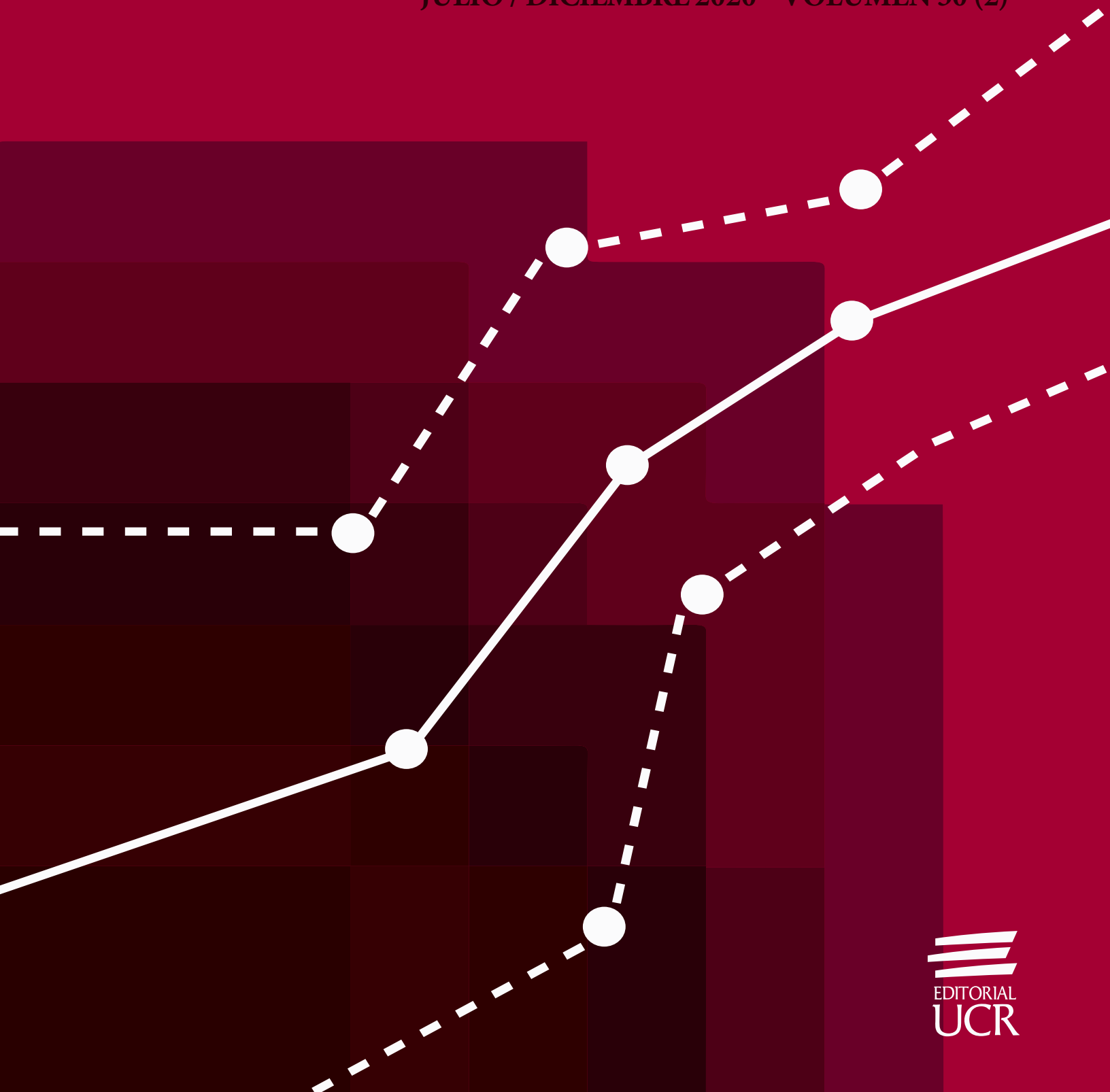


Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica

JULIO / DICIEMBRE 2020 - VOLUMEN 30 (2)



Avance del inventario estructural de edificaciones del cantón de San José

Preview for the inventory in structural building in San José

Luis Carlos Esquivel Salas

Laboratorio de Ingeniería Sísmica, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

luiscarlos.esquivel@ucr.ac.cr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4208-6482>

Recibido: 27 de enero 2020

Aceptado: 1 de junio 2020

Resumen

Se presenta un avance del inventario estructural de edificaciones del cantón de San José, el cual podrá utilizarse en evaluaciones de riesgo sísmico. Este consiste en una caracterización estructural y determinación de la distribución espacial de las edificaciones ubicadas dentro del cantón. Para su generación, se contó con información de una muestra de 1 856 edificaciones seleccionadas por muestreo estratificado aleatorio con asignación proporcional, siguiendo el método denominado Mapeo Ambiental Rápido, desarrollado por el Centro Alemán de Investigaciones en Geociencias (GFZ – *GeoForschungsZentrum*). Entre los principales resultados se tiene que el 50% de edificaciones de la muestra son de mampostería de bloques huecos de concreto, confinada y reforzada, de 1 a 2 pisos con diafragma rígido. El otro 40% posee las mismas características pero con diafragma flexible. Además, el tipo de sistema resistente a cargas laterales más utilizado es el tipo muro (92%).

Palabras clave:

Riesgo, terremotos, exposición, tipologías, edificaciones, matriz tipológica de edificios

Abstract

A preview of the structural building inventory in San José that can be used in seismic risk assessments is presented, consists in the structural characterization and spatial distribution of buildings inside the canton. For its generation, a sample of 1 856 buildings, selected by means of a stratified random sampling with proportional allocation was used, following the Rapid Environmental Mapping method, developed by the *GeoForschungsZentrum* (GFZ). Among the main results, researchers found that 50% of the buildings from the sample were of confined reinforced masonry, with hollow concrete blocks and with 1 or 2 storeys and rigid diaphragm. The other 40% had the same characteristics but with a flexible diaphragm. Moreover, the most used lateral load resisting system was the wall type (92%).

Keywords:

Risk, earthquakes, exposure, typologies, buildings, building typology matrix



1. INTRODUCCIÓN

Se presenta un avance de la caracterización estructural y determinación de la distribución espacial de las edificaciones ubicadas dentro del cantón de San José, el cual se denomina “inventario estructural de edificaciones” y es referido en ocasiones en este artículo simplemente como inventario. Se generó a partir del análisis remoto (por medio de fotografías) de 1 856 estructuras dentro del área de estudio, al mes de marzo del año 2018. Estos corresponden al 25 % del total de edificaciones que se pretenden analizar para obtener la versión final de este inventario que consiste de 7 296. El avance responde a la participación del autor en las “I Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica”, celebradas en octubre del año 2019. Para esa fecha, aún no se contaba con la caracterización de las 7 296 estructuras, por lo que se presentaron los resultados obtenidos en el último avance logrado en este artículo.

