.005                        | 0.0003          | 0.10       | 0.10         | 0.10       |
|                     |                       | B <sup>0</sup>       | 0.008                        | 0.0005          | 0.16       | 0.16         | 0.16       |
|                     |                       | C <sup>2</sup>       | 0.014                        | 0.0009          | 0.29       | 0.29         | 0.29       |
|                     | 14                    | A                    | 0.009                        | 0.0004          | 0.10       | 0.10         | 0.10       |
|                     |                       | B <sup>0</sup>       | 0.015                        | 0.0007          | 0.16       | 0.16         | 0.16       |
|                     |                       | C <sup>2</sup>       | 0.027                        | 0.0012          | 0.29       | 0.29         | 0.29       |
|                     | 15                    | A                    | 0.009                        | 0.0006          | 0.16       | 0.16         | 0.16       |
|                     |                       | B <sup>0</sup>       | 0.009                        | 0.0006          | 0.16       | 0.16         | 0.16       |
|                     |                       | C <sup>2</sup>       | 0.016                        | 0.0010          | 0.29       | 0.29         | 0.29       |
|                     | 16                    | A                    | 0.009                        | 0.0004          | 0.10       | 0.10         | 0.10       |
|                     |                       | B <sup>0</sup>       | 0.014                        | 0.0007          | 0.16       | 0.16         | 0.16       |
|                     |                       | C <sup>2</sup>       | 0.025                        | 0.0012          | 0.28       | 0.28         | 0.28       |
| México<br>(Puebla)  | 17                    | A                    | 0.005                        | 0.0002          | 0.05       | 0.05         | 0.05       |
|                     |                       | B <sup>*</sup>       | 0.015                        | 0.0007          | 0.15       | 0.15         | 0.15       |
|                     |                       | C <sup>2</sup>       | -                            | -               | -          | -            | -          |

A sismo registrado; B<sup>0,\*</sup> para período de retorno de 475 y 250 años, respectivamente; C<sup>1,2,3</sup> para período de retorno de 1000, 2475 y 2500 años, respectivamente

A continuación, se presenta los resultados de aplicar la herramienta automatizada en infraestructuras hospitalarias analizadas en este estudio.

### 5.3.3 Aplicación de la herramienta automatizada en infraestructuras hospitalarias bajo escenarios sísmicos

Después de validar la herramienta automatizada, se ha empleado para estimar el desempeño sísmico de los elementos estructurales y no estructurales en el escenario de sismo registrado y sismo de la norma en su condición actual y rehabilitada (elementos estructurales y no estructurales). El objetivo de aplicar la herramienta automatizada en infraestructura hospitalaria rehabilitada es evaluar el efecto de la rehabilitación en la continuidad de función en la infraestructura, y a la vez conocer si se alcanza armonía entre el desempeño sísmico estructural y no estructural. Además, a fin de conocer la incidencia o importancia del desempeño sísmico no estructural en la pérdida de función en infraestructuras hospitalarias, la herramienta ha sido empleada en el caso de diseñar o rehabilitar con sistemas no convencionales tales como aislación sísmica de base. Un análisis complementario desarrollado, permite determinar las demandas sísmicas bajo las cuales la infraestructura se mantiene completamente funcional durante e inmediatamente después del evento sísmico. Los valores empleados como demandas sísmicas son de acuerdo a los subapartados 5.1.3, 5.3.1 y subapartado 5.3.2. A continuación, se presenta los resultados del uso de la herramienta automatizada tanto en el escenario de sismos registrados, escenario normativo, así como en el caso de diseñar o rehabilitar la estructura considerando sistemas con aislación sísmica de base.

#### 5.3.3.1 Uso de la herramienta automatizada en el escenario de sismos registrados en infraestructuras hospitalarias con base fija

La Tabla 5-8 resume los resultados de aplicar la herramienta en infraestructura existente sometida a sismos registrados. La tabla muestra que la infraestructura hospitalaria en su condición actual no

logra armonía entre el desempeño sísmico estructural y no estructural. Contrariamente, en su condición rehabilitada tanto en elementos estructurales y no estructurales se logra armonía, con un nivel de daño nulo, leve y moderado. No obstante, en los casos de estudio localizados en países considerados altamente sísmicos como los Estados Unidos, Chile y Ecuador no se logra armonía entre el desempeño sísmico estructural y no estructural.

**Tabla 5-8.** Resultado del uso de la herramienta automatizada en el escenario de sismos registrados en infraestructuras hospitalarias existentes

| País<br>(Terremoto)       | Caso<br>de<br>estudio | $M_w$ | Desempeño sísmico          |        |         |                               |        |
|---------------------------|-----------------------|-------|----------------------------|--------|---------|-------------------------------|--------|
|                           |                       |       | Elementos<br>estructurales |        | Armonía | Elementos no<br>estructurales |        |
|                           |                       |       | Estado<br>actual           | Rehab. |         | Estado<br>actual              | Rehab. |
| EEUU (San Fernando)       | 1                     | 6.6   | E                          | -      | X       | C                             | -      |
|                           |                       |       | -                          | M      | ✓       | -                             | M      |
| EEUU (Northridge)         | 2                     | 6.7   | L                          | -      | X       | C                             | -      |
|                           |                       |       | -                          | L      | X       | -                             | M      |
| Turquía (Kocaeli)         | 3                     | 7.6   | N                          | -      | X       | M                             | -      |
|                           |                       |       | -                          | N      | ✓       | -                             | N      |
| Taiwán (Chi-Chi)          | 4                     | 7.7   | N                          | -      | X       | E                             | -      |
|                           |                       |       | -                          | N      | ✓       | -                             | N      |
| El Salvador (El Salvador) | 5                     | 7.7   | M                          | -      | X       | E                             | -      |
|                           |                       |       | -                          | L      | ✓       | -                             | L      |
| EEUU (Hawái)              | 6                     | 6.7   | N                          | -      | X       | M                             | -      |
|                           |                       |       | -                          | N      | X       | -                             | L      |
| Perú (Pisco)              | 7                     | 8.0   | L                          | -      | X       | E                             | -      |
|                           |                       |       | -                          | N      | X       | -                             | L      |
| Italia (L'Aquila)         | 8                     | 6.3   | M                          | -      | X       | E                             | -      |
|                           |                       |       | -                          | L      | ✓       | -                             | L      |
| Chile (Maule)             | 9                     | 8.8   | L                          | -      | X       | C                             | -      |
|                           |                       |       | -                          | L      | X       | -                             | M      |
|                           |                       |       | M                          | -      | X       | E                             | -      |
| España (Lorca)            | 10                    | 5.1   | -                          | L      | ✓       | -                             | L      |
|                           |                       |       | N                          | -      | X       | L                             | -      |
| Italia (Emilia)           | 11                    | 6.0   | -                          | N      | ✓       | -                             | N      |
|                           |                       |       | N                          | -      | X       | M                             | -      |
| Ecuador (Muisne)          | 12                    | 7.8   | -                          | N      | ✓       | -                             | N      |
|                           |                       |       | L                          | -      | X       | C                             | -      |
|                           |                       |       | -                          | N      | X       | -                             | L      |
|                           |                       |       | M                          | -      | X       | C                             | -      |
|                           |                       |       | -                          | L      | ✓       | -                             | L      |
| México (Puebla)           | 13                    | 7.1   | M                          | -      | X       | C                             | -      |
|                           |                       |       | -                          | L      | X       | -                             | M      |
|                           | 14                    |       | N                          | -      | X       | M                             | -      |
|                           |                       |       | -                          | N      | X       | -                             | L      |
|                           | 15                    |       | N                          | -      | X       | L                             | -      |
|                           |                       |       | -                          | N      | ✓       | -                             | N      |

N: Nulo, L: Leve, M: Moderado, E: Extenso, C: Completo

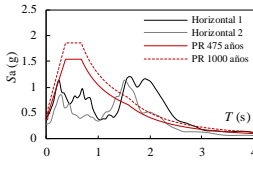
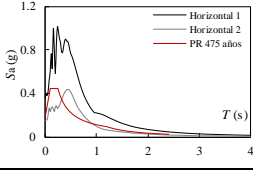
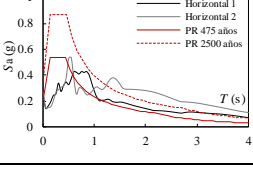
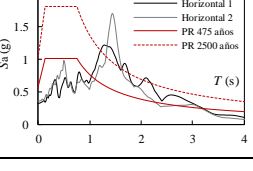
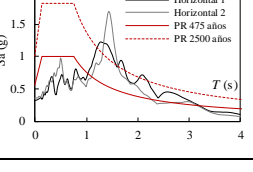
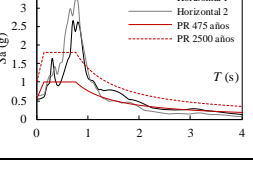
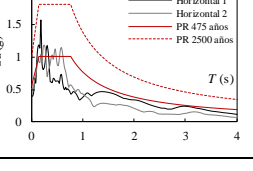
### 5.3.3.2 Uso de la herramienta automatizada en el escenario normativo en infraestructuras hospitalarias con base fija

A fin de identificar las infraestructuras hospitalarias que presentando bajos niveles de daños en los sismos que las han afectado pudieran presentar niveles de daños superiores. La herramienta se ha usado considerando las demandas sísmicas en el escenario normativo. Este análisis se efectúa para doce infraestructuras hospitalarias en su condición actual y rehabilitada tanto en elementos estructurales y componentes no estructurales. La Tabla 5-9 muestra una comparación entre los espectros de respuesta de registros reales y el espectro de diseño de la norma aplicable. Asimismo, la tabla muestra el desempeño sísmico estimado mediante el uso de la herramienta tanto para el sismo registrado como para los sismos asociados al escenario de la norma. En la tabla se puede observar que el desempeño sísmico de los elementos estructurales, en su condición rehabilitada, alcanzan un nivel aceptable de daño (menos daño). Por el contrario, los hospitales localizados en países considerados altamente sísmicos con los Estados unidos, Chile y Ecuador, alcanzan un daño estructural moderado. Asimismo, la tabla muestra que los componentes y sistemas no estructurales, en su condición rehabilitada, exhiben niveles de daño hasta moderado. En consecuencia, en algunos casos de estudio no se logra la armonía entre el desempeño sísmico estructural y no estructural.

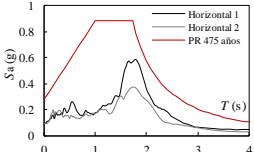
**Tabla 5-9.** Resultado del uso de la herramienta automatizada en el escenario sísmico normativo

| País<br>(Terremoto)        | Caso de estudio | Escenario sísmico | Desempeño sísmico                   |             |                         |        |         |   |        |
|----------------------------|-----------------|-------------------|-------------------------------------|-------------|-------------------------|--------|---------|---|--------|
|                            |                 |                   | Espectro de respuesta y de la norma | Descripción | Elementos estructurales |        | Armonía | Componentes y sistemas no estructurales |        |
|                            |                 |                   |                                     |             | Estado actual           | Rehab. |         | Estado actual                           | Rehab. |
| California<br>(San Fdo.)   | 1               |                   | Sismo registrado                    | E           | -                       | X      | C       | -                                       |        |
|                            |                 |                   | Sismo de diseño                     | M           | -                       | X      | E       | -                                       |        |
|                            |                 |                   | Sismo máximo probable               | M           | -                       | X      | C       | -                                       |        |
|                            |                 |                   |                                     | -           | M                       | ✓      | -       | M                                       |        |
| California<br>(Northridge) | 2               |                   | Sismo registrado                    | L           | -                       | X      | C       | -                                       |        |
|                            |                 |                   | Sismo de diseño                     | L           | -                       | X      | M       | -                                       |        |
|                            |                 |                   | Sismo máximo probable               | L           | -                       | X      | C       | -                                       |        |
|                            |                 |                   |                                     | -           | L                       | X      | -       | M                                       |        |
| Italia<br>(L'Aquila)       | 8               |                   | Sismo registrado                    | M           | -                       | X      | E       | -                                       |        |
|                            |                 |                   | Sismo de diseño                     | N           | -                       | X      | M       | -                                       |        |
|                            |                 |                   | Sismo máximo probable               | N           | -                       | X      | M       | -                                       |        |
|                            |                 |                   |                                     | -           | N                       | X      | -       | L                                       |        |
| Chile<br>(Maule)           | 9               |                   | Sismo registrado                    | L           | -                       | X      | C       | -                                       |        |
|                            |                 |                   | Sismo de diseño                     | M           | -                       | X      | E       | -                                       |        |
|                            |                 |                   | Sismo máximo probable               | M           | -                       | X      | E       | -                                       |        |
|                            |                 |                   |                                     | -           | M                       | ✓      | -       | M                                       |        |

N: Nulo, L: Leve, M: Moderado, E: Extenso, C: Completo

| País<br>(Terremoto) | Caso de estudio | Escenario sísmico   | Desempeño sísmico                   |             |                         |        |         |   |        |
|---------------------|-----------------|---|-------------------------------------|-------------|-------------------------|--------|---------|---|--------|
|                     |                 |   | Espectro de respuesta y de la norma | Descripción | Elementos estructurales |        | Armonía | Componentes y sistemas no estructurales |        |
|                     |                 |   |                                     |             | Estado actual           | Rehab. |         | Estado actual                           | Rehab. |
| Chile<br>(Maule)    | 10              |    | Sismo registrado                    | M           | -                       | X      | E       | -                                       |        |
|                     |                 |   | Sismo de diseño                     | M           | -                       | X      | E       | -                                       |        |
|                     |                 |   | Sismo máximo probable               | M           | -                       | X      | E       | -                                       |        |
|                     |                 |   |                                     | -           | M                       | ✓      | -       | M                                       |        |
| España<br>(Lorca)   | 11              |    | Sismo registrado                    | N           | -                       | X      | L       | -                                       |        |
|                     |                 |   | Sismo de diseño                     | N           | -                       | X      | L       | -                                       |        |
|                     |                 |   |                                     | -           | N                       | ✓      | -       | N                                       |        |
|                     |                 |   |                                     | -           | N                       | ✓      | -       | N                                       |        |
| Italia<br>(Emilia)  | 12              |    | Sismo registrado                    | N           | -                       | X      | M       | -                                       |        |
|                     |                 |   | PR 475 años                         | N           | -                       | X      | M       | -                                       |        |
|                     |                 |   | PR 2500 años                        | N           | -                       | X      | M       | -                                       |        |
|                     |                 |   |                                     | -           | N                       | ✓      | -       | N                                       |        |
| Ecuador<br>(Muisne) | 13              |   | Sismo registrado                    | L           | -                       | X      | C       | -                                       |        |
|                     |                 |   | PR 475 años                         | L           | -                       | X      | C       | -                                       |        |
|                     |                 |   | PR 2500 años                        | M           | -                       | X      | C       | -                                       |        |
|                     |                 |   |                                     | -           | L                       | X      | -       | M                                       |        |
| Ecuador<br>(Muisne) | 14              |  | Sismo registrado                    | M           | -                       | X      | C       | -                                       |        |
|                     |                 |   | PR 475 años                         | M           | -                       | X      | C       | -                                       |        |
|                     |                 |   | PR 2500 años                        | E           | -                       | X      | C       | -                                       |        |
|                     |                 |   |                                     | -           | M                       | X      | -       | M                                       |        |
| Ecuador<br>(Muisne) | 15              |  | Sismo registrado                    | M           | -                       | X      | C       | -                                       |        |
|                     |                 |   | PR 475 años                         | M           | -                       | X      | C       | -                                       |        |
|                     |                 |   | PR 2500 años                        | M           | -                       | X      | C       | -                                       |        |
|                     |                 |   |                                     | -           | M                       | X      | -       | M                                       |        |
| Ecuador<br>(Muisne) | 16              |  | Sismo registrado                    | N           | -                       | X      | M       | -                                       |        |
|                     |                 |   | PR 475 años                         | M           | -                       | X      | E       | -                                       |        |
|                     |                 |   | PR 2500 años                        | E           | -                       | X      | C       | -                                       |        |
|                     |                 |   |                                     | -           | M                       | X      | -       | M                                       |        |

N: Nulo, L: Leve, M: Moderado, E: Extenso, C: Completo

| País<br>(Terremoto) | Caso de estudio | Escenario sísmico   | Desempeño sísmico                   |             |                         |        |         |   |        |
|---------------------|-----------------|---|-------------------------------------|-------------|-------------------------|--------|---------|---|--------|
|                     |                 |   | Espectro de respuesta y de la norma | Descripción | Elementos estructurales |        | Armonía | Componentes y sistemas no estructurales |        |
|                     |                 |   |                                     |             | Estado actual           | Rehab. |         | Estado actual                           | Rehab. |
| México<br>(Puebla)  | 17              |  | Sismo registrado                    | N           | -                       | X      | L       | -                                       |        |
|                     |                 |   |                                     | -           | N                       | ✓      | -       | N                                       |        |
|                     |                 |   | PR 250 años                         | M           | -                       | ✓      | M       | -                                       |        |
|                     |                 |   |                                     | -           | L                       | ✓      | -       | L                                       |        |

N: Nulo, L: Leve, M: Moderado, E: Extenso, C: Completo

5.3.3.3 *Uso de la herramienta automatizada en el caso de rehabilitar o diseñar con aislación sísmica de base*

A fin de evaluar el impacto del uso de sistemas de aislación sísmica sobre la probabilidad de ocurrencia de daño estructural y no estructural en infraestructuras hospitalarias. En este trabajo, se ha efectuado un análisis simplificado, considerando la reducción de las demandas sísmicas en el escenario de sismo registrado y escenario de la norma. En este contexto, se ha considerado a los componentes y sistemas no estructurales en su condición actual y rehabilitada.

La Tabla 5-10 muestra los resultados que se obtienen en el caso de diseñar o rehabilitar las infraestructuras hospitalarias considerando sistemas de aislación sísmica de base. La tabla indica que los componentes no estructurales, en su condición actual, alcanzan un nivel de daño leve. No obstante, se alcanza la continuidad de función durante e inmediatamente después del evento sísmico. Asimismo, la tabla muestra que los casos de estudio localizados en Ecuador, en el escenario de sismo máximo probable, el desempeño sísmico de los componentes no estructurales, en su condición actual, alcanzan un nivel de daño moderado.

