

# AVANCES EN LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO DEL CANTÓN SANTO DOMINGO DE HEREDIA

## PROGRESS IN SEISMIC RISK ASSESSMENT OF THE SANTO DOMINGO DE HEREDIA CANTON

Mario Fernández<sup>1\*</sup>, Alejandro Calderón<sup>2</sup> y Rafael Bolaños<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Preventec y Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica

<sup>2</sup>Fundación Global Earthquake Model (GEM)

<sup>3</sup>Municipalidad de Santo Domingo

\* Autor para contacto: [mario.fernandezarce@ucr.ac.cr](mailto:mario.fernandezarce@ucr.ac.cr)

(Recibido: 10/08/2018; aceptado: 21/11/2018)

**RESUMEN:** Este es un estudio sobre riesgo sísmico para el cantón Santo Domingo de Heredia, basado en el conocimiento existente sobre la amenaza y la exposición del sector residencial. Se hizo porque es sabido que el área estudiada ha sido afectada por terremotos en el pasado y porque tanto el gobierno local como la comunidad deben estar conscientes de esta y todas las amenazas de su territorio. Conociendo el nivel de amenaza y exposición, los actores locales podrán hacer un manejo del riesgo y mejorar la seguridad, protección y resiliencia de sus habitantes. El trabajo requirió investigación bibliográfica, entrevistas y análisis de datos de condición de viviendas. Los temblores pueden generar Aceleraciones Pico Máximas (PGA) de 0,52-0,6g (g=aceleración de la gravedad) y Aceleraciones Pico Efectiva (APE) de 0,3-0,6g en la zona de estudio. La máxima intensidad de los últimos terremotos en el cantón Santo Domingo fue VI. **Palabras clave:** Riesgo sísmico, exposición, amenaza, pérdidas, vulnerabilidad, Santo Domingo.

**ABSTRACT:** This is a study on seismic risk assessment for the Santo Domingo de Heredia canton, based on existing knowledge about the hazard and exposure of the residential sector. The study was carried out because it is known that the studied area has been affected by earthquakes in the past and because both the local government and the community should be aware about this and all the other natural hazards in their territory. Knowing the level of hazard and exposure, local actors can manage risk effectively and improve the safety, protection and resilience of the inhabitants. The work required bibliographic research, interviews and analysis of housing condition datasets. Earthquakes can generate Peak Ground Accelerations (PGA) up to 0.52-0.6g (g = acceleration of gravity) and Peak Effective Accelerations (PEA) up to 0.3-0.6g in the studied area. The maximum intensity of the last earthquakes in the Santo Domingo canton was VI.

**Keywords:** Seismic risk, exposure, hazard, losses, vulnerability, Santo Domingo.

## INTRODUCCIÓN

En este artículo se hace un primer análisis de riesgo sísmico para el cantón Santo Domingo de Heredia, Costa Rica. El trabajo reúne el conocimiento básico existente sobre la amenaza sísmica, vulnerabilidad estructural de las viviendas y pérdidas anuales esperadas en el sector residencial en caso de la ocurrencia de fuertes sacudidas por sismo. Incluye información sobre temblores que han afectado dicho territorio, estimaciones sobre las aceleraciones que producen los sismos en él y evaluaciones de pérdidas económicas anuales promedio en el sector vivienda. Con fotografía antigua, se demuestra que la amenaza causó importante daño en el pasado en obras del cantón.

Todo cantón de Costa Rica debe contar con la identificación de las amenazas que podrían causar impactos negativos en sus habitantes, lo cual es parte de la identificación del riesgo. En Santo Domingo de Heredia, dicha tarea ya ha sido encaminada a través del proyecto “Determinación del Riesgo de Desastre en Santo Domingo de Heredia”, ejecutado en la Universidad de Costa Rica por uno de los autores.

La investigación se hizo porque se sabe que en el sector central del país hay fuentes sísmicas que en el pasado han provocado temblores destructivos, los cuales han causado mucho daño material y muerte. A raíz de esto, se requiere ahondar en el conocimiento de la amenaza sísmica y el riesgo asociado a escalas más detalladas y plasmar tal conocimiento en documentos sencillos que sean fácilmente entendidos por la población. Las sociedades demandan información que les permita conocer mejor el espacio donde se han establecido y se debe satisfacer tal demanda.