Un inventario estructural de edificaciones es el primero de los elementos necesarios para generar un modelo de exposición y posibilitar la cuantificación del riesgo sísmico. El actual inventario se enmarca en un estudio de riesgo sísmico en desarrollo, ejecutado por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) de la Universidad de Costa Rica, en colaboración con el Centro Alemán de Investigaciones en Geociencias (GFZ – *GeoForschungsZentrum*). Tiene por objetivo calcular, de forma probabilista, las pérdidas probables económicas y humanas. La descripción del resto de sus componentes, así como la presentación de resultados de pérdidas estimadas serán abordados en futuros artículos. Por lo tanto, este documento versa sobre el proceso llevado a cabo para generar este avance del inventario estructural de edificaciones, así como los resultados obtenidos al momento de su generación.

La caracterización estructural remota está enfocada en la amenaza sísmica, la cual busca capturar los principales rasgos o atributos de la edificación que inciden en su desempeño ante terremotos, permitiendo describir su vulnerabilidad ante estos eventos naturales. A su vez consiste en estimar la cantidad de edificaciones con determinados atributos estructurales en un espacio geográfico específico. Por ejemplo: la cantidad de edificaciones cuyo principal material es la mampostería de concreto (atributo estructural) en el barrio Moreno Cañas, del distrito Zapote (espacio geográfico).

El inventario estructural de edificaciones contiene esta información para cada uno de los 196 barrios que componen el cantón (llamados geo-unidades o estratos en el marco del trabajo). En conjunto con los elementos de costo y población, constituyen un modelo de exposición que permiten la potencial evaluación del riesgo sísmico del cantón en conjunto con los otros dos componentes que lo conforman, amenaza y vulnerabilidad.

2. IMPORTANCIA

Un inventario estructural de edificaciones es una pieza necesaria y fundamental para cualquier evaluación o cálculo del riesgo sísmico. Este último es una herramienta de suma importancia para la gestión del riesgo, específicamente para prevenir la creación de nuevo riesgo y la mitigación del existente. Ejemplos de iniciativas internacionales de gran relevancia son *Hazards US Multi-Hazard*,

conocido como HAZUS-MH (Federal Emergency Management Agency, 2013) y *An Advanced Approach to Earthquake Risk Scenarios With Application to Different European Towns*, conocido como RISK-UE (Mouroux et al., 2004).

Las evaluaciones de riesgo sísmico permiten identificar, antes del desastre, las zonas con mayor afectación, así como cuantificar de manera formal las pérdidas probables económicas y/o humanas. Esto puede traducirse en acciones económicamente viables para la protección de la población y sus bienes. Por ejemplo, si los resultados de la evaluación sísmica señalan que una determinada clase o tipología estructural tiene un mal desempeño (i.e. daños severos y por lo tanto pérdidas importantes), se puede comparar el costo de una campaña para el reforzamiento de esta clase estructural contra las pérdidas estimadas producto de este mal desempeño. Esto consiste en información relevante para los tomadores de decisiones. Demostraciones reales de evaluaciones de riesgo sísmico que provocaron medidas de mitigación, en el mundo y Latinoamérica, se encuentran en Dolce (2012) y Mora et al. (2015), respectivamente.

Se han realizado varios esfuerzos durante el pasado para la cuantificación del riesgo sísmico del cantón de San José, pudiendo mencionarse Cardona et al. (2009a, 2009b, 2009c, 2009d), Evaluación de Riesgos Naturales y Antropogénicos (2014), Calderón (2016), Miyamoto Internacional Inc. (2016c, 2016a, 2016b) y Calderón y Silva (2019). En cada uno de ellos se ha construido un modelo de exposición, y consigo su propio inventario estructural de edificaciones. A excepción de Miyamoto Internacional Inc., los inventarios se han generado a partir de datos demográficos, económicos y sociales, incluyendo algunas inspecciones en campo (el caso de Evaluación de Riesgos Naturales y Antropogénicos, sin que este fuera la base principal sobre la cual se construyera el inventario). Por consiguiente, se obtienen modelos simplificados, que si bien son valiosos y cumplen el nivel de detalle requerido para completar los objetivos de cada estudio, se ha comprobado que pueden contener grandes diferencias en la distribución de las clases o tipologías estructurales (Santa-María et al., 2017; Stone, 2017).

El modelo de exposición de la evaluación de riesgo sísmico elaborada por Miyamoto Internacional Inc. estuvo a cargo de la empresa ImageCAT. El inventario se generó a partir de encuestas presenciales a 576 estructuras, seleccionadas siguiendo una metodología desarrollada por esta empresa en conjunto con Fundación del Modelo Global de Terremotos, GEM por sus siglas en inglés, (Hu, Huyck, Eguchi y Bevington, 2014). El nivel de resolución de este inventario es mayor a cualquiera de los anteriormente mencionados, sin embargo se genera a partir de encuestas presenciales y no remotas, que es el caso del trabajo aquí presentado y explicado con más detalle en las secciones siguientes.

La exposición continúa siendo el componente del riesgo menos estudiado a nivel mundial (Pittore, 2014; Pittore et al., 2017; Simpson et al., 2014; Taubenböck et al., 2013), el caso de Costa Rica no es la excepción. Es por esta razón que se ha realizado un esfuerzo importante en investigar este tema, lo que ha permitido el desarrollo de un inventario estructural de edificaciones robusto y representativo para el cantón de San José.

3. DIVISIÓN TERRITORIAL ADMINISTRATIVA DE COSTA RICA

Para tener claridad sobre el alcance geográfico del inventario generado, se describe brevemente la división territorial de Costa Rica y el área de estudio en específico.

En la Constitución Política de la República de Costa Rica (EDIN, 2017), en el artículo 168, se plasma la división territorial como sigue: “el territorio nacional se divide en provincias; éstas en cantones y los cantones en distritos”. Algunos de los cantones poseen una división administrativa adicional y de menor jerarquía a la de los distritos, llamada barrios. En total, el país cuenta con siete provincias, 82 cantones y 468 distritos (División Territorial Administrativa de la República de Costa Rica, 2017). El cantón de San José pertenece a la provincia de mismo nombre, la cual es la capital del país. En la Figura 1, se muestra la ubicación del cantón de San José y la provincia de San José, esta última en el recuadro.



Figura 1. Ubicación del cantón de San José.
Fuente: es.wikipedia.org, 2020.