**Tabla 5-10.** Resultado del uso de la herramienta automatizada en el caso de rehabilitar o diseñar con aislación sísmica de base

| País<br>(Terremoto) | Caso de estudio | Escenario sísmico | Desempeño sísmico            |         |                            |        |
|---------------------|-----------------|-------------------|------------------------------|---------|----------------------------|--------|
|                     |                 |                   | Elementos estruct.<br>Rehab. | Armonía | Elementos no estructurales |        |
|                     |                 |                   |                              |         | Estado actual              | Rehab. |
| EEUU (San Fernando) | 1               | Sismo registrado  | N                            | X       | L                          | -      |
|                     |                 |                   | N                            | ✓       | -                          | N      |
|                     |                 | Sismo de diseño   | N                            | X       | L                          | -      |
|                     |                 |                   | N                            | ✓       | -                          | N      |
|                     |                 | Sismo máx. pr.    | N                            | X       | L                          | -      |
|                     |                 |                   | N                            | ✓       | -                          | N      |
| EEUU (Northridge)   | 2               | Sismo registrado  | N                            | X       | L                          | -      |
|                     |                 |                   | N                            | ✓       | -                          | N      |
|                     |                 | Sismo de diseño   | N                            | X       | L                          | -      |
|                     |                 |                   | N                            | ✓       | -                          | N      |
|                     |                 | Sismo máx. pr.    | N                            | X       | L                          | -      |
|                     |                 |                   | N                            | ✓       | -                          | N      |
| Turquía (Kocaeli)   | 3               | Sismo registrado  | N                            | X       | L                          | -      |
|                     |                 |                   | N                            | ✓       | -                          | N      |
|                     |                 |                   | N                            | X       | L                          | -      |

| País<br>(Terremoto)          | Caso<br>de<br>estudio | Escenario<br>sísmico | Desempeño sísmico     |         |                               |        |
|------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|---------|-------------------------------|--------|
|                              |                       |                      | Elementos<br>estruct. | Armonía | Elementos no<br>estructurales |        |
|                              |                       |                      | Rehab.                |         | Estado<br>actual              | Rehab. |
| Taiwán (Chi-Chi)             | 4                     | Sismo registrado     | N                     | ✓       | -                             | N      |
| El Salvador<br>(El Salvador) | 5                     | Sismo registrado     | N                     | X       | L                             | -      |
|                              |                       |                      | N                     | ✓       | -                             | N      |
| EEUU<br>(Hawái)              | 6                     | Sismo registrado     | N                     | X       | N                             | -      |
|                              |                       |                      | N                     | ✓       | -                             | N      |
| Perú (Pisco)                 | 7                     | Sismo registrado     | N                     | X       | L                             | -      |
|                              |                       |                      | N                     | ✓       | -                             | N      |
| Italia<br>(L'Aquila)         | 8                     | Sismo registrado     | N                     | X       | N                             | -      |
|                              |                       |                      | N                     | ✓       | -                             | N      |
|                              |                       | Sismo de diseño      | N                     | X       | L                             | -      |
|                              |                       |                      | N                     | ✓       | -                             | N      |
|                              |                       | Sismo máx. pr.       | N                     | X       | L                             | -      |
|                              |                       |                      | N                     | ✓       | -                             | N      |
| Chile (Maule)                | 9                     | Sismo registrado     | N                     | X       | N                             | -      |
|                              |                       |                      | N                     | ✓       | -                             | N      |
|                              |                       | Sismo de diseño      | N                     | X       | L                             | -      |
|                              |                       |                      | N                     | ✓       | -                             | N      |
|                              |                       | Sismo máx. pr.       | N                     | X       | L                             | -      |
|                              |                       |                      | N                     | ✓       | -                             | N      |
|                              | 10                    | Sismo registrado     | N                     | X       | L                             | -      |
|                              |                       |                      | N                     | ✓       | -                             | N      |
|                              |                       | Sismo de diseño      | N                     | X       | L                             | -      |
|                              |                       |                      | N                     | ✓       | -                             | N      |
|                              |                       | Sismo máx. pr.       | N                     | X       | L                             | -      |
|                              |                       |                      | N                     | ✓       | -                             | N      |
| España<br>(Lorca)            | 11                    | Sismo registrado     | N                     | X       | N                             | -      |
|                              |                       |                      | N                     | ✓       | -                             | N      |
|                              |                       | Sismo de diseño      | N                     | X       | N                             | -      |
|                              |                       |                      | N                     | ✓       | -                             | N      |
| Italia (Emilia)              | 12                    | Sismo registrado     | N                     | X       | L                             | -      |
|                              |                       |                      | N                     | ✓       | -                             | N      |
|                              |                       | Sismo de diseño      | N                     | X       | N                             | -      |
|                              |                       |                      | N                     | ✓       | -                             | N      |
|                              |                       | Sismo máx. pr.       | N                     | X       | L                             | -      |
|                              |                       |                      | N                     | ✓       | -                             | N      |
| Ecuador<br>(Muisne)          | 13                    | Sismo registrado     | N                     | X       | L                             | -      |
|                              |                       |                      | N                     | ✓       | -                             | N      |
|                              |                       | Sismo de diseño      | N                     | X       | L                             | -      |
|                              |                       |                      | N                     | ✓       | -                             | N      |
|                              |                       | Sismo máx. pr.       | N                     | X       | M                             | -      |
|                              |                       |                      | N                     | ✓       | -                             | N      |
| 14                           | Sismo registrado      | N                    | X                     | L       | -                             |        |
|                              |                       | N                    | ✓                     | -       | N                             |        |
|                              | Sismo de diseño       | N                    | X                     | L       | -                             |        |
|                              |                       | N                    | ✓                     | -       | N                             |        |
|                              | Sismo máx. pr.        | N                    | X                     | M       | -                             |        |
|                              |                       | N                    | ✓                     | -       | N                             |        |
| 15                           | Sismo registrado      | N                    | X                     | L       | -                             |        |
|                              |                       | N                    | ✓                     | -       | N                             |        |
|                              | Sismo de diseño       | N                    | X                     | L       | -                             |        |
|                              |                       | N                    | ✓                     | -       | N                             |        |

| País<br>(Terremoto) | Caso<br>de<br>estudio | Escenario<br>sísmico | Desempeño sísmico     |         |                               |        |   |
|---------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|---------|-------------------------------|--------|---|
|                     |                       |                      | Elementos<br>estruct. | Armonía | Elementos no<br>estructurales |        |   |
|                     |                       |                      | Rehab.                |         | Estado<br>actual              | Rehab. |   |
|                     | 16                    | Sismo máx. pro.      | N                     | X       | M                             | -      |   |
|                     |                       |                      | N                     | ✓       | -                             | N      |   |
|                     |                       | Sismo registrado     | N                     | X       | L                             | -      |   |
|                     |                       |                      | N                     | ✓       | -                             | N      |   |
|                     |                       | Sismo de diseño      | N                     | X       | L                             | -      |   |
|                     |                       |                      | N                     | ✓       | -                             | N      |   |
|                     | Sismo máx. pro.       | N                    | X                     | M       | -                             |        |   |
|                     |                       | N                    | ✓                     | -       | N                             |        |   |
|                     | México<br>(Puebla)    | 17                   | Sismo registrado      | N       | X                             | N      | - |
|                     |                       |                      |                       | N       | ✓                             | -      | N |
|                     |                       |                      | Sismo de diseño       | N       | X                             | L      | - |
|                     |                       |                      |                       | N       | ✓                             | -      | N |

N: Nulo, L: Leve, M: Moderado, E: Extenso, C: Completo

A continuación, en el apartado 5.4, se analiza y discute los resultados de la metodología para la evaluación rápida de la susceptibilidad de pérdida de función, a partir de la estimación del desempeño sísmico estructural y no estructural, mediante el uso de una herramienta automatizada.

## 5.4 Análisis y discusión de resultados

Este apartado presenta el análisis y discusión de resultados de la herramienta automatizada calibrada con el daño observado y posteriormente validada en los casos de estudio durante eventos sísmicos con magnitudes de momento  $M_w$  entre 5.1 y 8.8. El subapartado 5.4.1 analiza los resultados de la calibración y validación de la herramienta automatizada. El subapartado 5.4.2 analiza el poder predictivo de la herramienta automatizada en la pérdida de función en infraestructuras hospitalarias. Se considera infraestructuras hospitalarias en su condición actual y rehabilitadas en elementos estructurales y no estructurales. Además, se presenta el análisis en el caso de diseñar o rehabilitar con aislación sísmica de base, considerando los componentes no estructurales en su condición actual y rehabilitados. Adicionalmente, se muestra la importancia de la herramienta automatizada mediante gráficos, para inferir si se logra o no la armonía entre el desempeño sísmico de elementos estructurales y no estructurales, en infraestructuras hospitalarias rehabilitadas con diseño convencional y no convencional. El subapartado 5.4.3 presenta el análisis del nivel de demanda sísmica que genera pérdida de función en una infraestructura hospitalaria, en su condición actual y rehabilitada en elementos estructurales y no estructurales, considerando diseño convencional y no convencional.

### 5.4.1 Análisis de la calibración y validación de la herramienta automatizada

Este subapartado presenta un análisis conciso de la calibración de pesos efectuada para cada categoría de componentes y sistemas no estructurales mediante la metodología propuesta en el subapartado 5.2. Los resultados del análisis se presentan mediante gráficos para las cuatro categorías analizadas, que permiten relacionar los pesos encontrados (pesos finales  $P_{ijk_e}$  o  $P_e$ ) representado como el valor de la media ( $\bar{x}$ ) de los valores de calibración de los diecisiete casos de estudio analizados. Asimismo, se presentan los rangos de confianza al 95% asociados a los pesos encontrados. En las figuras se puede observar la excelente correlación entre los valores de la media

( $\bar{x}$ ) dentro del intervalo de confianza al 95% encontrados mediante la metodología de calibración propuesta. Los errores relativos permiten determinar que el proceso de calibración propuesto en este estudio es consistente al validar los casos de estudio. No obstante, la categoría de equipamiento médico debe calibrarse con más casos de estudio y considerar fragilidades sísmicas que consideren la pérdida operativa del equipo. El Anejo D describe las características del subtipo de componente (fragilidades sísmicas) de cada categoría de elementos arquitectónicos, instalaciones, equipamiento médico y contenidos, en los gráficos únicamente se enumeran por razones de espacio.

La Figura 5-5 resume los pesos de cada subcategoría en la influencia de pérdida de operación, en la categoría de elementos arquitectónicos. Se tiene el peso total de 32 y 68% para la subcategoría exterior e interior, respectivamente. Los porcentajes de los errores relativos para la subcategoría exterior es de un 1.7 a 10%, mientras que para la subcategoría interior es de un 3 a 7.3%.

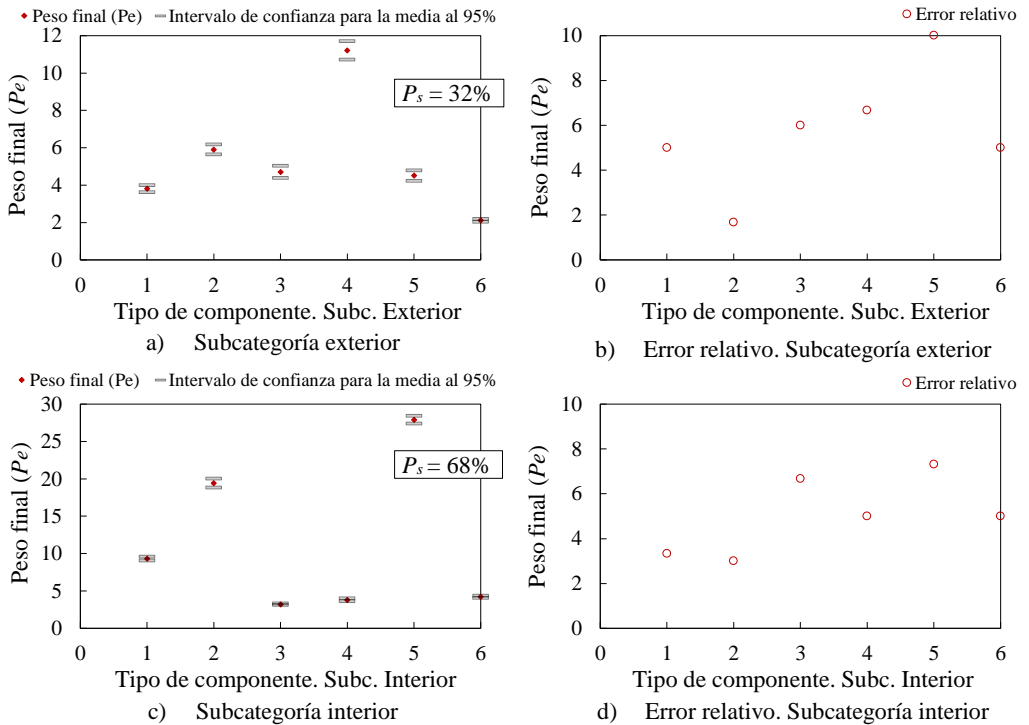


Figura 5-5. Análisis de calibración de la categoría elementos arquitectónicos

La Figura 5-6 resume los pesos de cada subcategoría en la influencia de pérdida de operación en la categoría de instalaciones. Se tiene el peso total de 43 y 57% para las subcategorías de equipos y sistemas distribuidos de sistemas críticos, respectivamente. Los porcentajes de los errores relativos para la subcategoría de equipos de sistemas críticos es de un 2 a un 13.3%, mientras que para la subcategoría de sistemas distribuidos críticos es de un 1.1 a un 10%.



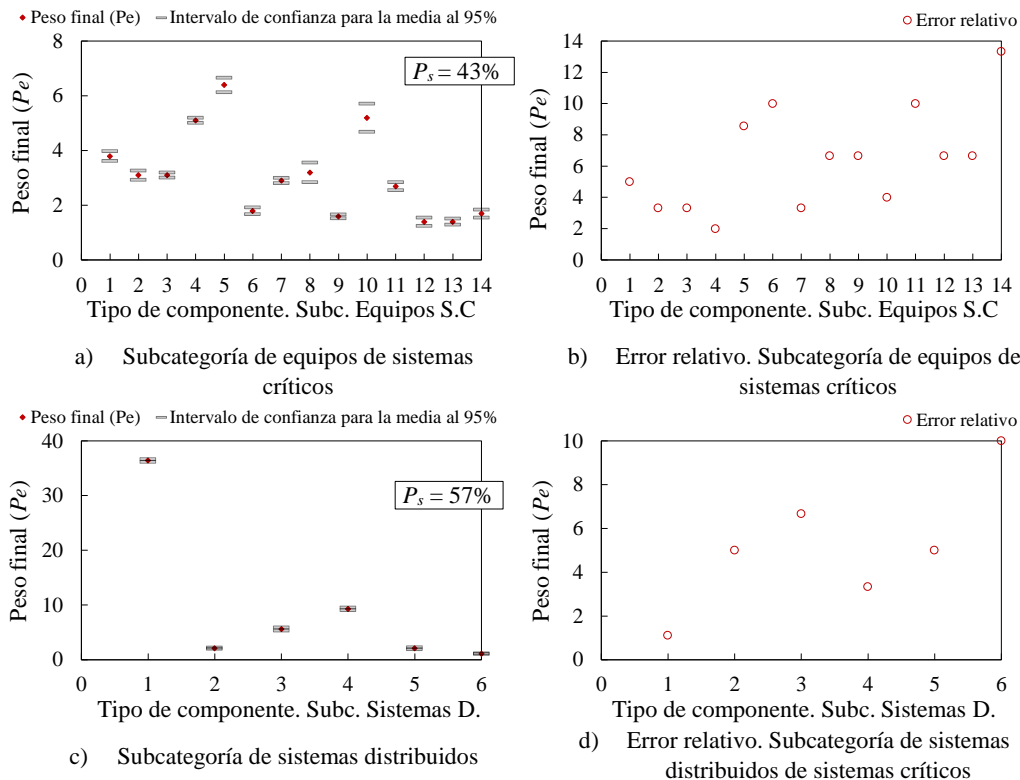
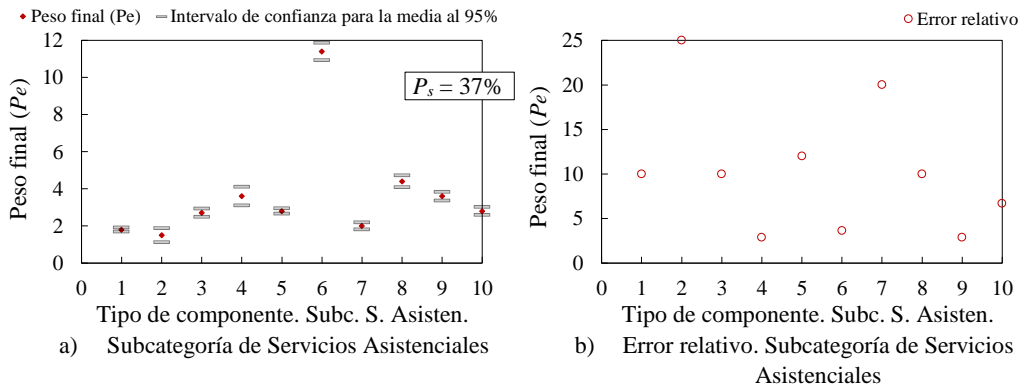


Figura 5-6. Análisis de calibración de la categoría de instalaciones

La Figura 5-7 resume los pesos de cada subcategoría en la influencia de pérdida de operación en la categoría de equipamiento médico. Se tiene el peso total de 37, 7, 6 y 5% para Servicios Médicos, Servicios de Diagnóstico y Tratamiento, Servicio de Análisis y Medicación, y Servicios Generales y de Apoyo, respectivamente. En este contexto, sumando dichos pesos, el valor correspondiente es de 54% para la subcategoría de Servicios Médicos, mientras que el 46% para la subcategoría de gases médicos. Los porcentajes de los errores relativos para las subcategorías correspondientes a la categoría de Servicios Médicos es de un 2.9 a un 25%, mientras que los porcentajes de los errores relativos para las subcategorías correspondientes a Gases Médicos es de un 0.7 a un 4.3%.



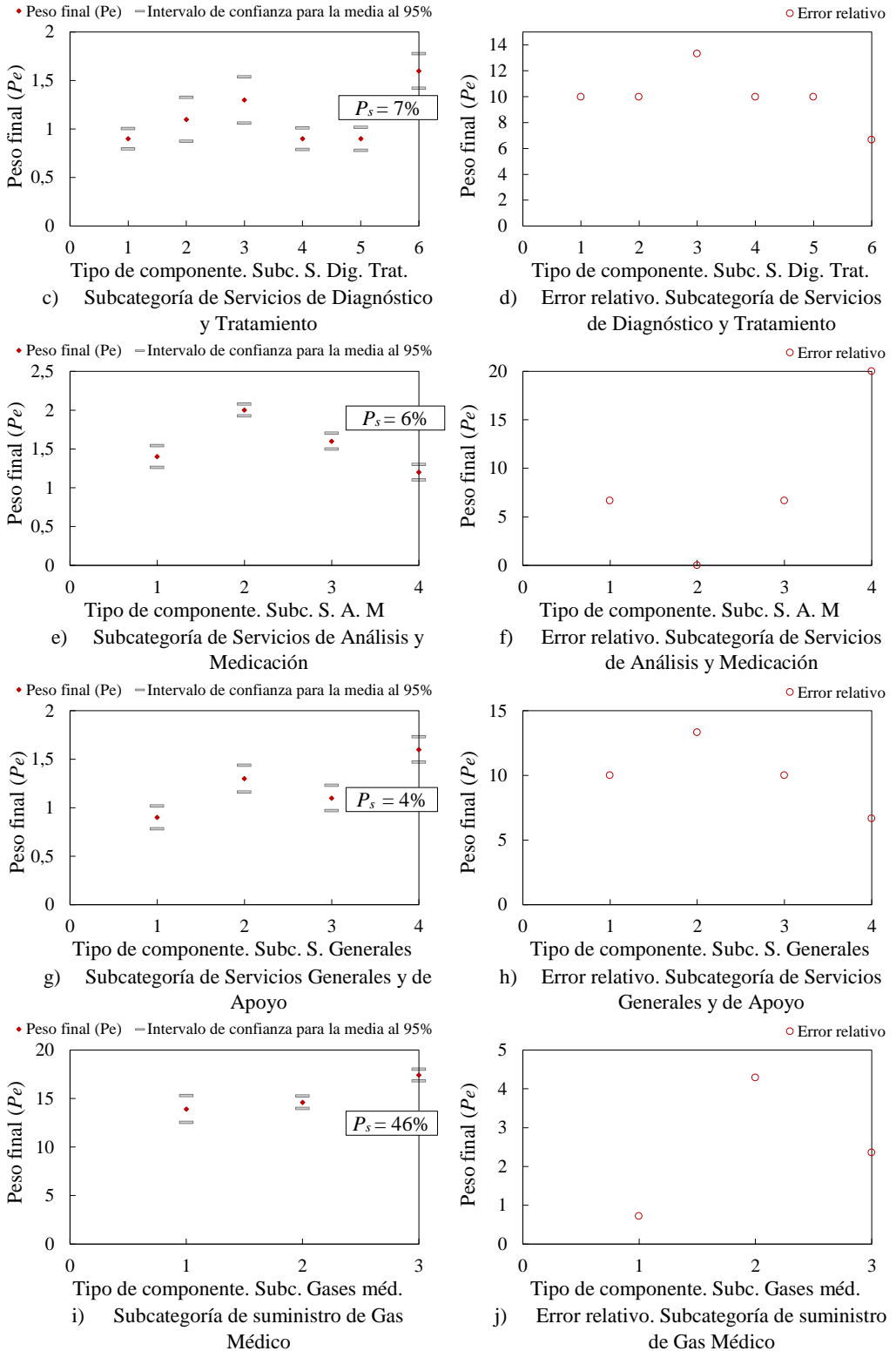


Figura 5-7. Análisis de calibración de la categoría equipamiento médico

La Figura 5-8 muestra cada “tipo de componente no estructural” asociado a cada bloque del “nombre del componente” correspondiente a la categoría de contenidos. Por lo tanto, los números 1 y 2 corresponden al bloque de estanterías pesadas, 3 y 4 a estanterías ligeras, 5 a almacenamiento de materiales peligrosos, finalmente 6, 7 y 8 corresponde a ordenadores y equipos de comunicación.