Costa Rica, como miembro de las Naciones Unidas, es parte de los países comprometidos con la reducción significativa del riesgo ante desastres para la década de 2030 con el Acuerdo de Sendai (UNISDR, 2018). Dentro de las prioridades establecidas para el país, se encuentra el entendimiento del riesgo en todas sus dimensiones de amenaza y vulnerabilidad. El objetivo de este trabajo es avanzar hacia

dicho esfuerzo, dando a conocer la amenaza sísmica y su riesgo para Santo Domingo, a fin que ella sea tomada en cuenta en los planes y programas de gestión de riesgo de desastre del cantón. Quizá algunas pocas personas conozcan detalles aislados del tema pero el público, que es el más necesitado de información, casi siempre la ignora y no tiene acceso a ella. Otra razón por la que se ha elaborado este artículo es la necesidad de generar datos que lleguen a ser parte de una plataforma de información a escala nacional sobre riesgos de desastre.

## METODOLOGÍA

El estudio es parte de un proyecto de investigación sobre el riesgo de desastre en el cantón Santo Domingo, cuyo objetivo fue identificar las amenazas, vulnerabilidades y riesgos. Para ello fue necesario recopilar toda la información disponible sobre los factores antes mencionados y usar el conocimiento existente para estimar el potencial de las amenazas. La recopilación incluyó fuentes primarias como son datos sísmicos divulgados por los entes competentes en el país y consultas a la población residente, entre otras. La información secundaria corresponde con estudios previos que abarcan parte o la totalidad de la zona en estudio.

Investigamos la existencia de reportes de daños ocasionados por sismos por medio de entrevistas a personas del cantón y consulta a documentos históricos. De la misma forma, se examinaron las características constructivas del sector residencial a nivel distrital, para efectuar un análisis del capital económico expuesto a los sismos. Para ello, se sometieron todos los datos recopilados por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC, 2011) a un proceso de clasificación condicionada. En dicho proceso se examinó el material de construcción, el piso, el techo, la condición estructural, el tamaño y el tipo de cada vivienda registrada. El resultado fue la clasificación de todas las viviendas en diferentes tipologías estructurales y la derivación del número total de estructuras y personas expuestas a la amenaza en el cantón (Fig. 1). Dicha información fue complementada con la

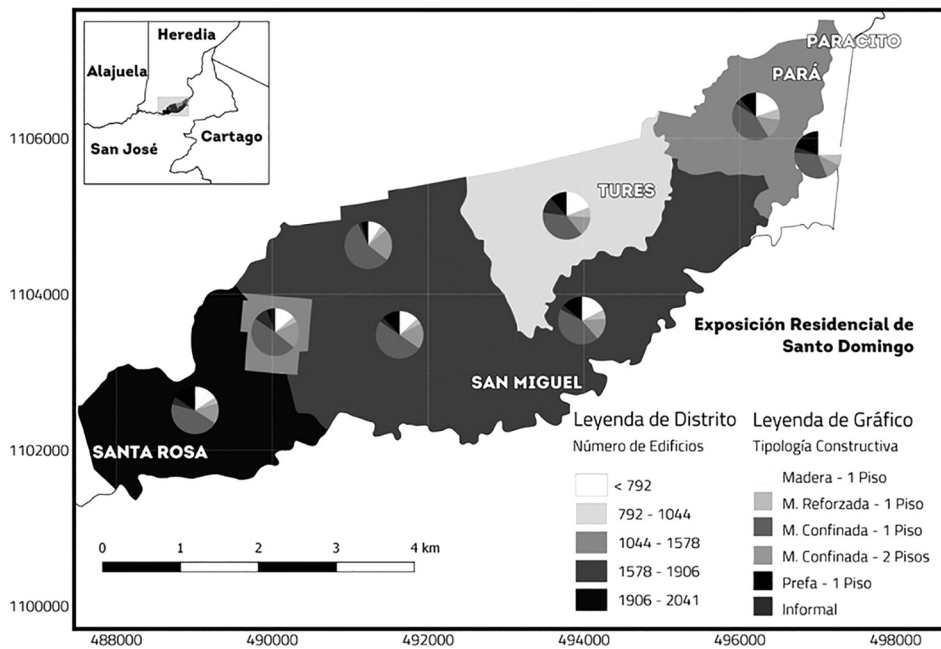


Fig. 1: Exposición residencial del cantón de Santo Domingo, con el número de estructuras y tipología constructiva a nivel distrital.

estimación del costo de reemplazo del inventario completo, para dimensionar el capital económico residencial en Santo Domingo.