Este cantón cuenta con un área de 44.62 km², la cual representa poco menos del 0.1 % del territorio nacional. Posee la mayor cantidad de población proyectada para el año 2016 (100 % de tipo urbano), para un total de 336 792 habitantes, correspondiente aproximadamente al 7 % del total de la población de Costa Rica (4 890 372 habitantes), con una densidad de población de 6 456 habitantes por km². El 86 % del territorio es urbanizable, con un 64 % de área conformada por predios construidos, 20 % cubierta por vialidad y apenas un 3 % constituida por predios sin construir. El restante 14 % corresponde principalmente a zonas marginales, protegidas o prohibidas (Municipalidad de San José, 2016). El cantón de San José se divide en 11 distritos (Carmen, Merced, Hospital, Catedral, Zapote, San Francisco, Uruca, Mata Redonda, Pavas, Hatillo, San Sebastián), los cuales a su vez se dividen en 196 barrios cuyos límites oficiales se muestran en el siguiente mapa, creado por la Municipalidad de San José.

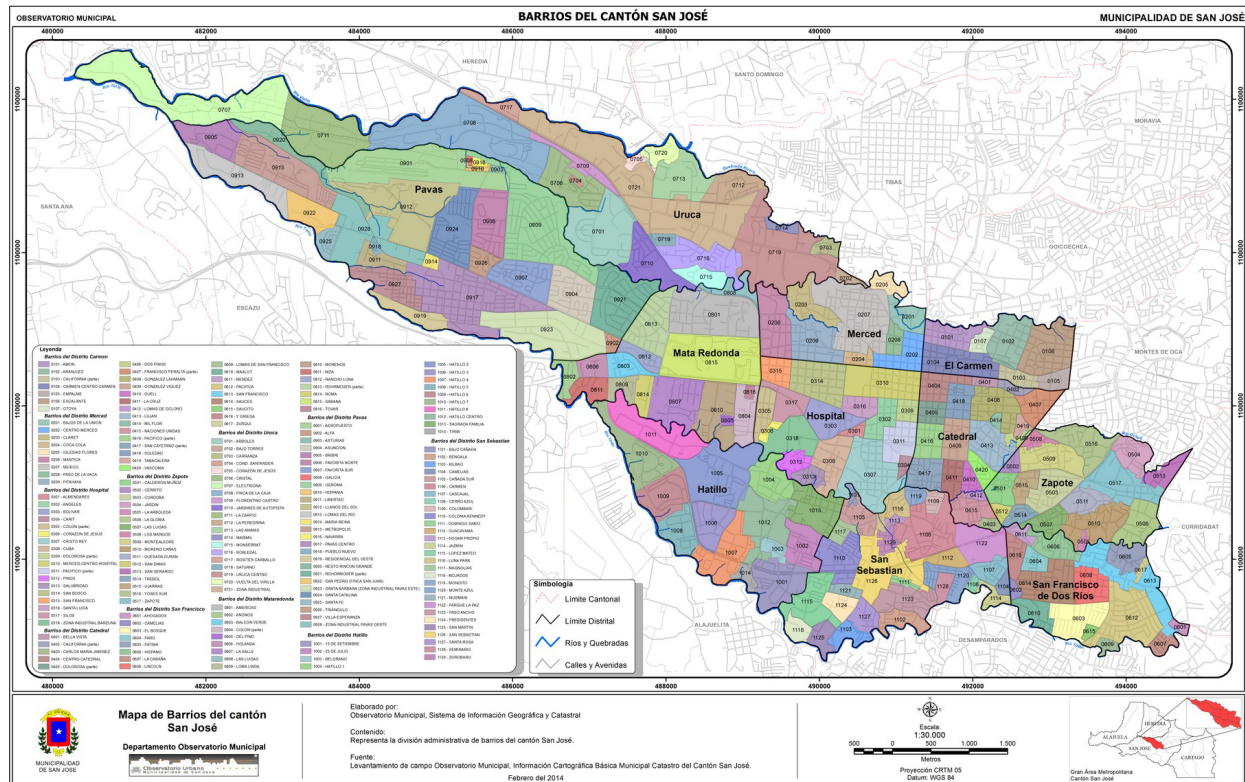


Figura 2. Mapa de barrios del cantón de San José.
Fuente: Municipalidad de San José, 2014.

4. METODOLOGÍA

La generación de un inventario estructural de edificaciones es una tarea desafiante con varios aspectos: no se pueden exportar de otras latitudes a la zona de estudio, se manejan grandes cantidades, calidades y tipos de información que deben converger en un solo inventario, ya que las ciudades son un ente dinámico, unas más que otras, por lo que el inventario necesariamente tiene una validez temporal y se necesita de varias áreas del conocimiento para llevarse a cabo. Por esta razón, no son muchas las metodologías desarrolladas y probadas para llevar a cabo este tipo de actividad.

Para seleccionar una metodología a seguir, primero se definió el tipo de inventario que se requería generar. La forma en que se desarrolla un inventario depende de su cobertura y resolución espacial, por lo que puede dividirse entonces en globales y locales (Simpson et al., 2014). En el caso de este trabajo, el inventario sería local de alta resolución, es decir, que implique la extracción de información a nivel de edificación individual, lo que corresponde a un inventario de nivel 2 según Gamba (2014). Además, la metodología seleccionada debía utilizar herramientas e información de entrada de acceso abierto y gratuitas, para que el inventario pudiera actualizarse a lo largo del tiempo sin que el presupuesto disponible fuera una limitante. Se encontraron dos metodologías que cumplían estos requisitos: la desarrollada por ImageCAT y GEM (mencionada anteriormente en la sección de Importancia), llamada Desarrollo de Información de Inventario Espacial, SIDD por sus

siglas en inglés, (Hu, Huyck, Eguchi y Bevington, 2014) y la desarrollada por GFZ llamada Mapeo Ambiental Rápido, REM por sus siglas en inglés (Parolai, 2016a, 2016b).

Ambos enfoques son del tipo “de abajo hacia arriba” (*bottom-up*), lo que implica la recolección de información específica sobre una muestra de la población de interés y su análisis, para luego generar un modelo estadísticamente representativo. La recolección de información se hace por medio de la aplicación de encuestas a las edificaciones que componen la muestra, ya que son las que permiten ir caracterizando estructuralmente cada una de las edificaciones muestreadas. Luego se trabaja sobre esta muestra y se extrapolan los resultados obtenidos a la población de edificaciones.

Las principales diferencias entre estas dos metodologías radican en la forma de seleccionar la muestra y la forma de aplicar las encuestas. SIDD utiliza encuestas presenciales, mientras que REM utiliza encuestas remotas. Teniendo esto en mente, se seleccionó la metodología REM, previendo que los costos de su implementación debían ser menores al aprovechar la tecnología para el trabajo de campo, que requiere de una inversión de tiempo, equipo humano y dinero importante. Casos exitosos de la aplicación de REM se nombran a continuación: Bishkek, Kirguistán (Wieland et al., 2012), Cologne, Alemania (Wieland, 2014), Estambul, Turquía (Pittore et al., 2015) y Soultz-sous-Forêts, Francia (Pittore et al., 2018). A continuación se muestra una figura que resume las etapas en que puede dividirse REM.