En la figura se observa que almacenamiento de materiales peligrosos es de mayor influencia en la pérdida de operación, mientras que ordenadores y equipos de comunicación presentan menor influencia en el desempeño sísmico no estructural en una infraestructura hospitalaria. No obstante, si se considera el peso de las curvas de fragilidad agrupadas por componentes. Por ejemplo, las estanterías ligeras (componente no estructural 3 y 4) ocuparían el primer lugar con un peso de 28.6, mientras que almacenamiento de materiales peligrosos sería de menor influencia con un peso de 21.9 (componente no estructural 5). Los porcentajes de los errores relativos para la categoría de contenidos es de un 0.5 a un 7.2%.

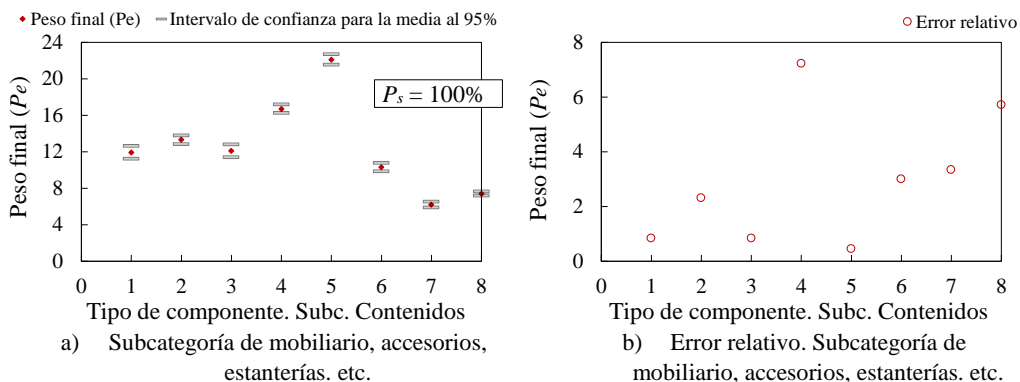


Figura 5-8. Análisis de calibración de la categoría de contenidos

El análisis de calibración permite concluir que los errores relativos, los cuales indican la proporción del error con respecto al valor exacto de la medición no son significativos. Por ejemplo, un error del 10% correspondiente al peso de una determinada fragilidad sísmica, resultaría un daño probable por encima o por debajo del daño promedio anticipado. Además, durante la validación de la herramienta automatizada demostró una influencia menor en la precisión del análisis general de la pérdida de función en infraestructura hospitalaria. La Tabla 5-11 muestra una comparativa entre el peso inicial con el peso encontrado (peso final) de cada subcategoría. La categoría de contenidos refleja la suma total de los pesos (100%). No obstante, cada peso individual ha sido calibrado. El Anejo D resume tanto los pesos iniciales como los pesos finales (validados) de componentes no estructurales.

Tabla 5-11. Comparativa entre el peso de ponderación de entrada (%) y el peso de ponderación de salida para subcategorías de los componentes y sistemas no estructurales

| Categorías                                    | Elementos arquitectónicos |          | Instalaciones                |                | Equipamiento médico |               | Contenidos |
|---|---------------------------|----------|------------------------------|----------------|---------------------|---------------|------------|
|   | Exterior                  | Interior | Equipos de sistemas críticos | Sist. distrib. | Serv. Médicos       | Gases médicos |            |
| <b>Pesos iniciales (<math>P_s</math>) (%)</b> | 34                        | 66       | 44                           | 56             | 55                  | 45            | 100        |
| <b>Pesos finales (<math>P_s</math>) (%)</b>   | 32                        | 68       | 43                           | 57             | 54                  | 46            | 100        |
| <b>Total (%)</b>                              | 100                       |          | 100                          |                | 100                 |               | 100        |

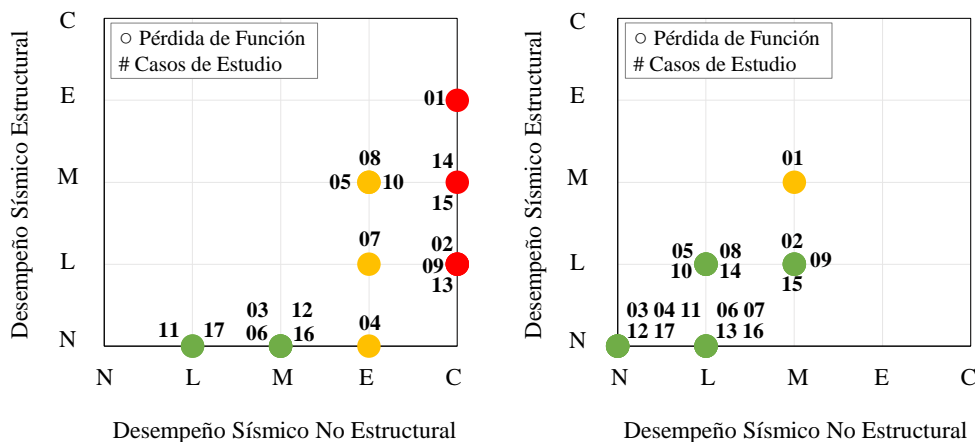
## 5.4.2 Análisis del poder predictivo de la herramienta automatizada en la pérdida de función en infraestructuras hospitalarias

Este subapartado presenta un análisis simplificado del potencial de la metodología propuesta mediante el empleo de la herramienta automatizada en el escenario de sismo registrado, escenario de la norma, así como las demandas sísmicas reducidas en el caso de diseñar o rehabilitar con aislación sísmica de base las infraestructuras hospitalarias. Además, se considera a los elementos estructurales y no estructurales en su condición actual y rehabilitada. Los efectos de rehabilitar sísmicamente sistemas estructurales y no estructurales se evalúan seleccionando curvas de fragilidad correspondientes a sistemas (estructurales y no estructurales) con alto diseño sísmico del sistema resistente y con adecuado diseño y detallamiento sísmico, respectivamente.

El objetivo del análisis es conocer el grado de pérdida de función de la infraestructura hospitalaria en los distintos casos analizados, a partir de la estimación del daño y/o desempeño sísmico de elementos estructurales y no estructurales. Complementariamente, conocer la demanda sísmica que alcanza la armonía entre el desempeño sísmico de los elementos estructurales y no estructurales. Las demandas sísmicas corresponden a los valores presentados en los subapartados 5.1.3, 5.3.1 y subapartado 5.3.2. El nivel de daño corresponde a los resultados de emplear la herramienta automatizada descrito en el subapartado 5.3.3. A continuación, se presenta el análisis del uso de la herramienta automatizada tanto para el sismo registrado, escenario de la norma, así como el caso de diseñar o rehabilitar con aislación sísmica de base las infraestructuras hospitalarias.

### 5.4.2.1 Análisis del uso de la herramienta automatizada en infraestructuras hospitalarias existentes en el escenario de sismos registrados

La Figura 5-9 muestra el análisis de los resultados de pérdida de función en infraestructuras hospitalarias en su condición actual y rehabilitada en el sismo registrado en estructuras existentes. La Figura 5-9a señala que, la pérdida de función en infraestructuras hospitalarias existentes se encuentra asociada al daño alcanzado en los componentes y sistemas no estructurales, e incluso si el desempeño sísmico estructural es nulo o leve. El desempeño no estructural en la mayoría de los hospitales analizados se centra en daño extenso y completo. Contrariamente, en la Figura 5-9b se observa que, considerando rehabilitados tanto elementos estructurales como no estructurales en las infraestructuras hospitalarias existentes, se logra en dieciséis casos de estudio pérdida de función bajo y/o nula, y temporal. No obstante, únicamente en cuatro casos de estudio se logra armonía entre el desempeño sísmico estructural y no estructural.



- a) Pérdida de función en el escenario de sismo registrado. Hospital en condición actual
- b) Pérdida de función en el escenario de sismo registrado. Elementos estructurales y no estructurales rehabilitados

1-A Pérdida de función baja y/o nula; 2-B Pérdida de función temporal; 3-C Pérdida de función permanente

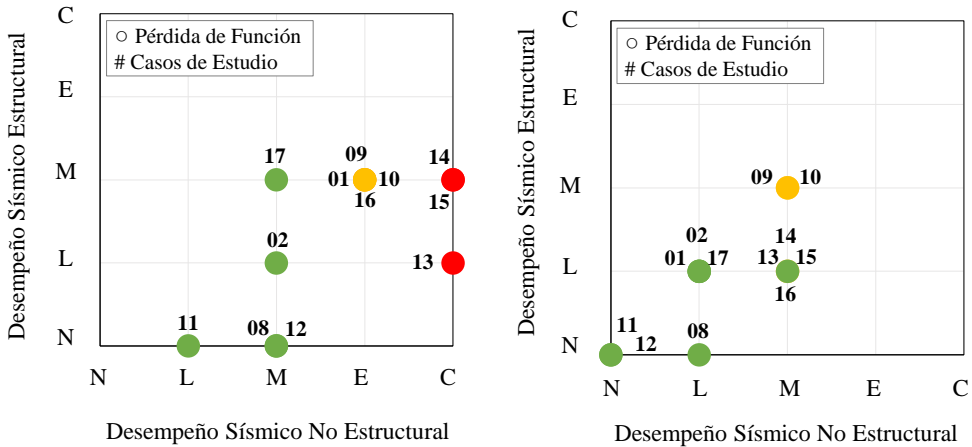
N: Nulo, L: Leve, M: Moderado, E: Extenso, C: Completo

Figura 5-9. Pérdida de función en infraestructuras hospitalarias en el escenario de sismo registrado

Además, durante el proceso de análisis mediante el uso de la herramienta en los casos de estudio en su condición actual y en el escenario de sismo registrado se concluye que, los componentes no estructurales requieran algún tipo de reparación (asociado al nivel DS<sub>1</sub> o superior) es mayor al 90%. A partir de la observación del daño real, se puede inferir que la pérdida de función en infraestructuras de salud, se debe básicamente: i) al uso recurrente del sistema de fachadas y de particiones de mamposterías de ladrillo o bloque de concreto; ii) falsos techos con ausencia de arriostres y/o anclajes; iii) interacción entre rociadores incrustados en falsos techos; iv) instalación de equipos médicos sin consideración sísmica; y v) estanterías y armarios sin previsión sísmica como arriostres y anclajes.

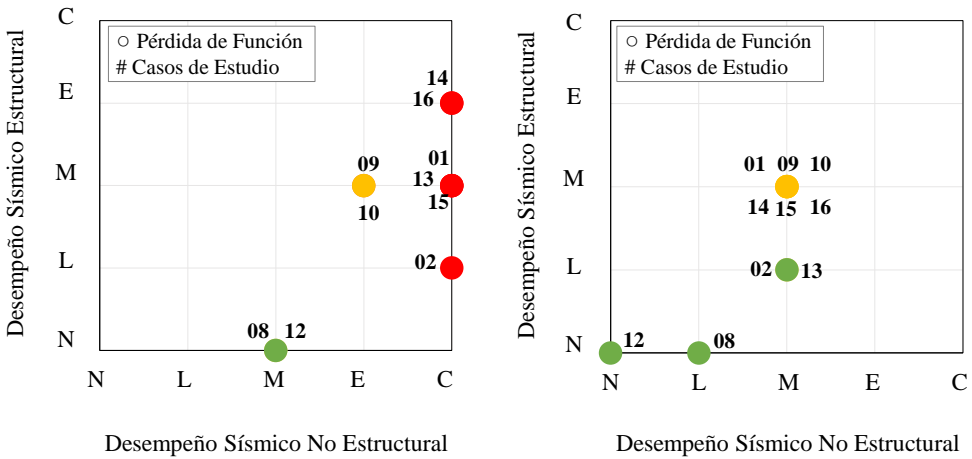
#### 5.4.2.2 Análisis del uso de la herramienta automatizada en infraestructuras hospitalarias con base fija en el escenario normativo

La Figura 5-10 muestra el análisis de los resultados de pérdida de función en infraestructuras hospitalarias con base fija, en su condición actual y rehabilitada en los elementos estructurales y no estructurales. En la Figura 5-10a se observa que, considerando la infraestructura en el escenario de sismo de diseño, en su condición actual, los componentes no estructurales se encuentran entre daño leve y completo. Asimismo, la figura muestra el grado de pérdida de función baja y/o nula en cinco casos de estudio, cuatro casos de estudio alcanzan una pérdida de función temporal, mientras que tres casos de estudio alcanzan una pérdida de función permanente. Contrariamente, la Figura 5-10b considerando la infraestructura, rehabilitada, los casos de estudio alcanzan grados de pérdida de función baja y/o nula. No obstante, los dos casos de estudio localizados en Chile alcanzan una pérdida de función temporal. La armonía entre el desempeño sísmico estructural y no estructural se alcanza en un nivel de daño leve, correspondiente a los casos de estudio de los Estados Unidos y México.



a) Pérdida de función en el escenario de sismo de diseño. Hospital en condición actual

b) Pérdida de función en el escenario de sismo de diseño. Elementos estructurales y no estructurales rehabilitados



c) Pérdida de función en el escenario de sismo máximo probable. Hospital en condición actual

d) Pérdida de función en el escenario de sismo máximo probable. Elementos estructurales y no estructurales rehabilitados

1-A Pérdida de función baja y/o nula; 2-B Pérdida de función temporal; 3-C Pérdida de función permanente

N: Nulo, L: Leve, M: Moderado, E: Extenso, C: Completo

Figura 5-10. Pérdida de función en infraestructuras hospitalarias con base fija en el escenario de la norma

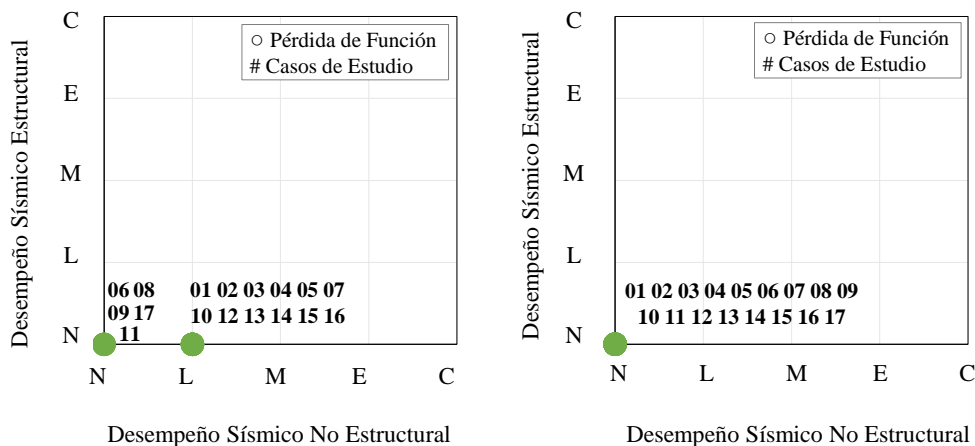
La Figura 5-10c se observa que, considerando la infraestructura en el escenario de sismo máximo probable, en su condición actual, la pérdida de función en la mayoría de casos de estudio es notable. No obstante, los casos de estudio localizados en Italia logran un desempeño sísmico estructural nulo y en componentes no estructurales moderado, en consecuencia, con una pérdida de función baja y/o nula. La Figura 5-10d muestra que, considerando la infraestructura hospitalaria rehabilitada (estructural y no estructural), el grado de pérdida de función decrece notablemente.

No obstante, casos de estudio localizados en países considerados altamente sísmicos como los Estados Unidos, Chile y Ecuador se alcanza una pérdida de función temporal. En consecuencia, no se logra la armonía entre el desempeño sísmico estructural y no estructural.

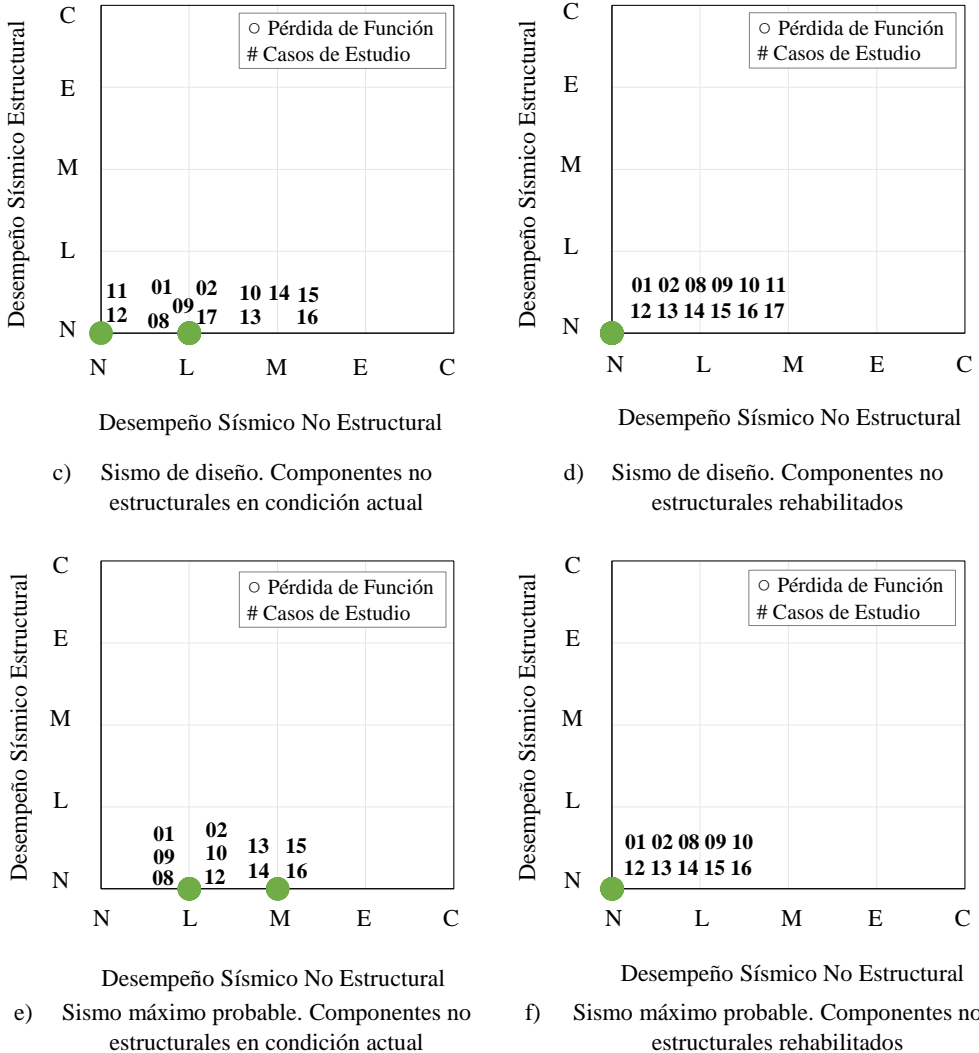
5.4.2.3 *Análisis del uso de la herramienta automatizada en el caso de rehabilitar o diseñar infraestructura hospitalaria con aislación sísmica de base*

Se analiza el uso de la herramienta en el escenario de sismo registrado y en el escenario de la norma en infraestructuras hospitalarias con aislación sísmica de base. El valor de las demandas sísmicas para estimar el desempeño sísmico tanto estructural como no estructural corresponde a lo especificado en el subapartado 5.3.2 y los niveles de daño al subapartado 5.3.3.

El resultado de utilizar aislación sísmica de base en infraestructura hospitalaria incrementa la seguridad estructural, es decir, no se espera ningún daño probable en elementos estructurales. No obstante, como se muestra en la Figura 5-11 los componentes y sistemas no estructurales alcanzan un desempeño sísmico entre nulo a moderado. Asimismo, en las figuras se observa que, considerando los componentes y sistemas no estructurales, sin rehabilitar, no se logra una armonía entre el desempeño estructural y no estructural, requerida por las filosofías de diseño actuales. En consecuencia, es necesario rehabilitar los componentes y sistemas no estructurales tales como incorporar arriostres, anclajes y certificaciones sísmicas de componentes y sistemas no estructurales.