El riesgo sísmico se estimó de forma probabilística, combinando modelos de exposición, amenaza y vulnerabilidad desarrollados específicamente para Costa Rica. El modelo de amenaza empleado en esta investigación es el propuesto por Benito, et al. (2012) para la estimación de la amenaza a nivel regional centroamericano.

Para la estimación de la pérdida económica y humana anual promedio, se empleó la metodología de eventos estocásticos. En dicho proceso se generó una simulación de la sismicidad esperada en los próximos 100,000 años para el territorio continental de Costa Rica (Figura 2), utilizando las leyes de recurrencia planteadas en el modelo sismogénico de Benito et al. (2012). El catálogo sintético comprende rupturas en los tres tipos de regiones tectónicas del país: cortical superficial, subducción de interplaca y subducción intraplaca. La mayoría de los eventos en

proximidad a la zona de estudio tienen una magnitud  $M_w$  entre 5,5 y 6,6 y pertenecen al régimen cortical superficial.

La pérdida se calcula para cada uno de los eventos generados por el software libre OpenQuake de la Fundación Global Earthquake Model (GEM por sus siglas en inglés). El software utiliza las mismas leyes de recurrencia (relación frecuencia - magnitud) establecidas en el modelo de amenaza sísmica, para generar una serie de eventos sísmicos dentro de un tiempo de investigación. Esta serie de eventos artificiales es una simulación de la actividad sísmica esperada en el país a futuro. Cada evento se modela como una ruptura real con geometría de falla, epicentro, mecanismo focal y magnitud definidos. Para el caso de Costa Rica, la magnitud mínima utilizada en la generación de los eventos es  $M_w$  4,5 y el tiempo de investigación fue de 100 000 años. El periodo de investigación debe ser lo suficientemente grande para poder generar los eventos de baja probabilidad pero gran potencial destructivo

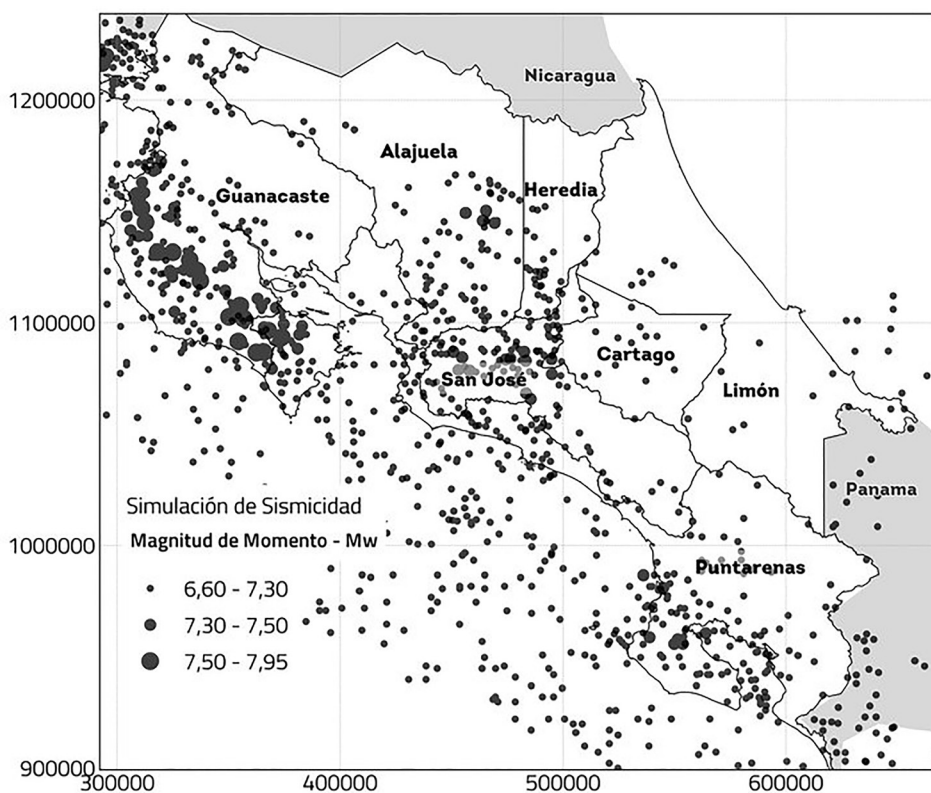


Fig. 2: Serie de eventos generados en la simulación de la sismicidad de Costa Rica. Eventos de  $M_w < 6.6$  se incluyen en el análisis pero no se muestran en la imagen.