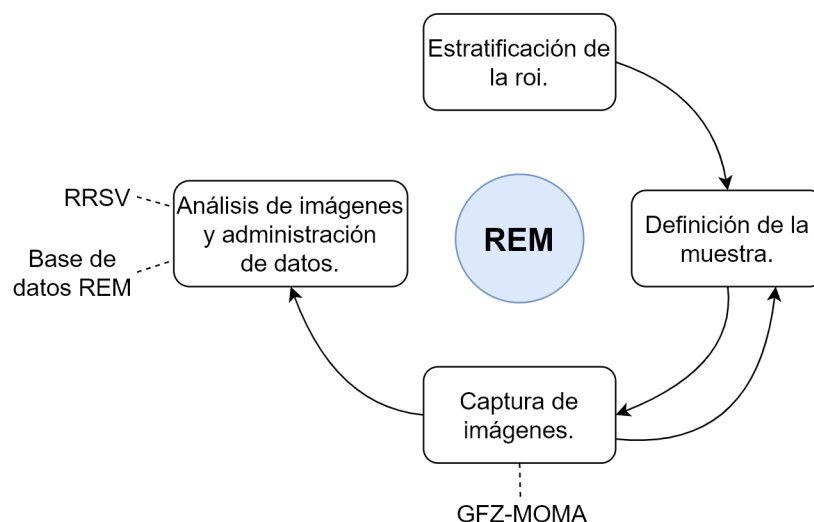


Figura 3. Etapas del REM.
Fuente: Elaboración propia.

4.1 Estratificación de la zona de estudio

La zona de estudio, en este caso el cantón de San José (SJ de ahora en adelante), debe dividirse en unidades o estratos de relativa homogeneidad, que no se traslapen espacialmente, para aplicar sobre cada uno de ellos un muestreo aleatorio. Para este trabajo se utilizó la división administrativa de “barrio” como geo-unidad o estrato (196 barrios en total), basando sus fronteras en el mapa oficial de barrios para SJ, mostrado en la figura 2.

4.2 Definición de la muestra y captura de imágenes

REM utiliza encuestas remotas, en lugar de presenciales, para la caracterización estructural de las edificaciones. Por esta razón, es necesario el tomar una serie de fotografías de cada estructura a la cual se requiera aplicar esta encuesta remota.

Las fotografías o imágenes son capturadas por medio de una cámara omnidireccional fijada a la parte superior de un automóvil (ver Figura 4). En aras de la eficiencia, la toma de imágenes se realiza solamente a las edificaciones ubicadas a lo largo de una ruta previamente definida, a ser recorrida por el automóvil. Por lo tanto, se tienen fotografías de un grupo de estructuras, denominado sub-población, y no de la población completa de edificaciones del cantón. De esta manera la toma de información es más rápida y eficiente, en comparación con captura de imágenes realizadas por personas.



Figura 4. Cámara omnidireccional utilizada para tomar las fotografías.
Fuente: Elaboración propia.

Esta ruta previamente definida debe por requisito cruzar cada uno de los centroides de los estratos (barrios) idealmente una única vez con un criterio de menor costo, siendo el costo en este caso la longitud. El total de caminos de SJ, según información obtenida de Open Street Maps, es de 650 km. La ruta de muestreo generada es de 170 km, un 26% del total, mostradas en la Figura 5.

Al final del recorrido, se capturaron aproximadamente 35 mil imágenes georreferenciadas, correspondientes a las 15 183 edificaciones que componen la sub-población. A esta sub-población se aplica un muestreo estratificado aleatorio con asignación proporcional del 10%, resultando en una muestra de 7 296 estructuras, es decir aproximadamente el 8.5 % del total de 85 800 edificaciones existentes en SJ, según Miyamoto Internacional Inc. (2016c) (ver Figura 6).

Para la implementación del muestreo se utilizó información sobre límites de barrios y huellas de edificaciones proporcionada por la MSJ, en formato *shape* para poder ser trabajada en un Sistema de Información Geográfica (SIG) como QGIS, así como un script de acceso abierto en Ipython que forma parte de REM.



Figura 5. Total de caminos (en azul), ruta generada (en verde) y ruta seguida (en rojo). Centroides de barrios en puntos rojos.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 6. Subpoblación (en verde) y muestra (en naranja). En la ampliación se incluye la población (en celeste) y la ruta seguida (en rojo).
Fuente: Elaboración propia.

4.3 Análisis de imágenes y administración de datos

Una vez capturadas las fotografías y definida la muestra, se incorporó esta información a la plataforma web de “Inspección visual rápida remota” (RRVS por sus siglas en inglés) (Wieland, 2014), que forma parte del REM. Por medio de esta plataforma, el encuestador tiene acceso a cada

edificación que compone la muestra, sus imágenes asociadas, fotografías aéreas de alta resolución de la zona de interés, obtenidas del geoportal del Sistema Nacional de Información Territorial (Instituto Geográfico Nacional, (n.d.)), así como el cuestionario o encuesta que debe aplicarse a cada estructura.

Se conformó un equipo de encuestadores que varió en el tiempo, ya que consistió en estudiantes de último año de carrera de Ingeniería Civil de la UCR supervisados por personal del LIS. Se organizaron reuniones periódicamente para evacuar dudas y documentar criterios consensuados sobre la determinación de algunos atributos estructurales. El proceso completo de aplicación de encuestas tomó cerca de un año de trabajo.

Todas las características o atributos que los encuestadores iban identificando para cada edificación, al final de la encuesta, eran enviadas a la base de datos del REM (rem db), diseñada utilizando el sistema de administración de base de datos objeto-relacional PostgreSQL, el cual se basa en POSTGRES (PostgreSQL Global Development Group, 2018). Cuando se tengan completadas las encuestas de toda la muestra, se tendrán alrededor de 250 mil datos, que deben ser almacenados y relacionados a la edificación respectiva para poder ser filtrados o consultados a conveniencia y de esta forma convertirlos en información aprovechable.

5. RESULTADOS

Los resultados presentados corresponden a un avance del inventario estructural de edificaciones, como se explicó al inicio del documento. Se generaron a partir de la aplicación de la encuesta a 1 856 estructuras, equivalentes a una muestra del 2% de la población o del 25% de la muestra final.