- a) Sismo real. Componentes no estructurales en condición actual
- b) Sismo real. Componentes no estructurales rehabilitados



1-A Pérdida de función baja y/o nula; 2-B Pérdida de función temporal; 3-C Pérdida de función permanente

N: Nulo, L: Leve, M: Moderado, E: Extenso, C: Completo

**Figura 5-11.** Pérdida de función en infraestructuras hospitalarias en el caso de rehabilitar con aislación sísmica de base

La Figura 5-11 enfatiza la importancia de rehabilitar los componentes y sistemas no estructurales para alcanzar una continuidad de función durante o después de un evento sísmico. En consecuencia, al reemplazar o rehabilitar los componentes o sistemas no estructurales a fin implementar consideraciones sísmicas consistentes con una SDC E/F, el desempeño sísmico no estructural minimiza la posible pérdida de función en infraestructuras hospitalarias. De tal manera, el resultado será un “hospital seguro” cuya función permanecerá a su máxima capacidad durante e inmediatamente después del evento sísmico de determinadas características.

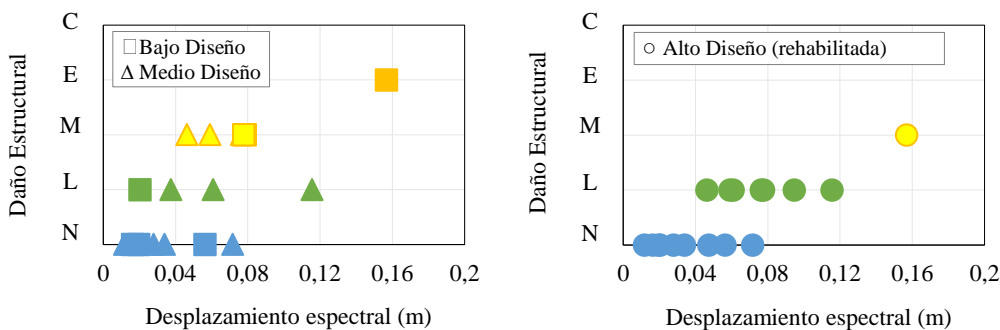


### 5.4.3 Análisis del nivel de demanda sísmica que genera pérdida de función en infraestructura hospitalaria con base fija y con base aislada

En este subapartado se presenta el análisis simplificado de demandas sísmicas asociadas a sismos registrados, sismos de diseño y a sismos máximos probables, considerando la infraestructura hospitalaria en su condición actual y rehabilitada (elementos estructurales y no estructurales). Asimismo, se incluye el análisis de desempeño sísmico considerando la infraestructura hospitalaria con sistemas de protección sísmica no convencional, como sistemas de aislación sísmica de base. Los valores de las demandas sísmicas corresponden al subapartado 5.3.1 y 5.3.2 que incluyen una variedad de registros de eventos sísmicos, de manera que el análisis permita capturar los diferentes escenarios a las cuales la infraestructura hospitalaria pueda verse expuesta durante su vida útil. El análisis efectuado del uso de la herramienta automatizada es derivado del subapartado 5.4.2. El objetivo del análisis es inferir el nivel de demanda sísmica que desencadena distintos estados de daño y/o desempeño sísmico en elementos estructurales y componentes no estructurales. Por lo tanto, conocer la demanda sísmica causante de los distintos grados de pérdida de función en infraestructura hospitalaria. Complementariamente, el análisis permite inferir el nivel de demanda sísmica para lograr una armonía y desarmonía entre el desempeño sísmico estructural y no estructural.

#### 5.4.3.1 Análisis de las demandas sísmicas que generan pérdida de función en infraestructuras hospitalarias con base fija

La Figura 5-12 muestra los diferentes niveles de daño y/o desempeño sísmico que alcanzan los elementos estructurales en su condición actual y rehabilitada. El valor de la demanda sísmica es el desplazamiento espectral ( $S_d$ ), en metros (m). Las Figuras 5-12a, 5-12c y 5-12e, permiten inferir que los elementos estructurales, en su condición actual, la demanda sísmica que desencadena los distintos niveles de daño, con un bajo diseño sísmico, corresponde a un desplazamiento espectral de 0.020 m. Por el contrario, con un diseño sísmico medio, el desplazamiento espectral es de 0.038 m. Las Figuras 5-12b, 5-12d y 5-12f, permiten inferir que, al rehabilitar los elementos estructurales, se logra reducir los distintos niveles de daño en elementos estructurales. No obstante, el sistema estructural rehabilitado puede presentar daño leve y moderado, con un desplazamiento espectral, equivalente a 0.043 m y 0.095 m, respectivamente.



a) Sismo registrado. Elementos estructurales en condición actual

b) Sismo registrado. Elementos estructurales rehabilitados

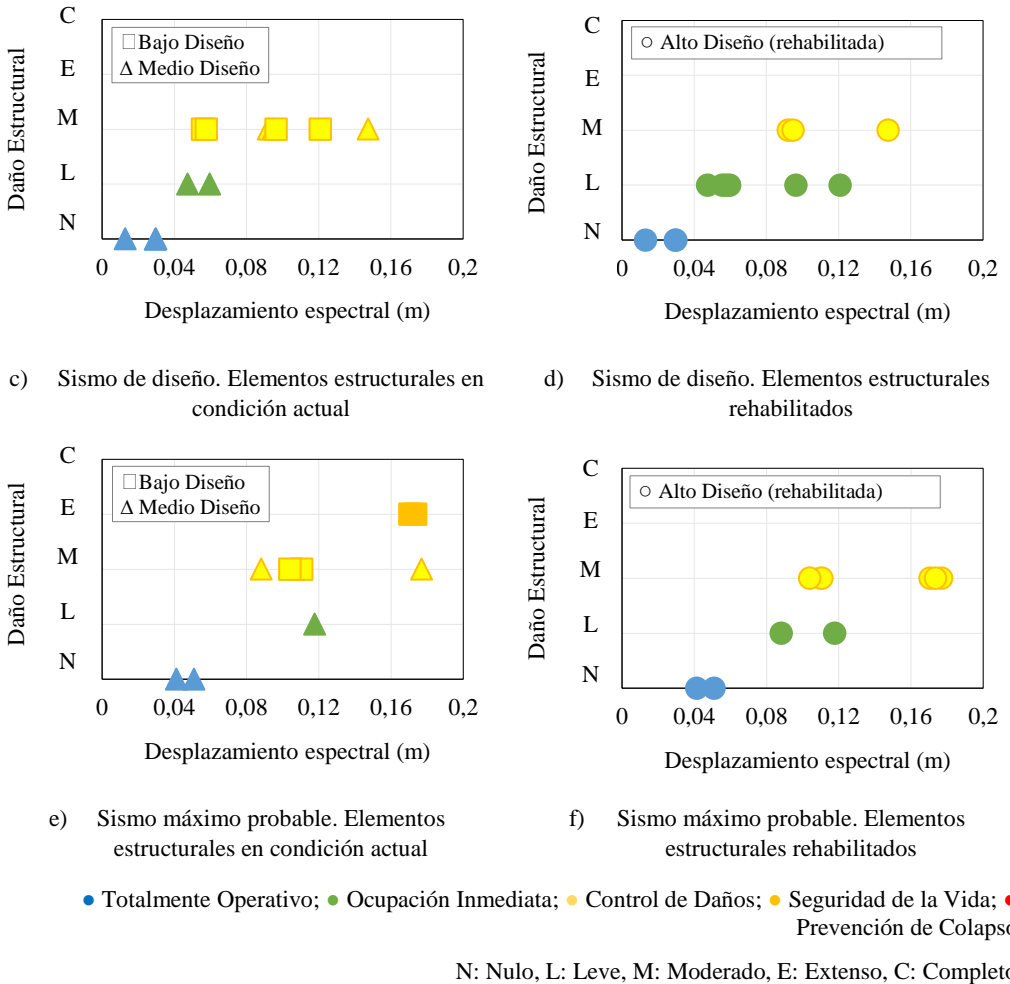


Figura 5-12. Demanda sísmica que genera distintos niveles de daño estructural

La Figura 5-13 muestra los diferentes niveles de daño y/o desempeño sísmico que alcanzan los componentes y sistemas no estructurales. La demanda sísmica se caracteriza mediante la deriva de entrepiso promedio ( $\bar{\delta}$ ) y la aceleración absoluta máxima de piso ( $\overline{PFA}$ ) en el interior del edificio. En las Figuras 5-13a, 5-13c y 5-13e se puede observar que, para los componentes y sistemas no estructurales, en su condición actual, existe nula probabilidad de no exhibir daño. No obstante, se observa significativa probabilidad de exhibir daño extenso y completo.

En las figuras se observa que, las demandas sísmicas que desencadenan los distintos niveles de daño en componentes y sistemas no estructurales (daño leve), corresponde a la  $\bar{\delta}$  de 0.0010 rad y la  $\overline{PFA}$  de 0.16g. Asimismo, en las figuras se observa que, demandas sísmicas equivalentes de  $\bar{\delta}$  de 0.0047 rad y  $\overline{PFA}$  de 0.61g, se alcanza un nivel de daño completo en los componentes y sistemas no estructurales. Por el contrario, las Figuras 5-13b, 5-13d y 5-13f, muestran que los componentes y sistemas no estructurales, rehabilitados, pueden verse afectados con daño leve o daño que detona los distintos niveles de daño, equivalente a demandas sísmicas de  $\bar{\delta}$  de 0.0067 rad y  $\overline{PFA}$  de 0.49g.

Del mismo modo, las figuras señalan que, las demandas sísmicas de  $\bar{\delta}$  de 0.0084 rad y  $\overline{PFA}$  de 1.76g los componentes y sistemas no estructurales alcanzan un daño extenso.

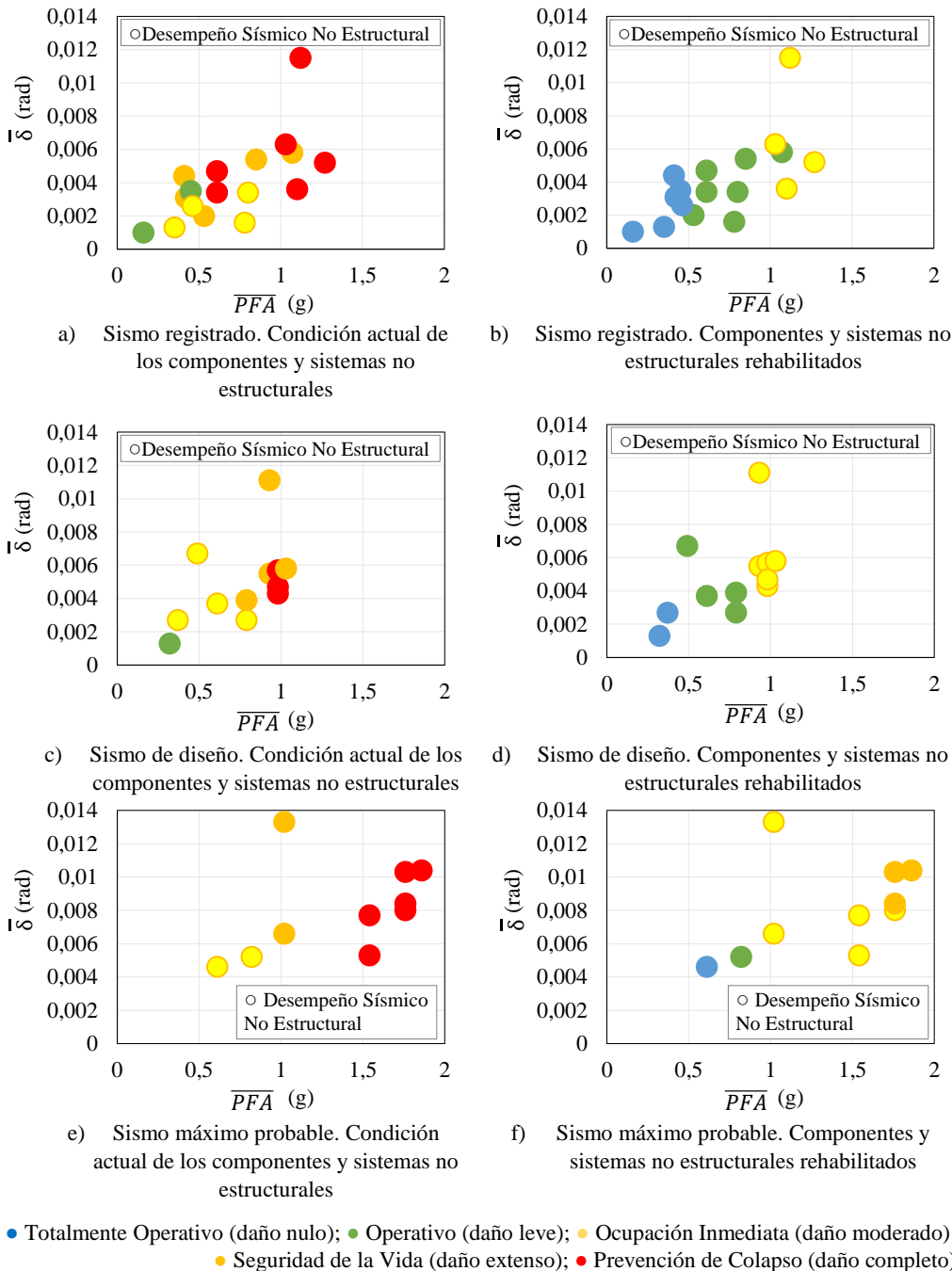


Figura 5-13. Demanda sísmica que genera distintos niveles de daño no estructural

A fin de conocer los distintos grados de pérdida de función, considerando la infraestructura hospitalaria rehabilitada tanto en elementos estructurales como no estructurales, sometida a sismos

registrados y en el escenario normativo. Se presenta la siguiente tabla resumen de acuerdo al subapartado 3.2.3. El valor de demandas sísmicas desplazamiento ( $S_d$ ), deriva de entropía promedio ( $\bar{\delta}$ ) y la aceleración absoluta máxima de piso ( $\overline{PFA}$ ) en el interior del edificio, corresponde al subapartado 5.3.1 y los niveles de daño del desempeño sísmico estructural y no estructural corresponde al subapartado 5.3.3.1 y subapartado 5.3.3.2.

La Tabla 5-12 muestra que, la demanda sísmica para alcanzar una armonía entre el desempeño sísmico estructural y no estructural, con un nivel de daño nulo, corresponde a un  $S_d$  de 0.016 m,  $\bar{\delta}$  de 0.0010 rad y  $\overline{PFA}$  de 0.16g, mientras que con  $\bar{\delta}$  de 0.0026 rad y  $\overline{PFA}$  de 0.46g existe desarmonía, es decir, los elementos estructurales permanecen intactos y los elementos no estructurales presentan daños leves. Un análisis similar se puede efectuar para los otros niveles de daño. Por ejemplo, para alcanzar una armonía con daño leve, la demanda sísmica correspondiente para el desempeño sísmico estructural, equivalente a  $S_d$  es de 0.028 m y desempeño sísmico no estructural, equivalente a  $\bar{\delta}$  de 0.0026 rad y  $\overline{PFA}$  de 0.49g, mientras que con  $\bar{\delta}$  de 0.0055 rad y  $\overline{PFA}$  de 0.93g existe desarmonía, es decir, los elementos estructurales alcanzan daño leve y los elementos no estructurales presentan daño moderado. No obstante, la pérdida de función es baja y/ o nula, en consecuencia, es necesario aplicar medidas para mejorar la capacidad de gestión de emergencias y llevar a cabo medidas a mediano y largo plazo para mejorar el nivel de seguridad funcional. Igualmente, la tabla indica para alcanzar una armonía con daño moderado y en consecuencia pérdida de función temporal. La demanda sísmica correspondiente para el desempeño sísmico estructural, es de  $S_d$  0.092 m y desempeño sísmico no estructural, corresponde a  $\bar{\delta}$  de 0.0055 rad y  $\overline{PFA}$  de 0.93g, mientras que con  $\bar{\delta}$  de 0.0084 rad y  $\overline{PFA}$  de 1.76g existe desarmonía, en otras palabras, los elementos estructurales alcanzan un daño estructural moderado y los componentes no estructurales alcanzan daño extenso.

**Tabla 5-12.** Demandas sísmicas que generan pérdida de función en infraestructuras hospitalarias rehabilitadas con base fija

| Infraestructura hospitalaria rehabilitada con alto diseño sísmico del sistema resistente y con SDC E/F en componentes no estructurales |                 |           | Desempeño Sísmico No Estructural |                 |                 |                 |                 |     |
|--|-----------------|-----------|----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----|
|  |                 |           | DS <sub>0</sub>                  | DS <sub>1</sub> | DS <sub>2</sub> | DS <sub>3</sub> | DS <sub>4</sub> |     |
|  |                 |           | $\bar{\delta}$ (rad)             | 0.0010          | 0.0026          | 0.0055          | 0.0084          | -   |
|  |                 |           | $\overline{PFA}$ (g)             | 0.16            | 0.46            | 0.93            | 1.76            | -   |
| Desempeño Sísmico Estructural  | DS <sub>0</sub> | $S_d$ (m) | 0.016                            | 1-A             | 1-A             | 1-A             | 2-B             | 3-C |
|  | DS <sub>1</sub> |           | 0.028                            | -               | 1-A             | 1-A             | 2-B             | 3-C |
|  | DS <sub>2</sub> |           | 0.092                            | -               | -               | 2-B             | 2-B             | 3-C |
|  | DS <sub>3</sub> |           | -                                | -               | -               | -               | 3-C             | 3-C |
|  | DS <sub>4</sub> |           | -                                | -               | -               | -               | -               | 3-C |

1-A Pérdida de función baja y/o nula; 2-B Pérdida de función temporal; 3-C Pérdida de función permanente

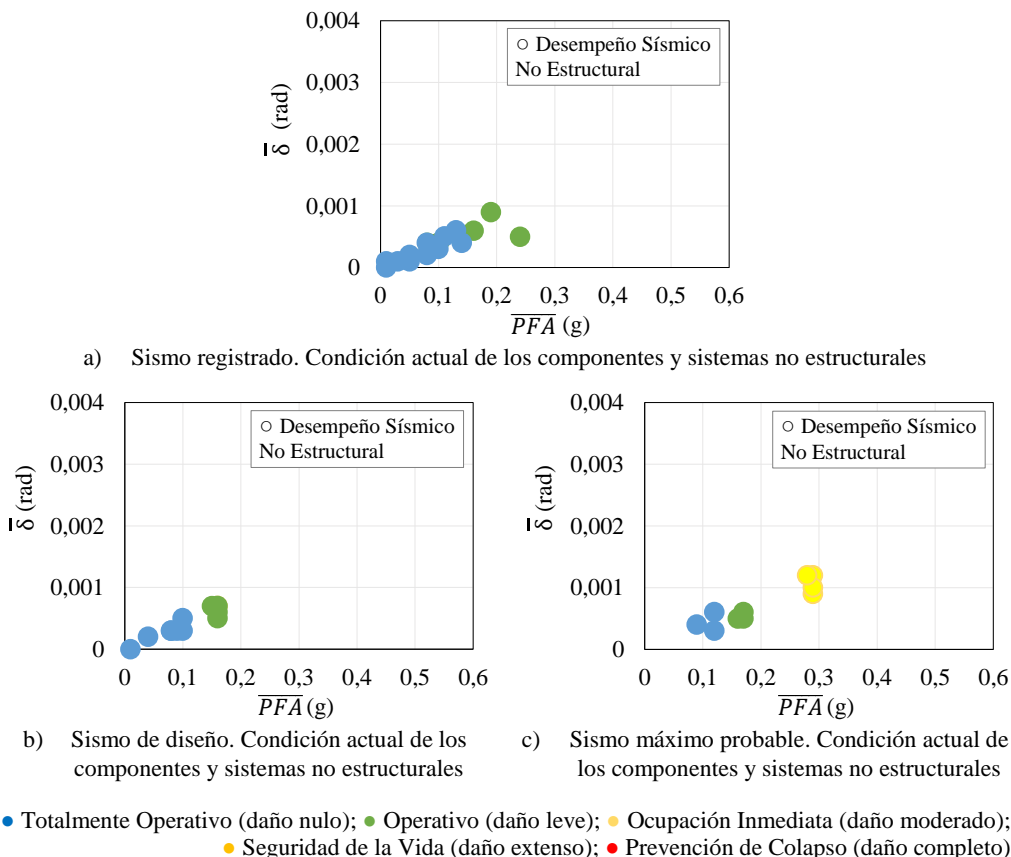
DS<sub>0</sub>: Nulo, DS<sub>1</sub>: Leve, DS<sub>2</sub>: Moderado, DS<sub>3</sub>: Extenso, DS<sub>4</sub>: Completo

### 5.4.3.2 Análisis de las demandas sísmicas que generan pérdida de función en infraestructuras hospitalarias con base aislada

Finalmente, teniendo en cuenta los cambios en la filosofía de diseño, los avances tecnológicos del uso inminente de sistemas de protección sísmica no convencionales y la importancia de mantener

en función las infraestructuras hospitalarias ante un evento sísmico de determinadas características. La continuidad ininterrumpida de operación de los componentes y sistemas no estructurales juega un papel fundamental. Se ha efectuado un análisis simplificado del desempeño sísmico no estructural en el caso que el sistema resistente sea diseñado o rehabilitado con sistemas de aislación sísmica de base. En este contexto, las demandas sísmicas estimadas en este estudio, tales como la deriva de entrepiso promedio ( $\bar{\delta}$ ) y la aceleración absoluta máxima de piso ( $\overline{PFA}$ ) en el interior del edificio han sido estimadas de acuerdo al subapartado 5.3.2.