(grandes magnitudes en la zona de subducción o la cordillera Volcánica Central). Eventos con magnitudes menores a  $M_w 4,5$  se consideran no destructivos ni dañinos para el sector residencial.

Cuando la suma de todas las pérdidas registradas se divide entre el número de años del análisis, se obtiene la pérdida promedio anual esperada a nivel distrital. Dicho parámetro representa el nivel de pérdida esperado a lo largo del tiempo. Es un indicador de riesgo que permite determinar las zonas geográficas que pierden más valor debido a los eventos sísmicos. Para el caso de Costa Rica, el tiempo de investigación en la simulación es muy elevado (100 000 años) para asegurar la generación de eventos de recurrencia muy baja, pero críticos en la evaluación del riesgo, como sismos superficiales de magnitud alta en el denominado Valle Central.

## RESULTADOS

La amenaza sísmica para el cantón Santo Domingo de Heredia deriva fundamentalmente de las fuentes sísmicas que rodean al cantón, es decir, el fallamiento de las áreas Bajo de la Hondura-Volcán Turrialba, sureste del denominado Valle Central, Belén-Escazú y Poás (Fernández, 2013).

Por los temblores de estas fuentes y los grandes temblores de subducción del país, el territorio domingueño está expuesto a las Aceleraciones Pico Máximas (*Peak Ground Acceleration*) y Aceleraciones Pico Efectivas de las partículas del suelo generadas durante los movimientos sísmicos. De acuerdo con el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica (LIS, 2018), la PGA es la máxima aceleración que sufren las partículas del suelo durante

un muy corto tiempo del sismo. La Aceleración Pico Efectiva (CFIA, 2010) es considerada como una aceleración más representativa de la sacudida del evento y deriva de los diversos estudios de amenaza sísmica. Según el LIS (2018), la Aceleración Pico Efectiva es un 70 a 80% de la Aceleración Pico Máxima y se usa para diseñar obras civiles.

Las PGA en Santo Domingo varían entre 501 y 600 Gales (Benito et al., 2012), para un periodo de retorno de 500 años (un Gal equivale a 1 centímetro por segundo cuadrado ( $1 \text{ cm/s}^2$ )), lo que sería equivalente a 5,1 y 6  $\text{m/s}^2$ . Según CFIA (2010), Santo Domingo de Heredia y todos sus distritos clasifican en lo que se denomina la zona sísmica III. El Código establece 4 tipos de sitios de cimentación (Cuadro 1) y a cada uno de ellos le asigna un valor de Aceleración Pico Efectiva en cada una de las zonas sísmicas.

La mayor parte de la superficie del cantón está cubierta por cenizas sub-recientes de grano fino a intermedio, con un espesor intermedio de aproximadamente 8 metros, que ha dado lugar a suelos limo-arcillosos (Astorga et al., 2011). Según tales autores, dichos materiales califican como rocas semiduras a blandas, arcillificadas, de baja permeabilidad y de baja a regular resistencia. De acuerdo con el cuadro 1, las APE varían entre 0,3 g y 0,36 g en el cantón. Estos valores son un alrededor de un 60% de las PGA reportadas por Benito et al. (2012).

Santo Domingo ha sido afectado principalmente por dos importantes terremotos históricos, el de Cartago de 1910 y el llamado Terremoto de Orotina de 1924 (según Fernández y Doser, 2009, el temblor ocurrió cerca de Quepos). Del primero, don Cleto González Víquez escribió en 1910: “*En Heredia, 24 km al O.N.O (se lee Oeste-Noroeste) de Cartago, rompió repellos y rajó paredes de adobe de ladrillos y también rompió botellas en los establecimientos de licores; iguales daños hizo en los pueblos circunvecinos, derribando además paredes malas de adobe, como en San Rafael, San Isidro, Santa Bárbara, Santo Domingo y Barba*” (González, 1910). El evento de 1924 fue más destructivo; según León (2018) este evento afectó fuertemente la zona de Santo Domingo y causó grandes daños en la Basílica (Fig. 3) como la destrucción de sus torres, el presbiterio y los vitrales originales.