Uno de los atributos recolectados más relevantes es el material del sistema resistente a cargas laterales (LLRS) de las edificaciones. Se encontró que el 86% de edificaciones, aproximadamente 1 600, tenían LLRS de mampostería confinada reforzada de bloques huecos de concreto, un tipo de configuración de mampostería de concreto propia de nuestro país. En cantidad, el segundo material más utilizado es la madera con un 7%, seguida del acero y el concreto reforzado con un 2.5% cada uno. El restante 2% se reparte en mampostería confinada, materiales basados en barro y algunos que no pudieron identificarse.

Otra característica estructural relevante es el tipo de LLRS implementado en las edificaciones. Se encontró que el más popular es el de tipo muro, representado el 92%, es decir aproximadamente 1 700 estructuras, seguido por el tipo marco, con un 4%. El restante 4% se distribuye entre el tipo dual, identificados como marcos rellenos y marcos arriostrados. Cuando se utiliza mampostería reforzada, el LLRS es muy probable que sea tipo muro. Para estructuras antiguas, esto se cumple aun cuando en diseño se pretendía que la estructura se comportara como marco, pero no se desligaban las paredes de mampostería de cerramiento. Esto, aunado a que algunas estructuras en madera tengan LLRS tipo muro, explica la alta incidencia de este tipo de sistema.

Los resultados anteriores corresponden a atributos individuales, sin embargo, para poder generar un inventario utilizable en evaluaciones de riesgo sísmico, es necesario agrupar tipos de atributos, generando tipologías o clases de edificaciones (Brzev et al., 2013; Pittore et al., 2018). Las clases

o tipologías agrupan atributos de estructuras, posibilitando la clasificación de cada estructura en una clase o tipo, a la cual se le asigna un determinado desempeño sísmico por medio de una curva de fragilidad (describe el nivel de daño esperado ante algún parámetro de intensidad sísmica).

5.1 Clases o tipologías estructurales

Tabla 1. *Clases o tipologías estructurales definidas*

Material	Diafragma	Número de pisos	Regularidad	Código	Tipología desagrupada	Tipología agrupada a la que pertenece
Mampostería, confinada y reforzada	Rígido	1	Regular	MCR1_RE	Mampostería reforzada con diafragma rígido	Mampostería reforzada
			Irregular	MRC1_IR		
		2 – 3	Regular	MCR2_RE		
			Irregular	MCR2_IR		
	Flexible	1	Regular	MCR3_RE	Mampostería reforzada con diafragma flexible	
			Irregular	MCR3_IR		
		2 – 3	Regular	MCR4_RE		
			Irregular	MCR4_IR		
Concreto reforzado	-	1 – 5	-	RC1	Concreto reforzado	Concreto reforzado
	-	6 – 30	-	RC2		
Madera	-	1 – 5	-	WOOD1	Madera	Madera
Acero estructural	-	1 – 5	-	S01	Marcos de acero	Acero
Acero laminado en frío	-	1 – 5	-	S02	Marcos de acero laminado en frío	

El definir un esquema de clases de edificaciones o tipologías de edificaciones es uno de los pasos críticos en el desarrollo de un modelo de exposición y de una evaluación de riesgo sísmico. Tiene el reto de capturar, con la menor cantidad posible de clases o tipos, la gran mayoría de edificaciones que componen la muestra, separándolas lo suficiente para distinguir desempeño ante terremotos, pero no demasiado que impida la asignación de una curva de fragilidad a cada tipología (Pittore et al., 2018).

Para este avance del inventario, se utilizaron las siguientes clases o tipologías estructurales elaboradas por el Ing. Diego Hidalgo, miembro del grupo de investigadores del proyecto: i) Mampostería reforzada con diafragma rígido, ii) Mampostería reforzada con diafragma flexible,

iii) Concreto reforzado, iv) Madera, v) Marcos de acero y vi) Marcos de acero laminado en frío. Para presentar los resultados, se decide agrupar las clases de mampostería (i y ii) y las de acero (v y vi), obteniendo cuatro tipologías, (Ver Tabla 1).

5.2 Avance del inventario estructural de edificaciones

Se utilizan tres niveles de unidad geopolítica, barrio (geo-unidad o estrato), distrito y cantón. La primera contiene la información de forma desagregada, mientras que las dos últimas lo tiene de forma agregada. La representación escogida (barras o mapa) obedece a la facilidad de comprensión y transmisión de los resultados.

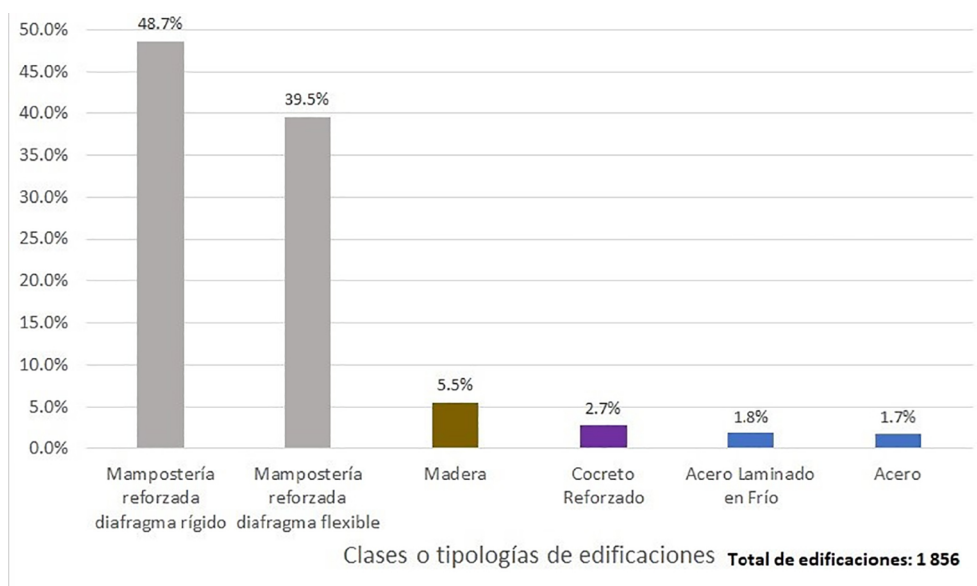


Figura 7. Inventario estructural de edificaciones para el cantón de San José, clases agrupadas.
Fuente: Elaboración propia.

Examinando el inventario a nivel de cantón, para clases agrupadas (Figura 7), se puede observar que casi el 90% de edificaciones son clasificadas dentro de las clases o tipologías de mampostería reforzada, algo de esperar según los resultados obtenidos a nivel de material. Dentro de esta, cerca del 50% corresponde a estructuras con diafragmas rígidos y el 40% restante a diafragmas flexibles. El hecho de poder distinguir entre tipos de diafragmas es de suma relevancia, ya que incide de gran manera en el comportamiento ante sismos. Le sigue la tipología llamada “madera”, lo cual de nuevo es consistente a nivel de material.