La Figura 5-14 muestra las demandas sísmicas que generan los distintos niveles de daños no estructurales, en su condición actual (sin consideraciones de diseño sísmico o muy bajo), en infraestructuras con aislación sísmica de base. En las figuras 5-14a, 5-14b y 5-14c se observa que, las infraestructuras de salud podrían exhibir daños leves cuando están sujetas a  $\bar{\delta} = 0.0005$  rad y  $\overline{PFA}$  en el rango de 0.15g a 0.24g. Tenga en cuenta que este valor de deriva de entrepiso no causa daño a los componentes no estructurales. En este contexto, el daño no estructural está asociado únicamente con la aceleración de piso. Por otro lado, en la Figura 5-14c se observa que, los componentes y sistemas no estructurales pueden verse afectados en un daño moderado, con demandas sísmicas equivalente a  $\bar{\delta}$  de 0.0012 rad y  $\overline{PFA}$  de 0.28g. Tenga en cuenta que el valor de la deriva de entrepiso promedio se encuentra asociada a la fragilidad sísmica de mampostería de relleno sin dilataciones o consideraciones sísmicas.



**Figura 5-14.** Demanda sísmica que genera distintos niveles de daño no estructural sin rehabilitar en infraestructuras con aislación sísmica de base

La Tabla 5-13 muestra la demanda sísmica para alcanzar armonía y desarmonía entre el desempeño sísmico estructural y no estructural en infraestructuras hospitalarias con aislación sísmica de base, considerando componentes y sistemas no estructurales sin rehabilitar (sin consideraciones de diseño sísmico o muy bajo). La tabla muestra que, las infraestructuras de salud podrían exhibir daño nulo cuando están sujetas a una aceleración máxima de piso ( $\overline{PFA}$ ) de 0.14g. Por el contrario, con ( $\overline{\delta}$ ) de 0.0002 rad y un rango de ( $\overline{PFA}$ ) de 0.15g a 0.24g genera desarmonía, es decir, los elementos estructurales permanecen intactos y los componentes no estructurales presentan daños leves. Asimismo, denota desarmonía con daño moderado en componentes no estructurales, correspondiente a demandas sísmicas de ( $\overline{\delta}$ ) de 0.0012 rad y ( $\overline{PFA}$ ) de 0.28 g. Tenga en cuenta que el valor de la deriva de entrepiso promedio se encuentra asociada a la fragilidad sísmica de mampostería de relleno sin dilataciones o consideraciones sísmicas.

**Tabla 5-13.** Demandas sísmicas que generan pérdida de función en infraestructuras hospitalarias con aislación sísmica de base. Componentes y sistemas no estructurales sin rehabilitar

|  |                           |           | Desempeño Sísmico No Estructural |                        |                     |                 |                 |     |
|--|---------------------------|-----------|----------------------------------|------------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----|
|  |                           |           | DS <sub>0</sub>                  | DS <sub>1</sub>        | DS <sub>2</sub>     | DS <sub>3</sub> | DS <sub>4</sub> |     |
| Infraestructura hospitalaria con aislación sísmica de base y componentes y sistemas no estructurales sin rehabilitar | $\overline{\delta}$ (rad) |           | 0.0001                           | 0.0002 <sup>a</sup>    | 0.0012 <sup>b</sup> | -               | -               |     |
|  | $\overline{PFA}$ (g)      |           | < 0.14 <sup>c</sup>              | 0.15 <sup>c</sup><br>- | > 0.28              | -               | -               |     |
|  |                           |           |                                  | 0.24                   |                     |                 |                 |     |
| Desempeño Sísmico Estructural (medio diseño)   | DS <sub>0</sub>           | $S_d$ (m) | 0.001                            | 1-A                    | 1-A                 | 1-A             | 2-B             | 3-C |
|  | DS <sub>1</sub>           |           | -                                | -                      | 1-A                 | 1-A             | 2-B             | 3-C |
|  | DS <sub>2</sub>           |           | -                                | -                      | -                   | 2-B             | 2-B             | 3-C |
|  | DS <sub>3</sub>           |           | -                                | -                      | -                   | -               | 3-C             | 3-C |
|  | DS <sub>4</sub>           |           | -                                | -                      | -                   | -               | -               | 3-C |

**1-A** Pérdida de función baja y/o nula; **2-B** Pérdida de función temporal; **3-C** Pérdida de función permanente

<sup>a</sup>Tenga en cuenta que este valor de deriva no causa daño a los componentes no estructurales. En este contexto, el daño no estructural está asociado únicamente con la aceleración de piso.

<sup>b</sup>Tenga en cuenta que este valor de deriva se encuentra asociado a la fragilidad sísmica de mampostería de relleno sin dilataciones o consideraciones sísmicas.

<sup>c</sup>Tenga en cuenta que las fragilidades sísmicas correspondientes a equipos médicos no consideran pérdida de operación por la necesidad de recalibración.

DS<sub>0</sub>: Nulo, DS<sub>1</sub>: Leve, DS<sub>2</sub>: Moderado, DS<sub>3</sub>: Extenso, DS<sub>4</sub>: Completo



## 6 CONCLUSIONS

The research reported in this dissertation contributes to the field of architecture for a better understanding of the seismic performance of structural and nonstructural components and systems in health infrastructure. In addition, through the proposed methodology, complex mathematics are made available to decision-makers including authorities, investors, stakeholders, medical doctors, operation managers, architects, and administrators, among many other professionals. The tool provides rapid information useful to decide the health infrastructure that should be prioritized for retrofit measures and to suggest the actions that must be taken in order to keep a proper seismic performance, and therefore, the health facility fully operational during and/or immediately after severe seismic events.

Finally, the proposed methodology, by using an automated tool, emphasizes that the seismic design of nonstructural elements constitutes a key issue for the performance-based seismic design of new buildings and the retrofit of existing ones.

### 6 CONCLUSIONS

- 6.1 Summary and conclusions
- 6.2 Recommendations for future research

### 6.1 Summary and conclusions

The main objective of this research was to propose a methodology for rapid visual



assessment of the susceptibility of functional loss due to earthquakes affecting health infrastructure. The methodology uses an automated tool that can be applied to first-, second- and third-level hospitals, and therefore to the whole health net infrastructure, in order to anticipate the expected level of damage that the health infrastructure could experience in case of a seismic event. Note that this study focuses on the influence of seismic performance of nonstructural components on the potential effects on health infrastructure functionality.

In order to better understand the complexity of health facilities, field visits were carried out to hospitals located in low and high seismicity regions. Hospitals in Barcelona, Ecuador, and Chile were visited. In this study, for the estimation of the structural seismic performance, a simplified analysis of 21 seismic fragilities for essential buildings was carried out according to the generic information available in HAZUS. The seismic fragility focused on three model building types such as reinforced concrete moment resistant frames, reinforced concrete shear walls, and reinforced concrete frames with unreinforced masonry infill walls. On the other hand, for the estimation of the seismic performance of nonstructural components and systems, a detailed mathematical process was carried out. The prediction of damage was performed by using 125 seismic fragilities taken mainly from the FEMA P-58 database, HAZUS, test reports, and analytical methods. The nonstructural components and systems were classified in four categories: architectural components (exterior and interior), building utility systems (equipment and distributed systems of critical support services), medical equipment (medical services and medical gases), and contents (cabinets, furniture, fixtures, and similar).

For calibration of the automated tool, the seismic actions that caused damage in health facilities were estimated from the accelerograms recorded at the closest seismological stations. Simplified formulations were presented to estimate the probabilities of reaching different levels of damage based on EDP's (Engineering Demand Parameters) such as spectral displacements for structural elements, and story drifts or peak floor accelerations for nonstructural components and systems. Seventeen case studies located in different countries were selected. These case studies were affected by seismic events with moment magnitudes ranging between 5.1 and 8.8, including the United States, Taiwan, Turkey, Chile, Italy, El Salvador, Peru, Spain, Ecuador, and Mexico. The following information was presented for each case study: i) the main characteristics of the hospitals such as year of construction/design, number of stories (height), plan symmetry, vertical regularity, short columns, pounding risk, soil type, conservation condition, among other variables; ii) the effects of seismic events through the analysis of photographs; and iii) review of technical reports including damage and operational loss assessments. The performed calibration included a comparison between observed and predicted damage, obtained from the fragility curves evaluated at the estimated EDP's.

Finally, the proposed methodology was used to assess the seismic performance of health facilities subjected to earthquake loads obtained from local applicable standards. In addition, the automated tool was used to assess the seismic performance of nonstructural components and systems when the building has been seismically retrofitted. This allows to determine whether the harmonization of seismic performance between structural and nonstructural elements can be achieved. From the results of this research, the following main conclusions can be drawn:

1. During the calibration process performed considering damage observations of seventeen case studies, the automated tool confirmed that the probability that nonstructural components and systems require some type of repair (associated to DS<sub>1</sub> level or higher) is greater than 90%. The analysis carried out indicates that the seismic demands that

trigger initial nonstructural damage correspond to story drifts ( $\bar{\delta}$ ) close to 0.0010 rad, and peak floor accelerations ( $\overline{PFA}$ ) close to 0.16g. In addition, most damage of nonstructural components and systems are caused by the absence of anchors and/or braces or deficiencies in their seismic design and detailing. Therefore, it can be reasonably assumed that in order to achieve a “safe hospital” or minimize the possible damage during severe seismic events, it is required to incorporate seismic bracings, to improve anchorage conditions, and to introduce seismic stoppers, among other similar retrofit measures. In addition, retrofit actions are necessary for the category of the contents such as shelves, computers and communication equipment and furniture.

2. During the validation process, the automated tool predicted the actual seismic damage of health facilities with remarkable accuracy, considering the simplified approach followed in the methodology. The weights values for each category influencing the functionality loss of health facilities were: i) architectural components, 32% corresponds to exterior subcategory and 68% to interior subcategory; ii) building utility systems, 43% corresponds to critical support services equipment and 57% to distributed systems; iii) medical equipment, 54% corresponds to medical services and 46% to medical gases; and iv) contents, a 28.6% corresponds to light shelves, 25.5% to heavy shelves, 24% to computer and communication equipment, and 21.9% to hazardous materials storage.
3. After validation, the tool was used to address the feasibility of harmonizing the seismic performance of structural and nonstructural elements in retrofitted hospital buildings and/or new facilities designed according to current (higher) seismic design standards. The shift of seismic fragility following retrofit measures and/or introducing the highest seismic design considerations for structural and nonstructural elements demonstrated that it is possible to harmonize their performance under severe and exceptionally severe earthquakes. Nevertheless, health infrastructures located in high seismicity regions such as the United States, Chile and Ecuador have shown further challenges, including the need for incorporating seismic isolation and energy dissipation systems, in order to achieve an increased structural and nonstructural safety level.
4. The incorporation of seismic isolation systems, reducing both absolute floor accelerations and story drifts up to 70 to 80%, is needed in order to achieve the harmonization of seismic performance between structural and nonstructural elements in high seismicity regions. In any case, even using seismic isolation technologies, the nonstructural components shall be designed following the strictest seismic design considerations.
5. From the analysis of the seismic demands triggering the structural damage states, it was observed that the conventional seismic rehabilitation allows to reduce the predicted damage. Nevertheless, the retrofitted structural systems exhibited slight and moderate damage for equivalent spectral displacements equal to 0.043 and 0.095 m, respectively.
6. From the analysis of the seismic demands triggering the several degrees of operation loss for fixed base (conventional) structures retrofitted following high seismic design standard requirements for both structural and nonstructural components, it is observed that operational loss is under control (null or limited), without any damage, for spectral displacements under 0.016 m, story drifts ( $\bar{\delta}$ ) under 0.001 rad and peak floor accelerations ( $\overline{PFA}$ ) under 0.16g.

7. Actions on nonstructural components exceeding a story drift equal to 0.0026 rad and a peak floor acceleration equal to 0.46g trigger the divergence between structural and nonstructural seismic performances. In this case, structural elements remain undamaged and nonstructural elements exhibit slight damage.
8. From the results obtained after simulating the incorporation of a seismic isolation system in the structure, considering nonstructural components and systems without (or with very low) seismic design considerations, it is observed that the health facilities could exhibit slight damage when subject to peak floor accelerations ( $\overline{PFA}$ ) ranging from 0.15g to 0.24g. Moreover, it is observed that the facility could exhibit moderate damage when subject to  $\overline{PFA}$  exceeding 0.28g. Nevertheless, the functionality loss would be low or null.
9. After using the predicting tool to estimate the functional loss under recorded ground motions and code compliant seismic demands, it is demonstrated that the conventional seismic rehabilitation of structural and nonstructural components does not allow to achieve continuity of functional operation. Only the seismic rehabilitation considering seismic isolation and high seismic standard for nonstructural design allows to achieve continuity of operations, preventing damage, and accomplishing the harmonization between structural and nonstructural seismic performances.
10. The automated tool yielded important information regarding the suitability of the proposed methodology for the rapid visual assessment of the susceptibility of functional loss due to earthquake loading that affects the health infrastructure. Moreover, the visual interpretation of the results yielded by the automated tool will allow the decision-maker to quickly identify the nonstructural component categories and subcategories with the largest influence and impact on the health infrastructure functional loss.
11. The results demonstrated the effectiveness of the proposed methodology by using an automated tool and its applicability for practical purposes. The tool can be used to assess the level of functionality loss in the hospital infrastructure or in a network of hospitals, at local, regional or country level. Consequently, it allows to determine the actions and measures that should be taken in order to improve the safety and capacity of health facilities to be available during and right after severe seismic events. In addition, the tool provides a useful method to prioritize and allocate economic resources to mitigate the health net infrastructure seismic risk.

## **6.2 Recommendations for future research**

From the obtained results, the following recommendations for future research are made:

1. Given the scarcity of experimental results on the functionality loss of medical equipment and piping systems in general, additional experimental tests should be conducted in order to establish more accurate seismic fragility curves.
2. It is recommended to analyze more case studies including second- and third-level hospitals, and high complexity hospitals in order to populate the database, aiming at getting a better calibration for the prediction tool.

3. The automated tool can be used to anticipate the functionality loss of a local, regional or country health network. In this way, the authorities or decision-makers in charge of the health network can either develop or improve their contingency plans and network development plans.
4. It is recommended that future research includes in the tool the recovery time required by a building after a seismic event. However, it will be necessary to collect information about actual hospital downtime.
5. Estimating economic losses after a seismic event would be another important point to be considered in future research.
6. A catalog of specific hospital seismic protection details that provide a complete overview of existing mitigation strategies for making hospitals safer and better prepared to withstand natural disasters shall be developed and made available for authorities, owners, practitioners and researchers.
7. Finally, the methodology for the rapid visual assessment of the susceptibility of functional loss by using an automated tool presented in this study serves as a preliminary diagnosis, even though more specific and detailed seismic risk studies could be performed. Hospital engineering studies aiming at obtaining more detailed results of hospital vulnerability and the mitigation measures may be developed to validate the methodology presented in this document.



## REFERENCIAS

- Achour, N. [2007] “Estimation of Malfunction of a Healthcare Facility in Case of Earthquake”, *PhD Dissertation*, Kanazawa University, Japan.
- Aguiar, R. [2007] “Factor de reducción de las fuerzas sísmicas en edificios de hormigón armado sin muros de corte”, *Monografía CIMNE IS 57*, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, España.
- Aguiar, R. [2016a] “Hospital de Bahía de Caráquez Miguel H. Alcívar, luego del Terremoto del 16 de abril de 2016”, Documento inédito, Quito, Ecuador.
- Aguiar, R. [2016b] “Daños en hospitales durante el sismo 2016”, Archivos personales, Quito, Ecuador.
- Aguiar, R., García, E. y Villamarín, J. [2010] “Leyes de atenuación para sismos corticales y de subducción para el Ecuador”, *Revista Ciencia*, **13**(1):1-18.
- Aguiar, R., Zevallos, M., Palacios, J., García, L., Menéndez, E. [2016] “Reforzamiento de estructuras con disipadores de energía. Terremoto de Ecuador del 16 de abril de 2016”, Instituto Panamericano de Geografía e Historia IPGH, Quito, Ecuador.
- AIA Academy of Architecture for Health and Facilities Guidelines Institute [2001] “Guidelines for design and construction of hospital and health care facilities”, AIA Press, USA.
- Almufti, I., and Willford, M. (2013) “REDiTM rating system: Resilience-based Earthquake Design Initiative for the Next Generation of Buildings”, *Resilience-based Earthquake Design Initiative*, **1**.
- Arango, M. C., Strasser, F. O., Bommer, J. J., Boroschek, R., Comte, D., and Tavera, H. [2011] “A strong-motion database from the Peru–Chile subduction zone”, *Journal of seismology*, **15**(1): 19-41.
- Arias A. [1970] “A Measure of Earthquake Intensity. Seismic Design for Nuclear Power Plants”, MIT Press, 438–443.
- ASCE [2016] “ASCE/SEI 7-16: Minimum Design Loads for Buildings and other Structures”. *American Society of Civil Engineers*, Reston, Virginia, USA.
- ASCE [2017] “ASCE/SEI 41-17: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings”, *American Society of Civil Engineers*, Reston, Virginia, USA.
- ASHRAE [2013] “HVAC Design Manual for Hospitals and Clinics”, *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, **2**, Atlanta, USA.
- ATC [1996a] “ATC-32: Seismic Design Criteria for California Bridges: Provisional Recommendations”, *Applied Technology Council*, Redwood City, CA.