Al respecto (León, 2013) indicó “*A través del tiempo nuestro Templo sufrió el deterioro de sus torres por tres movimientos sísmicos, tocó al Padre Benito ver defraudadas sus doradas ilusiones, dos veces las construyó y dos veces fueron derrumbadas; la tercera vez fue en el terremoto de 1924 y le tocó en suerte al Padre Francisco Mendoza en el año 1927, construir las que hoy se mantienen*”.

Los anteriores efectos sugieren que los terremotos de Cartago 1910 y el de marzo de

Cuadro 1

Sitios de cimentación y APE para la zona sísmica III del Código Sísmico de Costa Rica

Tipo	Descripción	Aceleración Pico Efectiva para la zona III
S1	Un perfil de roca o suelo rígido o denso con propiedades semejantes a la roca	0,3
S2	Un perfil de suelo con condiciones predominantes de medianamente denso a denso o de medianamente rígido a rígido	0,33
S3	Un perfil de suelo con 6 a 12 m de arcilla de consistencia de suave a medianamente rígida o con más de 6 metros de suelo no cohesivos de poca a media densidad	0,36
S4	Un perfil de suelo que contenga un estrato de más de 12 m de arcilla suave	0,36



1924 fueron muy fuertes y de gran impacto para el cantón de Santo Domingo y por ello, el derrumbe parcial de la basílica. Sin embargo, es posible que las técnicas de construcción de la época hayan influido en el daño observado. Es oportuno recordar que aún hoy, Santo Domingo conserva muchas casas de adobe y un aspecto colonial.

Los últimos terremotos de Costa Rica no causaron daño significativo en el cantón. El Terremoto de Limón de 1991 de magnitud 7,6 (Montero et al., 1994), el de Cinchona del 2009 de magnitud 6,2 (Montero et al., 2009) y el de Sámara del 2012 de magnitud 7,6 (Vargas et al., 2012) sacudieron fuertemente, el territorio pero sin dejar secuelas de destrucción. Los tres fueron sentidos con intensidad VI en la zona estudiada (Mora y Yasuda, 1994, Montero et al., 2009, Vargas et al., 2012). De acuerdo con LIS (2018), los daños asociados a tal intensidad son: fuerte movimiento del suelo, temor en la población, desplazamiento de muebles pesados y pocos ejemplos de daño a chimeneas. En general, los daños asociados a esta intensidad son ligeros.

Esa ausencia de daño probablemente obedezca a la buena construcción que existe en el cantón por el buen código sísmico de Costa Rica y al hecho de que la fuente de los temblores se ha ubicado relativamente lejos del mismo. Reyes et al. (2014)

calcularon un índice de resistencia estructural para todo el cantón de Santo Domingo, basado en la condición de la vivienda; de acuerdo con él, la gran mayoría del área del cantón cuenta con viviendas de buena calidad y, probablemente, resistencia a sismos. Los puntos más críticos coinciden con asentamientos humanos conformados por familias de escasos recursos, cuyas viviendas son de poco valor económico y usualmente muy mal construidas. Pero son casas muy livianas, generalmente de madera y latas, que no suelen sufrir daños durante los temblores.

Según el análisis de la exposición, Santo Domingo tiene alrededor de 12 095 estructuras residenciales y 40 000 habitantes. Para visualizar daño por sismos en el cantón, recurrimos al mapa de vulnerabilidad de la figura 4. Dicho mapa se obtuvo al normalizar las pérdidas, es decir, la pérdida de un distrito, la dividimos entre el valor concentrado en el distrito. De esta manera se representa la razón de pérdida por distrito y se puede ver las zonas donde las obras pierden la mayor parte de su valor en el tiempo. Los cantones con las viviendas en peores condiciones son los que tendrían más daños ante la ocurrencia de un sismo, pero ello no significa que esas áreas sean las de mayor pérdida económica. La mayor cantidad de viviendas informales se encontró

Basílica de Santo Domingo. 1926.