Con respecto al inventario a nivel de distrito con clases agrupadas (Figura 8), se lograron capturar las diferencias entre las tipologías, siempre prevaleciendo las de mampostería muy por encima del resto. Por ejemplo, se puede observar que para el distrito de El Carmen, existen más edificaciones de concreto reforzado (un 11%) que de madera y acero. También se tiene que en Merced hay una cantidad importante de edificaciones de madera (18%), mientras que en la Uruca

las hay en acero (15%). Esta última se explica en cuanto a que el cantón de la Uruca tiene un uso industrial importante, donde las naves industriales son un tipo de construcción popular.

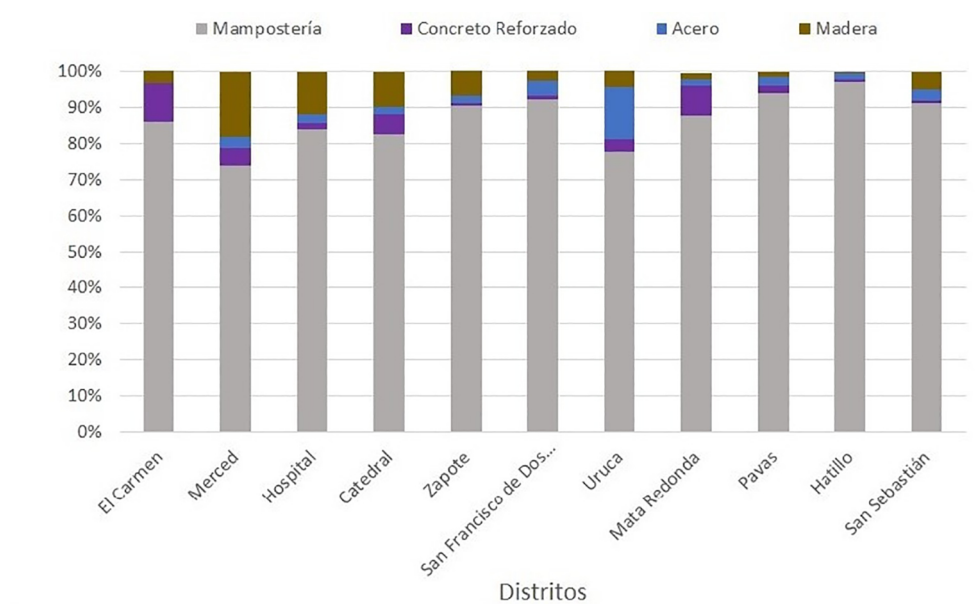


Figura 8. Inventario estructural de edificaciones por distrito para el cantón de San José, clases agrupadas.
Fuente: Elaboración propia.

Del inventario a nivel de distrito con clases agrupadas en formato de mapa (Figura 9), se puede notar que las edificaciones de tipología de madera se agrupan hacia el este del cantón, con presencia importante en Merced, Hospital, Catedral y Zapote.

Para el caso de información desagregada a nivel de barrio (Figura 10), se puede ver como hay muchos barrios que en su totalidad cuentan con edificaciones del tipo mampostería reforzada, 68 para ser específico. Otros barrios, en su lugar, presentan una predominancia de alguna tipología distinta a la de mampostería reforzada, algo que es capturado solo cuando se analiza la información a nivel de barrio.

6. CONCLUSIONES

La información proporcionada por un inventario estructural de edificaciones es de gran importancia para las evaluaciones de riesgo sísmico, aportando el componente de bienes expuestos a un potencial desastre. En el caso de este artículo, se presenta un avance del 25 % del inventario final a generar para el cantón de San José, correspondiendo a la caracterización estructural por medio de encuestas remotas de 1 856 edificaciones, en el marco de una evaluación de riesgo sísmico que está siendo desarrollada por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica a este cantón.

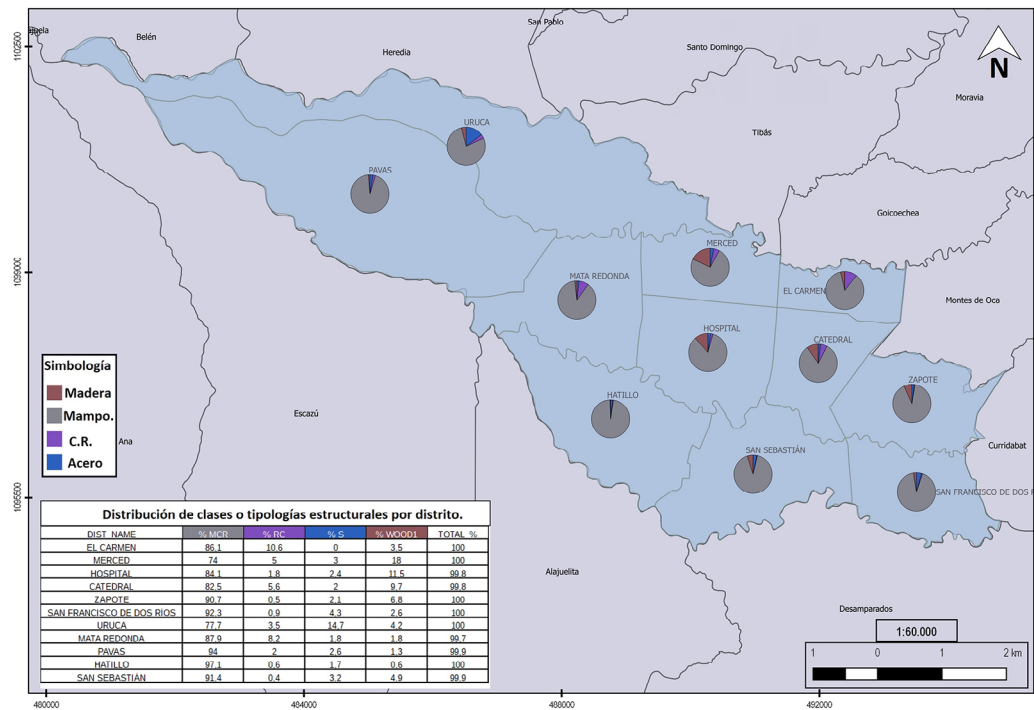


Figura 9. Mapa con inventario estructural de edificaciones a nivel de distrito, clases agrupadas.
Mampo.: mampostería; C.R.: concreto reforzado.
Fuente: Elaboración propia.