- ATC [1996b] “ATC-40: Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings”, Applied Technology Council, Redwood City, CA.
- ATC [1999] “ATC-1 Design Guide 1. Minimizing Floor Vibration”, Applied Technology Council. Redwood City, CA.
- Balaras, C. A., Dascalaki, E., and Gaglia, A. [2007] “HVAC and indoor thermal conditions in hospital operating rooms”, *Energy and Buildings*, **39**(4): 454-470.
- Bambarén, C., y Alatrística, S. [2008] “Programa médico arquitectónico para el diseño de hospitales seguros”, SINCO, **1**, Lima, Perú.
- Bazán, E., y Meli, R. [2002] “Diseño sísmico de edificios”, Limusa/Noriega Editores, pp. 313.
- Benedetti, D. and Petrini, V. [1984] “Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: Proposta di un metodo di valutazione”, *L'Industria delle costruzioni*, **149**(1): 66-74.
- Benfer, N. A., and Coffman, J. L. (Eds.). [1973] “San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971: Effects on building structures”, US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2 v (Vol. 1, No. 2), Washington, D.C.
- Boroschek, R. [2001] “Efectos de los terremotos del 13 de enero y 13 de febrero y el sistema de salud de El Salvador”, *Efectos de los terremotos del 13 de enero y 13 de febrero y el sistema de salud de El Salvador*, Organización Panamericana de la Salud, Universidad de Chile, Chile.
- Boroschek, R. [2004] “Seismic vulnerability of the healthcare system in El Salvador and recovery after the 2001 earthquakes”, in Rose, W.I., Bommer, J.J., López, D.L., Carr, M.J., and Major, J.J., eds., Natural hazards, El Salvador, Boulder, Colorado, *Geological Society of America Special Paper 375*, pp. 269–279.
- Boroschek, R. L., Contreras, V., Kwak, D. Y., and Stewart, J. P. [2012] “Strong Ground Motion Attributes of the 2010 Mw 8.8 Maule, Chile, Earthquake”, *Earthquake Spectra*, **28**(S1): S19-S38.
- Boroschek, R., and Retamales, R. (2004). Guidelines for vulnerability reduction in the design of new health facilities, Washington, D.C., PAHO/World Bank.
- Bozorgnia, Y., and Bertero, V. V. (Eds.). [2004] “Earthquake Engineering. From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering”, CRC press, Washington, D.C.
- Bray, J., and Frost, D. [2010] “Geo-engineering Reconnaissance of the 2010 Maule, Chile Earthquake”, *Report No. GEER-022 of the NSF Sponsored GEER Association Team*, **1**.
- Cabañas, L., Carreño E., Izquierdo A., Martínez J., Capote R., Martínez-Díaz, J. J., Benito B., Gaspar J., Rivas A., García J., Pérez R., Rodríguez M., and Murphy P. [2011] “Informe del sismo de Lorca del 11 de mayo de 2011” *Instituto Geográfico Nacional*, Madrid, España, pp. 138.
- Cardona, O.D. [1999] "Vulnerabilidad sísmica de hospitales: Fundamentos para ingenieros y arquitectos". Barcelona: Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Ingenieria (CIMNE), ISBN 84-89925-33-X.
- Cardone, D., and Perrone, G. [2015] “Developing fragility curves and loss functions for masonry infill walls”, *Earthquakes and Structures*, **9**(1): 257-279.
- Carpman, J. R., and Grant, M. A. [2016] “Design that cares: Planning Health Facilities for Patients and Visitors”, Jossey-Bass a Willy Brand, 142(3), San Francisco, CA.

- Carreño, L., Lantada, N., Irizarry, J., Valcarcel, J., Barbat, A. and Goula, X. [2012] “Comportamiento Sísmico de los Edificios de Lorca”, *Física de la Tierra*, **24**: 289-314.
- CDT-CH [2011] “Protección Sísmica de Estructuras: Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía”, *Documento Técnico 29*, Corporación de Desarrollo Tecnológico - Cámara Chilena de la Construcción, Santiago de Chile, Chile.
- Çelebi, M. [1997] “Response of Olive View Hospital to Northridge and Whittier Earthquakes”, *Journal of Structural Engineering*, **123**(4): 389-396.
- CEN [2004] “EN-1998-1:2004: Eurocode 8 – Design Provisions for Earthquake Resistant Structures”, *Comité Européen de Normalization*, Brussels, Belgium.
- Charleson, A. [2008] “Seismic Design for Architects. Outwitting the Quake”, Elsevier Ltd., pp. 275.
- Chock, G., I. Robertson, P. Nicholson, H. Brandes, E. Medley, P. Okubo, B. Hirshorn, J. Sumada, T. Kindred, G. Linurna, A. Sarwar, J. Dal Pino and Holmes, W. [2006] “Compilation of Observations of the October 15, 2006, Kiholo Bay (Mw 6.7) and Mahukona (Mw 6.0) Earthquakes, Hawai’I”, *Earthquake Engineering Research Institute*, **31**.
- Chock, G., Robertson, I., Nicholson, P., Brandes, H., Medley, E., Okubo, P. ... and Holmes, W. [2006] “Compilation of Observations of the October 15, 2006 Kiholo Bay (Mw 6.7) and Mahukona (Mw 6.0) Earthquakes, Hawai’I”. *Earthquake Engineering Research Institute*, **31**.
- Chopra, A. K., Bertero, V. V., and Mahin, S. [1973] “Response of the Olive View Medical Center main building during the San Fernando Earthquake”, *Proceedings of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering*, June, pp. 26-35.
- Chopra, N. [2012] “Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering”, Prentice Hall, pp. 944.
- Cimellaro, G. P., Christovasilis, I. P., Reinhorn, A. M., De Stefano, A. and Kirova, T. [2010] “L’Aquila earthquake of April 6th, 2009 in Italy: rebuilding a resilient city to multiple hazard”, *Technical Report MCEER-10-0010*, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, State University of New York, USA.
- CISMID [2007] “Red de Acelerógrafos de CISMID, del Sismo de Pisco 2007”, Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres, National University of Engineering, Faculty Of Civil Engineering, Lima, Perú, Available at <http://www.cismid-uni.org>, Accessed February 18, 2018.
- Comerio, M. C. (Ed.). [2005] “PEER Testbed Study on a Laboratory Building: Exercising Seismic Performance Assessment”, Pacific Earthquake Engineering Research Center”, *PEER Report. PEER 2005/12*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering. University of California, Berkeley.
- Cosenza, E., Di Sarno, L., Maddaloni, G., Magliulo, G., Petrone, C., and Prota, A. [2015] “Shake table test for the seismic fragility evaluation of hospital rooms”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **44**: 23-40.
- Contreras, V., and Boroschek, V. [2019] “Curvas de atenuación espectrales para sismos chilenos”, *Actas de Congreso del XI Congreso Chileno de Sismología en Ingeniería Sísmica, ACHISINA, Chile*. Marzo 18-20, Santiago de Chile, Chile.



- CREAD/UNISDR [2018] “Economic Losses, Poverty and Disasters 1998-2017”, *Technical Report*, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters and United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Belgium and Switzerland.
- CSSC [2001] “Findings and Recommendations on Hospital Seismic Safety, State of California”, *California Seismic Safety Commission*, Sacramento, CA.
- Czajkowski, J.D. [1993] “Evolución de los edificios hospitalarios. Aproximación a una visión tipológica”, Actas del IV Congreso Latinoamericano y 7º Jornadas Interdisciplinarias de la Asociación Argentina de Arquitectura e Ingeniería Hospitalaria, Buenos Aires, Argentina.
- Day, R. W. [2012] “Geotechnical Earthquake Engineering Handbook”, The McGraw-Hill Companies.
- De Angelis, A., and Pecce, M. [2015] “Seismic nonstructural vulnerability assessment in school buildings”, *Natural Hazards*, **79**(2): 1333-1358.
- Department of Health/Estates and Facilities Division [2007a] “Specialised ventilation for healthcare premises, Part A: Design and validation”, *Health Technical Memorandum HTM 03-01*, Quarry Hill, Leeds, UK.
- Department of Health/Estates and Facilities Division [2007b] “Specialised ventilation for healthcare premises. Part B: Operational management”, *Health Technical Memorandum 03-01*, Quarry Hill, Leeds, UK.
- Di Sarno, L., Magliulo, G., D’angela, D., and Cosenza, E. [2018] “Seismic Vulnerability Evaluation of Typical Hospital Cabinets by Shake Table Testing”, *Proceedings of the 16th European Conference on Earthquake Engineering*, June 18-21, Thessaloniki, Greece.
- DICTUC S.A. [2010] “Inspección visual de daños estructurales tras sismo del 27 de febrero de 2010: Hospital Dr. Guillermo Grant Benavente y C.A.A. – Concepción”, *Informe N° 882069*, Ministerio de Salud – Minsal, Subsecretaría de Redes Asistenciales, Santiago, Chile.
- DNISEYM [2013] “GAIH: Guía de acabados interiores para hospitales”. *Dirección Nacional de Infraestructura Sanitaria, Equipamiento y Mantenimiento*, Ministerio de Salud del Ecuador, Quito, Ecuador.
- EERI [2006] “Preliminary observations on the Hawaii Earthquakes of October 15, 2006”, *Earthquake Engineering Research Institute*, Special earthquake report, California.
- EERI [2007] “The Pisco, Peru, Earthquake of August 15, 2007”, *Earthquake Engineering Research Institute*, Special Earthquake Report, California.
- EERI [2011] “The M 6.3 Christchurch, New Zealand, Earthquake of February 22, 2011”, *Special Earthquake Report*, Earthquake Engineering Research Institute.
- Eidinger, J. [2009] “Fragility of Non-structural Components for FEMA Benefit Cost Analysis”, *G&E Engineering Systems Inc.*, Olympic Valley, CA.
- Farmacia Hospitalaria, Fabricantes de Gases Medicinales e Ingeniería Hospitalaria [2018] “Procedimiento de gestión de gases medicinales. Estándares de calidad de gases medicinales en el ámbito hospitalario”, **2**. España.
- FCC Construcción. (Ed.). [2009] “Hospitales 1995-2009”, *Técnicas Constructivas*, **4**:80.

- FEMA [1997] “FEMA 273: NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings”, *Federal Emergency Management Agency*, Washington, DC.
- FEMA [2000] “FEMA 356: Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings”, *Federal Emergency Management Agency*, Washington, DC.
- FEMA [2007] “FEMA 577: Design Guide for Improving Hospital Safety in Earthquakes, Floods, and High Winds: Providing Protection to People and Buildings”, *Federal Emergency Management Agency*, Washington, D.C.
- FEMA [2009] “FEMA P-750: NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures”, *Federal Emergency Management Agency*, Washington, D.C.
- FEMA [2012a] “FEMA E-74: Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage”, *Federal Emergency Management Agency*, Washington, DC.
- FEMA [2012b] “FEMA P-58: Seismic Performance Assessment of Buildings”, *Federal Emergency Management Agency*, Washington, DC.
- FEMA [2012c] “HAZUS-MH 2.1: Multi-hazard Loss Estimation Methodology, Earthquake Model”, *Technical Manual*. Department of Homeland Security, Federal Emergency Management Agency, Mitigation Division, Washington, D.C.
- FEMA [2015] “FEMA 154: Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A handbook”, *Federal Emergency Management Agency*, Washington, DC.
- FEMA [2015] “FEMA 155: Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: Supporting Documentation”, *Federal Emergency Management Agency*, Washington, DC.
- Fernández, M. D. [2006] “Aproximación a la historia de la arquitectura hospitalaria”, *Cuadernos de arte e iconografía*, **15**(29): 5-246.
- Filiatrault, A. and Christopoulos, C. [2002] “Guidelines, Specifications, and Seismic Performance Characterization of Nonstructural Building Components and Equipment”, *PEER Report 2002/05*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering. University of California, Berkeley.
- Filiatrault, A., and Sullivan, T. [2014] “Performance-based seismic design of nonstructural building components: The next frontier of earthquake engineering”. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **13**(1): 17-46.
- Fiorino, L., Bucciero, B., & Landolfo, R. [2019] “Evaluation of seismic dynamic behaviour of drywall partitions, façades and ceilings through shake table testing”, *Engineering Structures*, 180: 103-123.
- Fowler, C.M.R. [1990] “The solid earth. An introduction to global geophysics”, Cambridge University Press, Cambridge, England, pp. 472.
- Furukawa, S., Sato, E., Shi, Y., Becker, T., and Nakashima, M. [2013] “Full-scale shaking table test of a base-isolated medical facility subjected to vertical motions”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **42**(13): 1931-1949.
- GE Healthcare [2019] “Preinstallation Requirements: MR 3.0 T Signa Architect”. *Data Sheet*, Chicago, Illinois.
- Giovinazzi, S. [2005] “The Vulnerability Assessment and the Damage Scenario in Seismic Risk Analysis”, *PhD Dissertation*, Technical University Carolo-Wilhelmina, Braunschweig and University of Florence, Italy.

- GNDT [1993] “Rischio Sismico Di Edifici Pubblici, Parte I: Aspetti Metodologici”, *Pubblicazione del GNDT-CNR Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti*, Roma, Italy.
- Goltz, J. (Ed.). [1994] “The Northridge, California Earthquake of January 17, 1994: General Reconnaissance Report”, *Technical Report NCEER-94-0005*, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, USA.
- Goula, X., Barbat, A., Carreño, M., Lantada, N., Valcarcel, J., Irizarry, J., Figueres, S., Macau, D., Combesure, D., Belvaux, M., Bremond, S., Carames, C., Monfort, D., Verrhiest, G. and Bairrao, R. [2011a] “Spanish-French-Portuguese field investigation of the 11th May Mw5. 1 earthquake in Lorca (Murcia, Spain)”, *M5.1 Lorca Earthquake field investigation*, **1**:1-17.
- Goula, X., Irizarry, J., Figueras, S., Macau, A., Barbat, A., Carreño, L., Lantada, N. and Valcarcel, J. [2011b] “El Terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011: informe de inspección y de los trabajos de campo realizados”, *Monografía Técnica 3*. Instituto Geológico de Cataluña, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Goulet, C. A., Haselton, C. B., Mitrani-Reiser, J., Beck, J. L., Deierlein, G. G., Porter, K. A., and Stewart, J. P. [2007] “Evaluation of the seismic performance of a code-conforming reinforced-concrete frame building—from seismic hazard to collapse safety and economic losses”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **36**(13): 1973-1997.
- GUC [2010] “Terremoto Cauquenes 27 Febrero 2010”, Seismological Service, Department of Geophysics, University of Chile, Santiago, Chile, Accessed November 23, 2017, Available at <http://www.sismologia.cl>, Accessed November 22, 2017.
- Guevara, T. [2009] “Arquitectura moderna en zonas sísmicas”, Gustavo Gili SL, pp. 208.
- Guevara, T. [2012] “Configuraciones Urbanas Contemporáneas en zonas sísmicas”, Editorial Sidetur, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela, Caracas, pp. 374.
- Guevara, T. [2014] “Effects of “Free Plan” Modern Architectural Configuration in Seismic Performance of Hospitals”, *Proceedings of the 23rd Congress of the International Federation of Hospital Engineering (IFHE), 25th Latin American Congress of Architecture and Hospital Engineering*, October 13-16, Buenos Aires, Argentina.
- Günay, S., and Mosalam, K. M. [2013] “PEER Performance-Based Earthquake Engineering Methodology, Revisited”, *Journal of Earthquake Engineering*, **17**(6): 829-858.
- Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Ilhan, O., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D. [2017] “DEEPSOIL 7.0, User Manual”. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Hopkins, D., Benites, R., Burr, J., Hamilton, C., and Kotze, R. [2008] “The Pisco (Peru) Earthquake of 15 August 2007, NZSEE Reconnaissance Report”. *Bull. New Zeal. Soc. Earthq. Eng.*, **41**(3): 109-192.
- IGC [2011] “Estaciones Sísmicas”, Institut Geològic de Catalunya, Barcelona, España, Available at <http://www.ign.es/web/recursos/sismologia/estaciones/estaciones.html>, Accessed November 23, 2017.
- IMSS [2019] “Cuadro Básico Institucional de Equipo Médico”, *Instituto Mexicano de Seguridad Social*, Dirección de Prestaciones Médicas, Coordinación de Unidades de Médicas de Alta Especialidad, México.

- INN [1996] “NCh433Of.96 Mod.2009: Diseño Sísmico de Edificios”, *Instituto Nacional de Normalización*, Santiago de Chile, Chile.
- INN [2003] “NCh2745.Of2003: Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica”, *Instituto Nacional de Normalización*, Santiago de Chile, Chile.
- INN [2011] “NCh433Of.96 Mod.2009/DS.61: Diseño Sísmico de Edificios y Decreto Supremo 61”, *Instituto Nacional de Normalización*, Santiago de Chile, Chile.
- INN [2015] “NCh3357: Diseño sísmico de componentes y sistemas no estructurales”, *Instituto Nacional de Normalización*, Santiago, Chile.
- Jacques, C. C., McIntosh, J., Giovinazzi, S., Kirsch, T. D., Wilson, T., and Mitrani-Reiser, J. [2014] “Resilience of the Canterbury Hospital System to the 2011 Christchurch Earthquake”, *Earthquake Spectra*, **30**(1): 533-554.
- Jankowski, R. [2009] “Non-linear FEM analysis of earthquake-induced pounding between the main building and the stairway tower of the Olive View Hospital”, *Engineering Structures*, **31**(8): 1851-1864.
- JBDPA [2005] “Standard for Seismic Evaluation of Existing Reinforced Concrete Buildings”, *Japan Building Disaster Prevention Association*, Tokyo, Japan.
- JG Ingenieros [2001] “Manual de predimensionado: Las instalaciones a palmas”, *Monografías de la Edificación*, **5**, Barcelona, España.
- JG Ingenieros [2010] “Criterios de instalaciones: Unidades asistenciales hospitalarias”, *Monografías de la Edificación*, **4**, Barcelona, España.
- Johnston, R. G. and Strand, D. R. [1973]. Olive View Hospital (24, 25, 26). In L. M. Murphy. (Coord.), *San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971*, National Oceanic and Atmospheric Administration, and the Earthquake Engineering Research Institute, Washington D.C., pp. 255-292.
- Juarez, H., and Ventura, C. E. [2008] “Seismic Performance of Operational and Functional Components (OFCS): Field Observation and Shake Table Testing”, *Proceedings of the 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, October 12-17, Beijing, China.
- Kaynia, A. M. (Ed.). [2013] “D8. 10-Guidelines for deriving seismic fragility functions of elements at risk: Buildings, lifelines, transportation networks and critical facilities”, *Publications Office of the European Union*, Luxembourg.
- Kramer, S. [1996] “Geotechnical Earthquake Engineering”, Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics, University of Washington, Upper Saddle River, NJ, pp. 643.
- Krawinkler, H. (Ed.). [2005] “Van Nuys Hotel Building Testbed Report: Exercising Seismic Performance Assessment”, *PEER Report. PEER 2005/11*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering. University of California, Berkeley.
- Kumar, K., [2008] “Basic Geotechnical Earthquake Engineering”, New Age International (P) Ltd., Publishers, New Delhi, India, pp. 137.
- Lai, C. G., Bozzoni, F., Mangriotis, M. D., Martinelli, M., Scandella, L., and Dacarro, F. [2012] “Geotechnical aspects of May 20, 2012 M5. 9 Emilia Earthquake, Italy”, *European Centre for Training and Research in Earthquake Engineering*, Pavia, Italy.

- Lang, DH, Verbicaro, M. I., Singh, Y., Prasad, J. S. R., Wong Diaz, D., and Gutiérrez, M. [2010] “Structural and Nonstructural Seismic Vulnerability Assessment for Schools and Hospitals Based on Questionnaire Surveys: Case Studies in Central America and India”, *Proceedings of the 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, July 25-29, Toronto, Canadá.
- Lang, DH, Verbicaro, MI, and Singh, Y. [2009] “Seismic Vulnerability Assessment of Hospitals and Schools based on Questionnaire Survey”, *User Manual*, Kjeller, Norway.
- Lang, DH, Verbicaro, MI, and Singh, Y. [2009] “Seismic Vulnerability Assessment of Hospitals and Schools based on Questionnaire Survey”, *User Manual, NORSAR, Proyecto RESIS II*, Kjeller, Norway.
- Lanning, F., Haro, A.G., Liu, M., Monzón, A., Monzón-Despang, H., Schultz, A. and Tola, A. [2016] “M7.8 Muisne, Ecuador Earthquake on April 16, 2016. Earthquake Reconnaissance Team Report”, *Technical Report EERI Learning from Earthquakes program*, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California.
- Lee, G., and Loh, C. (Eds.). [2000] “The Chi-Chi, Taiwan, and Earthquake of September 21, 1999: Reconnaissance Report”, *Technical Report MCEER-00-0003*, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
- Loaiza, M. [2007] “Sala de situación de salud post sismo Pisco”, *Oficina de Brotes, Desastres y Emergencias Sanitarias, Dirección General de Epidemiología. Ministerio de Salud, Lima, Perú.*
- López, M. [2011] “Hospitales eficientes: una revisión del consumo energético óptimo”, *Tesis Doctoral*, Universidad de Salamanca, España.
- Magliulo, G., Pentangelo, V., Maddaloni, G., Capozzi, V., Petrone, C., Lopez, P., Talamonti, R. and Manfredi, G. [2012] “Shake Table Tests for Seismic Assessment of Suspended Continuous Ceilings”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **10**: 1819-1832.
- Magliulo, G., Petrone, C., Capozzi, V., Maddaloni, G., Lopez, P. and Manfredi, G. [2014], “Seismic Performance Evaluation of Plasterboard Partitions via Shake Table Tests”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **12**: 1657-1677.
- Mahin, S. A., Bertero, V. V., Chopra, A. K., and Collins, R. G. [1976] “Response of the Olive View Medical Center main building during the San Fernando earthquake” *Rep. No. EERC 76-22*, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.
- Mahrenholtz, P., Hutchinson, TC and Eligehausen, R. [2014] “Shake Table Tests on Suspended Nonstructural Components Anchored in Cyclically Cracked Concrete”, *Journal of Structural Engineering*, **140**(11): 1-11.
- Masi, A., Santarsiero, G., Gallipoli, M. R., Mucciarelli, M., Manfredi, V., Dusi, A. and Stabile, T. A. [2013] “Performance of the health facilities during the 2012 Emilia (Italy) earthquake and analysis of the Mirandola Hospital case study”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **12**(5): 2419-2443.
- Milutinovic, Z. V., and Trendafiloski, G. S. [2003]. “RISK-UE An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns”. *Contract: EVK4-CT-2000-00014, WP4: Vulnerability of Current Buildings*, European Commission.