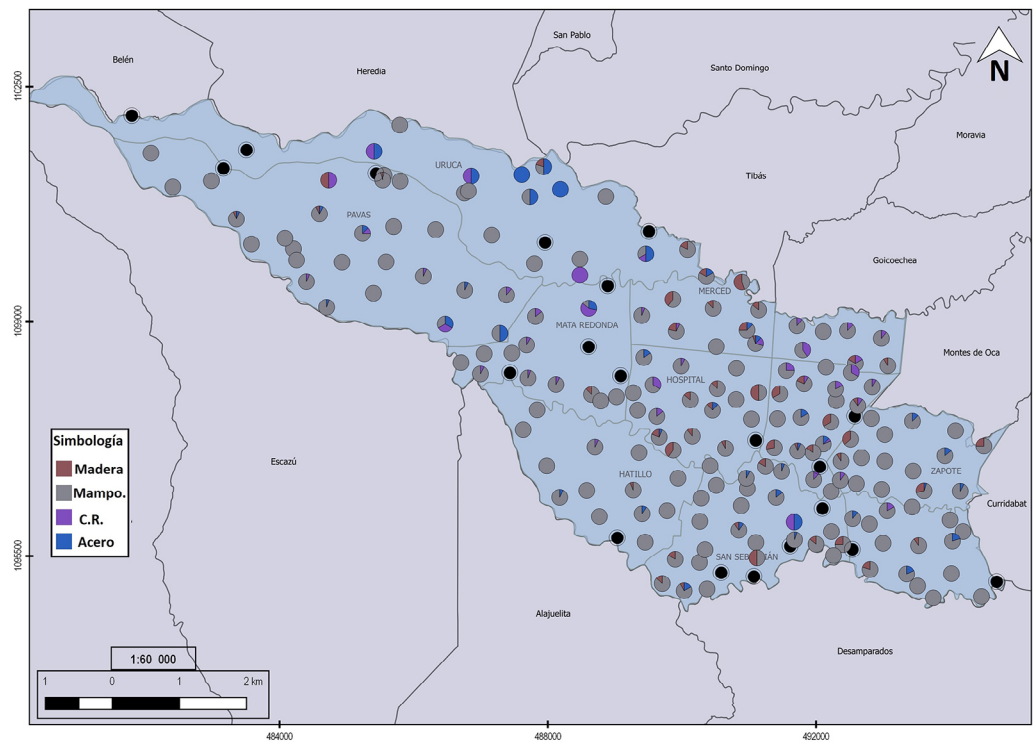


Figura 10. Mapa con inventario estructural de edificaciones a nivel de barrio, clases agrupadas.
Mampo.: mampostería; C.R.: concreto reforzado.
Fuente: Elaboración propia.

De este avance del inventario, se puede concluir que, para el cantón de San José, el material más utilizado es la mampostería confinada reforzada con bloques huecos de concreto, presente en un 86% de las edificaciones encuestadas, correspondiendo aproximadamente a 1 600 estructuras. Le siguen la madera, con un 7%, el acero y el concreto reforzado, con un 2.5% cada uno. El sistema resistente a cargas laterales (LLRS) más utilizado es de tipo muro, presente en un 92% de la muestra, aproximadamente 1 700 edificaciones. Le sigue el LLRS tipo marco, con un 4%.

La definición de un esquema de clases o tipologías de edificaciones es un paso crítico en la creación de un inventario estructural de edificaciones. Para este avance se utilizaron seis clases desagrupadas, traducándose en cuatro clases agrupadas: i) mampostería, ii) concreto reforzado, iii) acero y iv) madera. La tipología predominante en el cantón de San José es la de mampostería reforzada con diafragma rígido, representando el 50%, seguida de su similar con diafragma flexible, con un 40%. El identificar cuantitativamente esta tendencia es importante, ya que puede justificar y señalar el tipo de edificaciones que deben ser más estudiadas en cuanto a comportamiento ante terremotos y generación de curvas de fragilidad u otras formas de caracterización de desempeño.

A nivel distrital, aunque la tipología de mampostería sigue siendo dominante para todos los distritos, se encontró que en El Carmen se tiene un 11% de edificaciones de la clase concreto reforzado, en Merced un 18% de la clase madera y en la Uruca un 15% de la tipología acero. Analizando la información y tomando en cuenta la distribución espacial, también se concluye que la tipología madera se concentra en el este del cantón, con presencia importante en Merced, Hospital, Catedral y Zapote.

Finalmente, analizando los datos a nivel desagregado de barrio, se logró identificar que existen 68 barrios donde la totalidad de estructuras pertenecen a la tipología mampostería (e.g. Bilbao, Bella Vista, Santander), mientras que en algunos la tipología predominante es distinta a la mampostería, incluso unos cuantos no presentan edificaciones de este tipo del todo. Esto es, relevante, por ejemplo, en el caso de querer hacer intervenciones o visitas a cierto tipo de estructuras, donde previamente se podrían escoger barrios con una alta incidencia de esta tipología, propiciando un manejo más eficiente de los recursos.

FINANCIAMIENTO

Esta investigación se financió con fondos provenientes del Transitorio I de la Ley Nacional de Emergencias (N° 8488) de la República de Costa Rica.

RECONOCIMIENTOS

Al Dr. Massimiliano Pittore y el Dr. Michael Haas, de GFZ, por su valiosa e importante colaboración en la implementación de la metodología REM, sin ella este trabajo no hubiera sido posible.

AGRADECIMIENTOS

A los asistentes del proyecto: Joselin Morales, Jairo Chacón, Brayna Ruiz, Natalia Sánchez, Carolina Fajardo, Richard Godfrey, Katherine Méndez, Andrés Quesada, Steven Vásquez y Silvia Blanco.

A los evaluadores (anónimos) de este artículo, cuyos atinados y valiosos comentarios permitieron enriquecerlo, aumentando la calidad y claridad del mismo.