- Ministerio de Sanidad y Política Social [2009] “Bloque quirúrgico: Estándares y recomendaciones”, *Informes, Estudios e Investigación*, Madrid, España.
- Minsal [2010] “Reconstrucción Red Hospitalaria”, *Ministerio de Salud de Chile*, Santiago, Chile.
- Miranda, E., and Reyes, C. J. [2002] “Approximate lateral drift demands in multistory buildings with nonuniform stiffness”, *Journal of Structural Engineering*, **128**(7): 840-849.
- Miranda, E. and Aslani, H. [2003] “Probabilistic Response Assessment for Building-Specific Loss Estimation”, *PEER Report 2003/03*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering. University of California, Berkeley.
- Moehle, J. and Deierlein, G. [2004] “A Framework Methodology for Performance-Based Earthquake Engineering”, *Proceedings of the 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, August 1-6, Vancouver, BC, Canada.
- Moehle, J.P. [2003] “A Framework for Performance-Based Earthquake Engineering”, *Proceedings of the ATC-15-9 Workshop on the Improvement of Building Structural Design and Construction Practices*, June 30 – July 2, Makena, Maui, Hawaii.
- Morales, E. [2017] “Sustainable and Low Cost Room Seismic Isolation for Essential Care Units in Developing Countries”, *PhD Dissertation*, State University of New York, Buffalo.
- MSP [2014] “Acuerdo Ministerial N° 5212: Tipología sustitutiva para homologar los establecimientos de salud por niveles de atención y servicios de apoyo del Sistema Nacional de Salud”, *Ministerio de Salud Pública*, Quito, Ecuador.
- MSP [2019] “Fichas Técnicas 2019 – Dirección Nacional de Equipamiento Sanitario”, *Ministerio de Salud Pública*, Quito, Ecuador, Disponible en <https://www.salud.gob.ec/fichas-tecnicas-2019-direccion-nacional-de-equipamiento-sanitario/>, Consultado el 27 de mayo de 2019.
- MSSSI [2007] “Clasificación de los hospitales por conglomerados”, *Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad*, Departamento de Métodos Cuantitativos en Economía y gestión de la Universidad de las Palmas, España.
- MSSSI [2016] “Informe de Atención Ambulatoria Especializada - CMBD – AAE. Resumen y principales cifras 2014”, *Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad*, Madrid, España.
- NEC-15 [2015] “NEC-SE-DS: “Norma Ecuatoriana de la Construcción. Peligro sísmico, diseño sismo resistente”, Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda MIDUVI, Quito, Ecuador.
- NCSE-02. [2002] “Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación”. *Ministerio de Fomento*, Madrid, España.
- NHS Estates [2005] “Laboratory Fitting Out System”, *HTM Building Components Series*, The Stationery Office, Harrogate, UK.
- Nikfar, F. [2016] “Study of the Seismic Response of Unanchored Equipment and Contents in Fixed-Base and Base-Isolated Buildings”, *PhD Dissertation*, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada.
- Nikfar, F., and Konstantinidis, D. [2016] “Shake table investigation on the seismic performance of hospital equipment supported on wheels/casters”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **46**(2): 243-266.

- Nikolaou, S., Vera-Grunauer, X., Gilsanz, R. (Eds.). [2016] “GEER-ATC Earthquake Reconnaissance: April 16, 2016, Muisne, Ecuador”, *Geotechnical Extreme Events Reconnaissance Association*, Rep. GEER-049, 1.
- NIST [2010] “Evaluation of the FEMA P-695 Methodology for Quantification of Building Seismic Performance Factors”, GCR 10-917-8. *National Institute of Standards and Technology*. Gaithersburg, MD.
- NTC-17 [2017] “NTC-17: Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal”, Administración Pública de la Ciudad de México, Ciudad de México, México.
- NTC [2018] “Norme Tecnica per le Costruzioni”, *Decree of the Minister of the Infrastructures and Transport*, Roma, Italia (en italiano).
- OMS [1957] “Función de los hospitales en los programas de protección de la salud”, Organización Mundial de la Salud, *Serie de Informes Técnicos*, 122, Ginebra, Suiza.
- OMS [2002] “La cadena de frío de la sangre: guía para la selección y adquisición de equipos y accesorios”, *Organización Mundial de la Salud*, Ginebra, Suiza.
- OPS [2001] “Serie crónicas de desastres: Terremotos en El Salvador 2001”, *Organización Panamericana de la Salud*, Washington, DC.
- OPS [2010] “Terremoto de Pisco, Perú: a dos años del sismo, crónica y lecciones aprendidas en el sector salud”, *Organización Panamericana de la Salud*, Área de Preparativos para Situaciones de Emergencia y Socorro en Casos de Desastre, Washington D.C.
- PAHO [2000] “Principles of Disaster Mitigation in Health Facilities”, *Pan American Health Organization*, Washington, D.C., USA.
- PAHO [2000a] “Principles of Disaster Mitigation in Health Facilities”, *Pan American Health Organization*, Washington, D.C.
- PAHO [2000b] “Disaster Mitigation for Health Facilities: Guidelines for Vulnerability Appraisal and Reduction in the Caribbean”, *Pan American Health Organization*, Bridgetown, Barbados.
- PAHO [2018] “Hospitals Don’t Burn! Hospital Fire Prevention and Evacuation Guide”, *Pan American Health Organization*, Washington, D.C.
- PAHO/WHO [2008] “Hospital Safety Index: Guide for Evaluators”, *Pan-American Health Organization and World Health Organization*, Washington, DC.
- Papadopoulou, O. [1989] “The effect of vertical excitation of reinforced concrete multi-storey structures”, *MSc. Dissertation*. Imperial College, London.
- Parra, P. F., Arteta, C. A., and Moehle, J. P. [2019] “Modeling criteria of older non-ductile concrete frame-wall buildings”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **17**(12): 6591-6620.
- PEER [2017] “PEER Ground Motion Database: NGA-West2”, *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, University of California, Berkeley, CA, Available at <https://ngawest2.berkeley.edu>, Accessed November 20, 2017.
- Perrone, D., Aiello, M. A., Pecce, M., and Rossi, F. [2015] “Rapid visual screening for seismic evaluation of RC hospital buildings”, *Structures*, **3**: 57-70.
- Petrone, C., Magliulo, G., and Manfredi, G. [2014] “Shake table tests for the seismic assessment of Hhollow brick internal partitions”, *Engineering Structures*, **72**: 203-214.

- Philips [2017] “Ingenia 3.0 Standard Spanish”, *Data Sheet*, Amsterdam, Netherlands.
- Pickett, M. A. [2003] “Hospital lifeline response to the 1999 Izmit Turkey Earthquake”, *Advancing mitigation technologies and disaster response for lifeline systems*, pp. 224-230.
- Porter, K., Kennedy, R., and Bachman, R. [2006] “Developing fragility functions for building components for ATC-58”, *Report to ATC-58*, Applied Technology Council, Redwood City, CA.
- Porter, K.A. [2003] “An overview of PEER’s Performance-Based Earthquake Engineering Methodology”, *Proceedings of the Ninth International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP9)*, July 6-9, San Francisco, CA.
- Price, H. J., De Sortis, A. and Schotanus, M. [2012] “Performance of the San Salvatore regional hospital in the 2009 L’Aquila Earthquake”, *Earthquake Spectra*, **28**(1): 239-256.
- Priestley, M.J.N., Calvi, G.M., and Kowalsky, M.J. [2007] “Displacement-Based Seismic Design of Structures”, IUSS Press, Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia, Pavia, Italy.
- RAII-UNAM [2017] “Base de datos de registros acelerográficos”, *Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería de la UNAM*, México, Available at <http://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM>., Accessed April 15, 2018.
- Rainer, J.H., Allen, D.E., and Jablonski, A.M. [1993] “Manual for Screening of Buildings for Seismic Investigation”, *Institute for Research in Construction, National Research Council Canada*, Ottawa, Ontario.
- RAN [2012] “Registrazioni della RAN”, *Italian Strong Motion Network*, Available at <http://ran.protezionecivile.it>., Accessed April 15, 2018.
- Reitherman, B., Sabol, T., Bachman, R., Bellet, D., Bogen, R., Cheu, D., Coleman, P., Denney, J., Durkin, M., Fitch, C., Fleming, R., Gates, W., Goodno, B., Halling, M., and Hess, R. [1995] “Nonstructural damage”, *Earthquake Spectra*, **11**(S2): 453-514.
- RENAC [2016] “Acelerogramas del terremoto del 16 de abril de 2016” *Red Nacional de Acelerógrafos del Instituto Geofísico*, Universidad Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- RENADIC [2010] “National Accelerograph Network at the Department of Civil Engineering”, University of Chile, Santiago, Chile, Available from [www.renadic.cl](http://www.renadic.cl), Accessed November 20, 2017.
- Retamales, R., and Boroschek, R. [2014] “State-of-the-Art of Seismic Isolation and Energy Dissipation Applications in Chile”, *MENSHIN Journal of the Japan Society of Seismic Isolation*, **84**(5): 49-62.
- Retamales, R., Mosqueda, G., Filiatrault, A., and Reinhorn, A. M. [2008] “New Experimental Capabilities and Loading Protocols for Seismic Qualification and Fragility Assessment of Nonstructural Systems”, *Technical Report MCEER-08-0026*, University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, NY.
- Retamales, R., Davies, R., Mosqueda, G., and Filiatrault, A. [2013] “Experimental seismic fragility of cold-formed steel framed gypsum partition walls”, *Journal of Structural Engineering*, **139**(8): 1285-1293.
- RMS [2006] “Kiholo Bay, Hawaii Earthquake”, *Risk Management Solutions*, RMS Event Report, Newark, California.



- Rodríguez, F. [2019] “Nueva UCI Hepática del Hospital Clínic de Barcelona”, *Conferencia de Ingeniería Biomédica*, mayo 15, Barcelona, España.
- ROMACO [2017] “Reporte de Inspección Visual Post-sísmica de las condiciones físicas del inmueble denominado Hospital de Gino-Obstetricia en el Centro Médico Nacional La Raza”, *Construcciones, Mantenimiento y Proyectos ROMACO S.A. de C.V.*, Ciudad de México, México.
- Rossetto, T., Peiris N., Alarcon, J. E., So E., Sargeant, S., Free, M., Sword-Daniels, V., Del Re, D., Libberton C., Verrucci, E., Sammonds, P. and Faure, J. [2011] “Field observations from the Aquila, Italy earthquake of April 6, 2009”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **9**(1): 11-37.
- Rossetto, T., Peiris, N., Alarcon, J., So, E., Sargeant, S., Sword-Daniels, V., Libberton, C., Verrucci, E., Del Re, D. and Free, M. [2009] “The l’Aquila, Italy Earthquake of 6 April 2009”, Preliminary Field Report by Earthquake Engineering Field Investigation Team EEFIT, pp. 54.
- Rousseau, C., and Bare, A. [2007] “Designing Hospital Pharmacy HVAC Systems”, *ASHRAE Journal*, **49**(2), 36.
- Ruiz-García, J., and Negrete, M. [2009] “Drift-based fragility assessment of confined masonry walls in seismic zones”, *Engineering Structures*, **31**(1): 170-181.
- Sacyl [2010] “Guía de Suministro de Hospitales: Esquemas de suministro y sistemas de distribución en centros hospitalarios”, *Sanidad de Castilla y León*, Proyecto Detelsa, **3**, Valladolid, España.
- Sánchez, P., Ortiz, J., Somoza, E., Bernal, J. L., and Paniagua, J. L. [2011] “Unidad central de esterilización: estándares y recomendaciones”, *Informes, estudios e investigación*, Ministerio de Sanidad, Política Social e Igualdad, Madrid, España.
- Santos, J. J. [2003] “Verticalidad versus horizontalidad. Historia de la construcción de hospitales en el siglo XX”, *Informes de la Construcción*, **55**(485): 13-25.
- SB 1953 [1994] “Seismic Evaluation Procedures for Hospital Buildings: Senate Bill 1953”, *Office of Statewide Health Planning and Development (OSHPD)*, California.
- SEAOC [1995] “Vision 2000, Conceptual Framework for Performance-Based Seismic Design”, *Recommended Lateral Force Requirements and Commentary*, Structural Engineers Association of California, **6**: 391-416, Sacramento, CA.
- SeismoSoft [2016] “SeismoSignal: Earthquake Software for Signal Processing of Strong-Motion data”, *Earthquake Engineering Software Solutions*, Available at [www.seismosoft.com](http://www.seismosoft.com).
- Servicio de salud Arauco [2010] “Levantamiento de daños módulos 1A y 1B, y cubicación recimentación módulo 1C - Hospital Dr. Rafael Avaria Valenzuela - Curanilahue”, *Informe N° 58-394-10-A*, pp. 11.
- Servicio de salud Arauco [2010a] “Estudio estructural Hospital Dr. Rafael Avaria Valenzuela – Curanilahue. Post Sismo del 27 de febrero de 2010”, *Informe N° 58-394-10*, pp. 34.
- Servicio de salud Arauco [2011a] “Levantamiento de daños módulos 1A y 1B, y cubicación recimentación módulo 1C - Hospital Dr. Rafael Avaria Valenzuela - Curanilahue”, *Informe N° 58-394-10-A*, pp. 11.
- Servicio de salud Arauco [2011b] “Recimentación Hospital de Curanilahue: Estudio geotécnico - estructural”, *Informe N° 645.433 – A*, pp. 42.

- Shakal, A. F., Huang M. J., Darragh, R. B., Brady, A. G., Trifunac, M. D., Lindvall, C. E., Wald, D. J., Heaton, T. H., Mori, J. J. [1995] “Recorded Ground and Structure Motions”, *Earthquake Spectra*, **11**(S2): 13-96.
- Shi, Y., Kurata, M., and Nakashima, M. [2014] “Disorder and damage of base-isolated medical facilities when subjected to near-fault and long-period ground motions”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **43**(11): 1683-1701.
- Siemens [2019] “Medical Solutions: Artis zee--Floor-mounted system”, *Data Sheet*, Siemens Planning Department, Berlin and Munich, Germany.
- SOLEICO S.A. [2016] “Evaluación estructural de la estructura del Hospital Miguel Hilario Alcívar de la ciudad Bahía de Caráquez del cantón Sucre, luego del terremoto de 7.8 en la escala Richter del 16 de abril del 2016”, *Informe técnico*, Portoviejo, Ecuador.
- Soong, T. T., Yao, G. C., and Lin C. C. [2000a] “Damage to critical facilities: Following the 9 21 Chi-Chi, Taiwan Earthquake. Research Progress and Accomplishments”, *MCEER/NCREE Reconnaissance Report*, Report Number 2. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
- Soong, T. T., Yao, G. C., and Lin C. C. [2000b] “Research Progress and Accomplishments 1999 – 2000”, *Report MCEER-00-SP01*, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York, University at Buffalo. State University of New York, USA.
- Soong, T. T. [1995] “Seismic Behavior of Nonstructural Elements-State-of-the-Art-Report”, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering*, August 28 – September 2, 1994, Vienna, Austria.
- Soroushian, S., Zaghi, A. E., Maragakis, M., Echevarria, A., Tian, Y., and Filiatrault, A. [2015] “Analytical seismic fragility analyses of fire sprinkler piping systems with threaded joints”, *Earthquake Spectra*, **31**(2): 1125-1155.
- Stewart, J. P., Bray, J. D., Seed, R. B., Sitar, N. (Eds.). [1994] “Preliminary Report on the Principal Geotechnical Aspects of the January 17, 1994 Northridge Earthquake”, *Technical Report UCB/EERC-94/08*, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, California.
- SYNER-G [2013] “Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructures Safety Gain”, European collaborative research project funded by European Commission,
- Taghavi, S. and E. Miranda [2003] “Response Assessment of Nonstructural Building Elements, Pacific Earthquake Engineering Research Center”, *PEER Report 2003/05*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering. University of California, Berkeley.
- Tang, A. K. (Ed.). [2000] “Izmit (Kocaeli), Turkey, Earthquake of August 17, 1999. Including Duzce Earthquake of November 12, 1999: Lifeline Performance”, ASCE Publications, **17**, Reston, Virginia.
- Tola, A. and Tech, V. [2016] “April 16, 2016 Ecuador Earthquake. Performance of Hospitals”, *Technical Report EERI LFE Briefing for the April 16, 2016 Ecuador Earthquake*, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California.
- Trifunac M.D., Brady A.G. [1975] “A study on the duration of strong earthquake ground motion”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **65**(3):581–626.

- UCA [2001] “Red acelerométrica 2001”, Información brindada por el Departamento de Mecánica Estructural de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas UCA, El Salvador, Centro América, Accessed June 5, 2019.
- Unicef [2004] “Equipment & Renewable Resources”, Planning Guide: For primary health care centres and first referral level hospitals, United Nations Children's Fund.
- UNISDR y OMS [2009] “Hospitales Seguros frente a los Desastres”, *Estrategia Internacional de las Naciones Unidas para la Reducción de Desastres (UNISDR) y la Organización Mundial de la Salud (OMS)*, Campaña Mundial para la Reducción de Desastres 2008-2009.
- USGS [2017] “United States Geological Survey”, Reston, Virginia. Available at <https://earthquake.usgs.gov>, Accessed December 10, 2017.
- Valcárcel, J. [2013] “Análisis y gestión del riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales”, Anexo A: Formularios para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de centros educativos. *Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- VDC [2006] “Strong-motion Virtual Data Center”, *Portal to Worldwide Strong Ground Motion Data*, University of California Santa Barbara, CA, Available at <https://strongmotioncenter.org/vdc>, Accessed February 10, 2019.
- Villouta, J. [2010] “Ficha de evaluación técnica daños edificio por terremoto: La Torre HGGB”, *Informe técnico*, Servicio de Salud Concepción, Concepción, Chile.
- WHO [2002] “A Structural Vulnerability Assessment of Hospitals in Kathmandu Valley”, *World Health Organization*, Kathmandu, Nepal.
- WHO [2007] “Seismic Vulnerability Assessment of a Key Health Facility in The former Yugoslav Republic of Macedonia - A handbook”, *World Health Organization*, Copenhagen.
- WHO/PHO [2015] “Hospital safety index: Guide for evaluators” *World Health Organization and Pan American Health Organization*, 2.
- Wong, I. G., Silva, W. J., Darragh, R., Gregor, N., and Dober, M. [2015] “A ground motion prediction model for deep earthquakes beneath the island of Hawaii”, *Earthquake Spectra*, **31**(3): 1763-1788.
- Yépez, F. [1996] “Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras aplicando técnicas de simulación”, *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

## CRÉDITOS DE FOTOS

Se excluyen las figuras de elaboración propia.

| Figura            | Referencia   |
|-------------------|--|
| <b>Portada</b>    |  |
|                   | Fotografía editada a partir de la fotografía cortesía de Roberto Aguiar, Profesor Investigador del Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción. Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, Quito, Ecuador, Consultado el 10 de junio de 2020.  |
| <b>Capítulo 2</b> |  |
| Figura 2-1        | Fotografía cortesía de GJ Ingenieros [2017], Barcelona, España, Consultado el 18 de septiembre de 2018.  |
| Figura 2-2        | Fotografía de la autora [2018]. Hospital en Barcelona, Consultado el 06 de septiembre de 2018.   |
| Figura 2-3        |  |
| Figura 2-4        | Fotografía tomada de <a href="http://requerimientoscpd.blogspot.com/2014/10/requerimientos-para-el-desarrollo-de-un.html">http://requerimientoscpd.blogspot.com/2014/10/requerimientos-para-el-desarrollo-de-un.html</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.  |
| Figura 2-6        | a) Fotografía tomada de <a href="https://dvsat.es/soluciones-llave-en-mano/climatizacion-industrial/">https://dvsat.es/soluciones-llave-en-mano/climatizacion-industrial/</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.<br>b) Fotografía tomada de <a href="http://www.elobservatodo.cl/noticia/gobierno-regional/reponen-calderas-del-hospital-de-la-serena">http://www.elobservatodo.cl/noticia/gobierno-regional/reponen-calderas-del-hospital-de-la-serena</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017. |
| Figura 2-7        | a) Archivos personales de la autora.<br>b) Fotografía de la autora [2018]. Hospital en Barcelona, Consultado el 06 de septiembre de 2018.<br>c) Fotografía tomada de <a href="http://www.airzone.es/blog/climatizacion/que-son-los-sistemas-vrv-de-climatizacion/">http://www.airzone.es/blog/climatizacion/que-son-los-sistemas-vrv-de-climatizacion/</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.  |
| Figura 2-8        | a) Fotografía tomada de <a href="http://www.interempresas.net/Climatizacion/FeriaVirtual/Producto-Unidad-climatizadora-de-aire-Carrier-Airostar-59247.html">http://www.interempresas.net/Climatizacion/FeriaVirtual/Producto-Unidad-climatizadora-de-aire-Carrier-Airostar-59247.html</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.   |

| Figura      | Referencia  |
|-------------|---|
|             | b) Fotografía tomada de <a href="https://nergiza.com/que-es-un-fan-coil-y-cual-es-el-error-mas-comun-a-la-hora-de-seleccionarlos">https://nergiza.com/que-es-un-fan-coil-y-cual-es-el-error-mas-comun-a-la-hora-de-seleccionarlos</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.  |
|             | c) Fotografía tomada de <a href="http://siigasoluciones.com/115-unidades-interiores-vrv">http://siigasoluciones.com/115-unidades-interiores-vrv</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.  |
| Figura 2-9  | Fotografía tomada de <a href="http://ingenieromanitas.blogspot.com/2016/06/climatizacion-en-quiroyano.html">http://ingenieromanitas.blogspot.com/2016/06/climatizacion-en-quiroyano.html</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.   |
| Figura 2-10 | Fotografía tomada de <a href="https://www.lamilagrosa.com/pruebas-y-servicios/unidad-de-cuidados-intensivos/">https://www.lamilagrosa.com/pruebas-y-servicios/unidad-de-cuidados-intensivos/</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.   |
| Figura 2-11 | Fotografía tomada de <a href="https://www.nisainforma.es/la-unidad-de-neonatalogia-del-hospital-nisa-saca-adelante-un-bebe-de-660-gramos-sin-secuelas/">https://www.nisainforma.es/la-unidad-de-neonatalogia-del-hospital-nisa-saca-adelante-un-bebe-de-660-gramos-sin-secuelas/</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.   |
| Figura 2-12 | Fotografía tomada de <a href="https://www.amparoamoroso.com/hospitalizacion/">https://www.amparoamoroso.com/hospitalizacion/</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.   |
| Figura 2-13 | Fotografía tomada de <a href="https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/758215/consultorio-medico-sendagrup-pauzarq-arquitectos/54781001e58ece98580000d5">https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/758215/consultorio-medico-sendagrup-pauzarq-arquitectos/54781001e58ece98580000d5</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.   |
| Figura 2-14 | Fotografía tomada de <a href="http://www.saludcomfamiliar.com/medicina/58-unidad-de-urgencias.html">http://www.saludcomfamiliar.com/medicina/58-unidad-de-urgencias.html</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.   |
| Figura 2-15 | Fotografía tomada de <a href="https://lalunadealcala.com/el-principe-de-asturias-estrena-el-nuevo-hospital-de-dia/">https://lalunadealcala.com/el-principe-de-asturias-estrena-el-nuevo-hospital-de-dia/</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.   |
| Figura 2-16 | Fotografía tomada de <a href="http://serom.cat/es/p/sanitari/hospital-clinic-quiroyfans-11-48">http://serom.cat/es/p/sanitari/hospital-clinic-quiroyfans-11-48</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.   |
| Figura 2-17 | Fotografía tomada de <a href="http://www.asse.com.uy/contenido/El-Hospital-Maciell-inauguro-Salas-de-Alta-Dependencia-de-Enfermeria-7277">http://www.asse.com.uy/contenido/El-Hospital-Maciell-inauguro-Salas-de-Alta-Dependencia-de-Enfermeria-7277</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.   |
| Figura 2-18 | Fotografía tomada de <a href="https://www.corachan.com/es/salas-de-parto_27707">https://www.corachan.com/es/salas-de-parto_27707</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.   |
| Figura 2-19 | Fotografía tomada de <a href="https://www.consumer.es/salud/problemas-de-salud/nuevas-tecnologias-dialisis-mejoran-vida-30000-espanoles.html">https://www.consumer.es/salud/problemas-de-salud/nuevas-tecnologias-dialisis-mejoran-vida-30000-espanoles.html</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.   |
| Figura 2-20 | a) Fotografía tomada de <a href="http://www.njmirt.com/index">http://www.njmirt.com/index</a> , Consultado el 16 de diciembre de 2017.  |
|             | b) Fotografía tomada de <a href="http://bestcontact.com.my/v2/product/view/103">http://bestcontact.com.my/v2/product/view/103</a> , Consultado el 16 de diciembre de 2017.  |
|             | c) Fotografía tomada de <a href="https://clinicadental-barcelona-balmes.sanitas.es/">https://clinicadental-barcelona-balmes.sanitas.es/</a> , Consultado el 18 de enero de 2019.<br>Fotografía tomada de <a href="http://laselectromedicina.com/ginecologia-y-obstetricia/43-unidad-principal-ecografo-doppler-color.html/">http://laselectromedicina.com/ginecologia-y-obstetricia/43-unidad-principal-ecografo-doppler-color.html/</a> , Consultado el 16 de diciembre de 2017. |

| Figura      | Referencia  |
|-------------|---|
| Figura 2-21 | Fotografía tomada de <a href="http://www.medicalexpo.es/prod/np-jsc-amico/product-70632-513644.html">http://www.medicalexpo.es/prod/np-jsc-amico/product-70632-513644.html</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.   |
| Figura 2-22 | Fotografía tomada de <a href="http://www.tecnopl.com/sistema-rayos-x-robotizado/">http://www.tecnopl.com/sistema-rayos-x-robotizado/</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.   |
| Figura 2-23 | Fotografía tomada de <a href="https://www.webconsultas.com/pruebas-medicas/preparacion-para-la-resonancia-magnetica-nuclear-8491">https://www.webconsultas.com/pruebas-medicas/preparacion-para-la-resonancia-magnetica-nuclear-8491</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.   |
| Figura 2-24 | Fotografía tomada de <a href="https://www.clinicarotger.com/es/institut-de-medicina-nuclear.html">https://www.clinicarotger.com/es/institut-de-medicina-nuclear.html</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.   |
| Figura 2-25 | Fotografía tomada de <a href="http://concuoredimadre.blogspot.com/2014/04/buenos-aires-inauguracion-de-la-nueva.html">http://concuoredimadre.blogspot.com/2014/04/buenos-aires-inauguracion-de-la-nueva.html</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.   |
| Figura 2-26 | Fotografía tomada de <a href="https://www.radioterapiamaterdei.com.br/tecnologia/sala-da-radioterapia-bunker/">https://www.radioterapiamaterdei.com.br/tecnologia/sala-da-radioterapia-bunker/</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.   |
| Figura 2-27 | Fotografía tomada de <a href="http://www.totsancugat.cat/actualitat/economia/economia-empresa/echevarne-invertira-deu-milions-d-euros-a-sant-cugat-per-construir-la_160484102.html/">http://www.totsancugat.cat/actualitat/economia/economia-empresa/echevarne-invertira-deu-milions-d-euros-a-sant-cugat-per-construir-la_160484102.html/</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.   |
| Figura 2-28 | Fotografía tomada de <a href="http://isanidad.com/111335/la-mitad-de-los-profesionales-asegura-que-el-servicio-de-farmacia-de-su-hospital-no-es-suficientemente-innovador/">http://isanidad.com/111335/la-mitad-de-los-profesionales-asegura-que-el-servicio-de-farmacia-de-su-hospital-no-es-suficientemente-innovador/</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.                     |
| Figura 2-29 | Fotografía tomada de [Sánchez et al., 2011].  |
| Figura 2-30 | Fotografía tomada de <a href="http://www.gobiernodecanarias.org/noticias/s/Hospitales/99195/hospital-insular-gran-canaria-advierte-aumento-lesiones-medulares-mayores-60-anos-caidas">http://www.gobiernodecanarias.org/noticias/s/Hospitales/99195/hospital-insular-gran-canaria-advierte-aumento-lesiones-medulares-mayores-60-anos-caidas</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017. |
| Figura 2-31 | Fotografía tomada de <a href="https://www.vistazo.com/seccion/pais/cara-cara-con-la-muerte">https://www.vistazo.com/seccion/pais/cara-cara-con-la-muerte</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017.   |
| Figura 2-32 | Fotografía tomada de <a href="https://www.restauracioncolectiva.com/n/la-cocina-en-linea-fria-del-sant-pau-un-referente-en-restauracion-hospitalaria">https://www.restauracioncolectiva.com/n/la-cocina-en-linea-fria-del-sant-pau-un-referente-en-restauracion-hospitalaria</a> , Consultado el 16 de diciembre de 2017.   |
| Figura 2-33 | Fotografía tomada de <a href="http://www.industrialwash.com.pe/blog/motivos-solicitar-servicio-lavanderia-hospitalaria/">http://www.industrialwash.com.pe/blog/motivos-solicitar-servicio-lavanderia-hospitalaria/</a> , Consultado el 16 de diciembre de 2017.   |
| Figura 2-34 | Fotografía de la autora [2018]. Hospital en Barcelona, Consultado el 06 de septiembre de 2018.  |
| Figura 2-35 |   |
| Figura 2-36 |   |

#### Capítulo 4

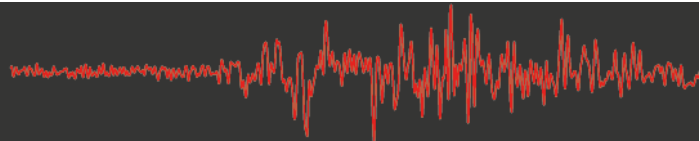
|             |   |
|-------------|---|
| Figura 4-1  | Fotografías tomadas de [Guevara, 2014].         |
| Figura 4-3  | Fotografías tomadas de Google Earth Pro [2018]. |
| Figura 4-8  |   |
| Figura 4-13 |   |

| Figura      | Referencia  |
|-------------|---|
| Figura 4-18 |   |
| Figura 4-23 |   |
| Figura 4-28 |   |
| Figura 4-33 |   |
| Figura 4-38 |   |
| Figura 4-43 |   |
| Figura 4-48 |   |
| Figura 4-53 |   |
| Figura 4-58 |   |
| Figura 4-63 |   |
| Figura 4-68 |   |
| Figura 4-73 |   |
| Figura 4-78 |   |
| Figura 4-83 |   |
| Figura 4-5  | a) Fotografía tomada de [USGS, 2017].   |
|             | b) Fotografía tomada de [Jankowski, 2009].  |
| Figura 4-6  | a) Fotografía tomada de [Mahin et al., 1976].   |
| Figura 4-7  | a) Fotografía tomada de Google Earth Pro [2017].  |
|             | b, c) Fotografía tomada de <a href="https://www.google.es/maps/place/Olive+View-UCLA+Medical+Center">https://www.google.es/maps/place/Olive+View-UCLA+Medical+Center</a> , Consultado el 15 de diciembre de 2017. |
| Figura 4-10 | Fotografía tomada de [Goltz, 1994]  |
| Figura 4-11 | Fotografías tomadas de [FEMA, 2007]   |
| Figura 4-12 |   |
| Figura 4-15 | Fotografías tomadas de [Tang, 2000]   |
| Figura 4-16 |   |
| Figura 4-17 | a) Fotografía tomada de Google Earth Pro [2019].  |
|             | b) Fotografía tomada de <a href="https://video.udn.com/news/621404">https://video.udn.com/news/621404</a> , Consultado el 23 de marzo de 2019.  |
|             | c) Fotografía tomada de   |
|             | <a href="http://www.gfc.com.tw/project_detail.php?PL_ID=2015090101">http://www.gfc.com.tw/project_detail.php?PL_ID=2015090101</a> ,   |
|             | Consultado el 23 de marzo de 2019.  |
| Figura 4-20 | Fotografías cortesía de George Yao, Vice President for General Affairs,   |
|             | National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, Consultado el 23 de   |
|             | marzo de 2019.  |
| Figura 4-21 | a- c) Fotografías cortesía de George Yao, Vice President for General Affairs,   |
|             | National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, Consultado el 23 de marzo   |
|             | de 2019.  |
|             | d) Fotografía tomada de [Soong et al., 2000].   |
| Figura 4-22 | Fotografías tomadas de Google Earth Pro [2019].   |
| Figura 4-25 | Fotografía tomada de [Boroschek, 2001]  |
| Figura 4-26 | Fotografía tomada de [Boroschek, 2004]  |
| Figura 4-27 | a, c) Fotografía tomada de Google Earth Pro [2018].   |
|             | b) Fotografía tomada de [FEMA, 2007]  |
| Figura 4-30 | Fotografía tomada de [FEMA, 2007]   |
| Figura 4-31 | a) Fotografía tomada de [FEMA, 2007]  |
|             | c) Fotografía tomada de [RMS 2006]  |
| Figura 4-32 |   |
| Figura 4-35 | Fotografías tomadas de [Hopkins et al., 2008]   |

| Figura      | Referencia  |
|-------------|---|
| Figura 4-36 |   |
| Figura 4-37 | b y c) Fotografías tomadas de <a href="https://binged.it/2FkVDKJ">https://binged.it/2FkVDKJ</a> , Consultado el 23 de marzo de 2018.  |
|             | a) Fotografías tomadas de Google Earth Pro [2018].  |
| Figura 4-40 | a) Fotografía tomada de [Price et al., 2012]  |
|             | b) Fotografía tomada de [Cimellaro et al., 2012]  |
| Figura 4-41 | a- c) Fotografías tomadas de [Cimellaro et al., 2012]   |
|             | d) Fotografía tomada de [Price et al., 2012]  |
| Figura 4-42 | a) Fotografía tomada de Google Earth Pro [2018].  |
|             | b-c) Fotografías tomadas de [Minsal, 2010].   |
| Figura 4-45 | a) Fotografía tomada de [DICTUC S.A., 2010].  |
|             | b) Fotografía tomada de [Minsal, 2010].   |
| Figura 4-46 | a, b) Fotografías tomadas de [DICTUC S.A., 2010]  |
|             | c, d) Fotografía cortesía de Servicio de Salud Concepción, Concepción, Chile, Consultado el 06 de abril de 2019.  |
| Figura 4-47 | a, c) Fotografías tomadas de Google Earth Pro [2017].   |
|             | b) Fotografía tomada de Servicio de Salud Arauco [2010a]  |
| Figura 4-50 | Fotografías tomadas de [Bray and Frost, 2010].  |
| Figura 4-51 | a) Fotografía tomada de [Bray and Frost, 2010].   |
|             | d) Fotografía cortesía de Aldo A. Faúndez [2010], Servicio de Salud Arauco, Chile, Consultado el 28 de febrero de 2018.   |
| Figura 4-52 | a) Fotografía tomada de [FCC Construcción, 2009].   |
|             | b) Fotografía tomada de [Goula et al., 2011a].  |
|             | c) Fotografía tomada de [Valcárcel, 2013].  |
| Figura 4-55 | Fotografía tomada de [Goula et al., 2011b].   |
| Figura 4-56 | Fotografías tomadas de [Cabañas et al., 2011].  |
| Figura 4-57 | Fotografías tomadas de Google Earth Pro [2018].   |
| Figura 4-60 | Fotografías tomadas de [Masi et al., 2013]  |
| Figura 4-61 |   |
| Figura 4-62 | b) Fotografía tomada de [Aguiar, 2016b]   |
|             | c) Fotografía tomada de [Morales, 2017]   |
| Figura 4-65 | a) Fotografía tomada de [Aguiar, 2016a]   |
|             | b) Fotografía tomada de [SOLEICO S.A., 2016]  |
| Figura 4-66 | a, b) Fotografía tomada de [Tola and Tech 2016]   |
|             | c, d) Fotografía tomada de [Morales, 2017]  |
| Figura 4-67 | a) Fotografías tomadas de Google Earth Pro [2017].  |
|             | b) Fotografía tomada de [Morales, 2017]   |
|             | c) Fotografía tomada de <a href="http://www.eldiario.ec/noticias-manabi-ecuador/389485-el-hospital-de-chone-podria-ser-demolido-segun-el-ministro-de-turismo/">http://www.eldiario.ec/noticias-manabi-ecuador/389485-el-hospital-de-chone-podria-ser-demolido-segun-el-ministro-de-turismo/</a> , Consultado el 15 de agosto de 2018. |
| Figura 4-70 | a) Fotografía tomada de [Morales, 2017]   |
|             | b) Fotografía tomada de [Lanning et al., 2016]  |
| Figura 4-71 | a, b) Fotografías tomadas de [Tola, A. and Tech, 2016]  |
|             | c, d) Fotografía tomada de [Morales, 2017]  |
| Figura 4-72 | a) Fotografía tomada de Google Earth Pro [2017].  |
|             | b) Fotografía tomada de [Lanning et al., 2016]  |
|             | c) Fotografía tomada de [Aguiar, 2016b]   |



| Figura      | Referencia   |
|-------------|--|
| Figura 4-75 | a) Fotografía tomada de [Aguiar, 2016b]<br>b) Fotografía tomada de [Nikolaou et al. 2016]  |
| Figura 4-76 | a, b, d) Fotografías tomadas de [Nikolaou et al., 2016]<br>c) Fotografía tomada de [Morales, 2017]   |
| Figura 4-77 | a) Fotografía tomada de Google Earth Pro [2017].<br>b, c) Fotografías de la autora [2017]. Hospital en Barcelona, Consultado el 06 de diciembre de 2017.   |
| Figura 4-80 | Fotografía tomada de [Aguiar, 2016b]   |
| Figura 4-81 | a, b) Fotografías de la autora [2017]. Hospital en Barcelona, Consultado el 06 de diciembre de 2017.<br>d) Fotografía tomada de [Nikolaou et al. 2016].  |
| Figura 4-82 | a) Fotografía tomada de Google Earth Pro [2017].<br>b) Fotografía tomada de<br><a href="https://www.jornada.com.mx/2018/05/12/sociedad/032n1soc">https://www.jornada.com.mx/2018/05/12/sociedad/032n1soc</a> ,<br>Consultado el 20 de noviembre de 2017.<br>c) Fotografía tomada de<br><a href="https://issuu.com/liderazgoexperienciamedica/docs/edic_31_hgo3_web">https://issuu.com/liderazgoexperienciamedica/docs/edic_31_hgo3_web</a> ,<br>Consultado el 20 de noviembre de 2017. |
| Figura 4-85 | Fotografías tomadas de [ROMACO, 2017].   |
| Figura 4-86 |  |



$$I_{PVij} = \frac{\sum_k DS_{ijk}}{\sum_k P_{DS4ijk}}$$

**I<sub>STR</sub>**

$$S_d(T_e, \zeta) = \left(\frac{T_e}{2\pi}\right)^2 PS_a(T_e, \zeta)$$

$$\bar{W}_{ij} = \frac{W_{ij}}{\sum_i \sum_j W_{ij}}$$

$$I_{NSTR} = \sum_i \sum_j I_{NSTRij}$$

**I<sub>NSTR</sub>**

$$\bar{\delta} = \frac{\Delta_t}{H}$$

**S<sub>a,c</sub> = PFA**

$$PFA = \frac{PS_a(T_i)}{B_M}$$

$$I_{INTi} = \sum_j I_{NSTRij}$$