REFERENCIAS

- Brzev, S., Scawthorn, C., Charleson, A. W., Allen, L., Greene, M., Jaiswal, K., & Silva, V. (2013). GEM Building taxonomy version 2.0. *GEM Technical Report*, 188. <https://doi.org/doi:10.13117/GEM.EXP-MOD.TR2013.02>.
- Calderón, A. (2016). Probabilistic Earthquake Loss Assessment for Costa Rica. Tesis de Maestría. Earthquake and Seismology Engineering. Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia.
- Calderón, A., & Silva, V. (2019). Probabilistic seismic vulnerability and loss assessment of the residential building stock in Costa Rica. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(3), 1257–1284. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0499-1>
- Cardona, O., Yamín, L., Bernal, G., Ordaz, M., Reinoso, E., Barbat, A., & Carreño, M. (2009a). T2-2 Recursos de información disponibles. *Informe de CAPRA Costa Rica*, 39. Recuperado de <https://www.ecapra.org/documentos/documentos-capra-costa-rica>
- Cardona, O., Yamín, L., Bernal, G., Ordaz, M., Reinoso, E., Barbat, A., & Carreño, M. (2009b). T2-3 Modelación probabilista de amenazas naturales. *Informe de CAPRA Costa Rica*, 93. Recuperado de <https://www.ecapra.org/documentos/documentos-capra-costa-rica>
- Cardona, O., Yamín, L., Bernal, G., Ordaz, M., Reinoso, E., Barbat, A., & Carreño, M. (2009c). T2-4 Inventario de elementos expuestos. *Informe de CAPRA Costa Rica*, 1–42. Recuperado de <https://www.ecapra.org/documentos/documentos-capra-costa-rica>
- Cardona, O., Yamín, L., Bernal, G., Ordaz, M., Reinoso, E., Barbat, A., & Carreño, M. (2009d). T2-5 Caracterización local de la vulnerabilidad de edificaciones. *Informe de CAPRA Costa Rica*, 1–66. Recuperado de <https://www.ecapra.org/documentos/documentos-capra-costa-rica>
- EDIN 2017. Constitución política de la República de Costa Rica. Recuperado de https://www.imprentanacional.go.cr/editorialdigital/libros/textos_juridicos/constitucion_politica_digital_edincr.pdf
- División Territorial Administrativa de la República de Costa Rica (2017). La Gaceta N° 48 278. Recuperado de <https://doi.org/978-9977-58-477-5>
- Dolce, M. (2012). *The Italian national seismic prevention program. Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Evaluación de Riesgos Naturales y Antropogénicos. (2014). Valoración de la vulnerabilidad física y riesgo ante sismos en distritos clave del Cantón de San José. *ERN*, 153.
- Federal Emergency Management Agency. (2013). Hazus–MH 2.1: Technical Manual. *FEMA*, 718. Recuperado de www.fema.gov/plan/prevent/hazus
- Gamba, P. (2014). GEM Global exposure database – scientific features. *GEM Technical Report*, 46. <https://doi.org/10.13117/GEM.EXP-MOD.TR2014.10>

- Hu, Z., Huyck, C., Eguchi, M., & Bevington, J. (2014). User guide: Tool for spatial inventory data development. *GEM Technical Report*, 60. <https://doi.org/10.13117/GEM.DATA-CAPTURE.TR2014.05>
- Instituto Geográfico Nacional. (2014). *Sistema Nacional de Información Territorial*. <http://www.snitcr.go.cr/>
- Miyamoto Internacional Inc. (2016a). Apéndice A: Datos suplementarios. *The USAID / OFDA PREPARE Program. Phase I*, 1–143.
- Miyamoto Internacional Inc. (2016b). Appendix B: Building Exposure Model. *The USAID / OFDA PREPARE Program. Phase I*, 28.
- Miyamoto Internacional Inc. (2016c). Assessment of Earthquakes Risks. *The USAID / OFDA PREPARE Program. Phase I*, December, 1–59.
- Mora, M. G., Valcárcel, J. A., Cardona, O. D., Pujades, L. G., Barbat, A. H., & Bernal, G. A. (2015). Prioritizing interventions to reduce seismic vulnerability in school facilities in Colombia. *Earthquake Spectra*, 31(4), 2535–2552. <https://doi.org/10.1193/040412EQS151T>
- Mouroux, P., Bertrand, E., Bour, M., Le Brun, B., Depinois, S., & Masure, P. (2004). The European RISK-UE project: an advanced approach to earthquake risk scenarios. *13th World Conference on Earthquake Engineering, paper No. 3329*, 14.
- Municipalidad de San José. (2016). Diagnóstico cantonal 2016. *Dirección de Planificación y Evaluación*, 236. Recuperado de [https://www.msj.go.cr/MSJ/Municipalidad/Lists/Diagnostico Cantonal/DispForm.aspx?ID=2&Source=https%3A%2F%2Fwww.msj.go.cr%2FMSJ%2FMunicipalidad%2FSitePages%2FSJC_diagnostico_cantonal.ASPX&ContentTypeId=0x0100455673D594F2D14DADEBA26DA2A907DA](https://www.msj.go.cr/MSJ/Municipalidad/Lists/Diagnostico%20Cantonal/DispForm.aspx?ID=2&Source=https%3A%2F%2Fwww.msj.go.cr%2FMSJ%2FMunicipalidad%2FSitePages%2FSJC_diagnostico_cantonal.ASPX&ContentTypeId=0x0100455673D594F2D14DADEBA26DA2A907DA)
- Parolai, S. (2016a). DB2 Software platform and processing tools. *SIBYL Project Derivable*, 1–33.
- Parolai, S. (2016b). DB3 Guidelines of the mobile mapping system and remote rapid visual screening. *SIBYL Project Derivable*, 1–36.
- Pittore, M. (2014). D3.5 Sampling framework. *SENSUM Project Derivable*, 1–72.
- Pittore, M., Grant, D., Parolai, S., Free, M., Mambetalyev, E., & Sheraliev, T. (2017). *Exposure and vulnerability assessment via the integration of remote and in situ information: case study of Kyrgyzstan* [Artículo de conferencia].
- Pittore, M., Haas, M., & Megalooikonomou, K. G. (2018). Risk-Oriented, Bottom-Up Modeling of Building Portfolios With Faceted Taxonomies. *Frontiers in Built Environment*, 4(October), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00041>
- Pittore, M., Wieland, M., Errize, M., Kariptas, C., & Güngör, I. (2015). Improving post-earthquake insurance claim management: A novel approach to prioritize geospatial data collection. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 2401–2427. <https://doi.org/10.3390/ijgi4042401>
- PostgreSQL Global Development Group. (2018). *PostgreSQL. The PostgreSQL Global Development Group*. 2626. Recuperado de <https://www.postgresql.org/files/documentation/pdf/9.6/postgresql-9.6-US.pdf>
- Santa-María, H., Hube, M. A., Rivera, F., Yepes-Estrada, C., & Valcárcel, J. A. (2017). Development of national and local exposure models of residential structures in Chile. *Natural Hazards*, 86, 55–79. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2518-3>
- Simpson, A., Murnane, R., Saito, K., Phillips, E., Reid, R., & Himmelfarb, A. (2014). Understanding risk. In *GFDRR-World Bank. World Bank*. <https://doi.org/10.1136/bmj.329.7474.1086>
- Stone, H. (2017). *Exposure and vulnerability for seismic risk evaluations* [University College London]. Recuperado de <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10051591>
- Taubenböck, H., Geib, C., & Klotz, M. (2013). D.2.1 Present day and future remote sensing data. *SENSUM Project Derivable*, 1–59.

- Wieland, M. (2014). D2.5 Tool implementing selected techniques for in-situ data collection using ground-based imaging techniques. *SENSUM Project Derivable*, 1–47.
- Wieland, M., Pittore, M., Parolai, S., Zschau, J., Moldobekov, B., & Begaliev, U. (2012). Estimating building inventory for rapid seismic vulnerability assessment: Towards an integrated approach based on multi-source imaging. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 36, 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.01.003>