Fig. 3: Basílica de Santo Domingo en 1926. Según datos históricos, el terremoto de 1924 destruyó sus torres. Cortesía de Fausto León.

en los distritos de Tures y Santo Domingo. Las estructuras de madera y concreto prefabricado tienen un mayor uso en los distritos de Paracito, Tures y Santa Rosa. Habrá más pérdidas donde haya mayor capital invertido.

El riesgo es la probabilidad de pérdidas y para visualizarlo es necesario realizar un mapa en el que se muestren las pérdidas económicas asociadas a un evento. El valor económico total del inventario para Santo Domingo se estimó en los \$943 millones de dólares. La mayor concentración de capital se encuentra en los distritos occidentales de Santa Rosa, Santo Domingo, San Vicente y Santo Tomás (Fig. 5). La tipología estructural predominante es la mampostería confinada de un solo piso, conformando en los distritos occidentales alrededor del 50% de las estructuras.

El análisis del riesgo mediante eventos estocásticos indicó que en Santo Domingo se puede esperar una pérdida anual promedio que ronda \$1 234 000 dólares. Más de la mitad de las pérdidas provienen de los distritos de San Vicente, Santa Rosa y Santo Tomás. El distrito con la mayor pérdida económica es San Vicente mientras

que el distrito más vulnerable del cantón (la mayor pérdida económica en relación con su capital) es Paracito. Esto se atribuye a la concentración de capital en San Vicente y a la existencia de tipologías particularmente vulnerables en proporciones importantes en Paracito. La figura 5 muestra las pérdidas del cantón a escala distrital.

## CONCLUSIONES

El territorio del cantón Santo Domingo de Heredia es afectado por terremotos de moderada magnitud de la parte central del país y por otros más lejanos de las zonas costeras. Esos sismos pueden producir aceleraciones pico de las partículas del suelo del orden de 500 a 600 Gales, lo que equivale a intensidades de VIII y IX grados en la Escala Mercalli Modificada. Los daños más importantes asociados con esas intensidades son grietas en el suelo, destrucción de obras de baja y mediana calidad y daños a cimientos y armazones de edificios. Si los últimos temblores no han llegado a provocar esos daños en Santo Domingo es por la atenuación de las

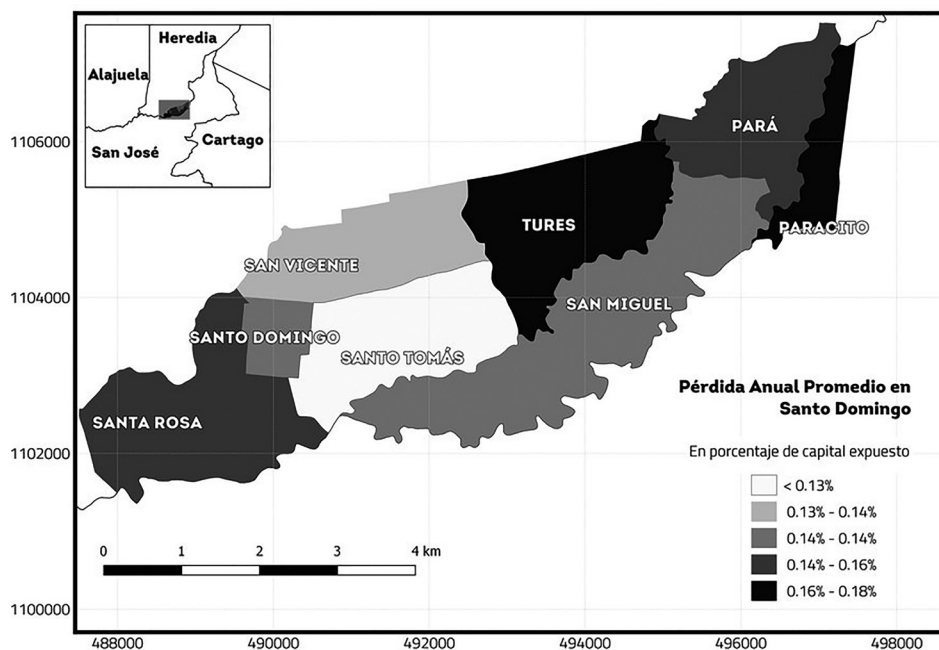


Fig. 4: Mapa de vulnerabilidad de las viviendas ante sismos en el cantón Santo Domingo.

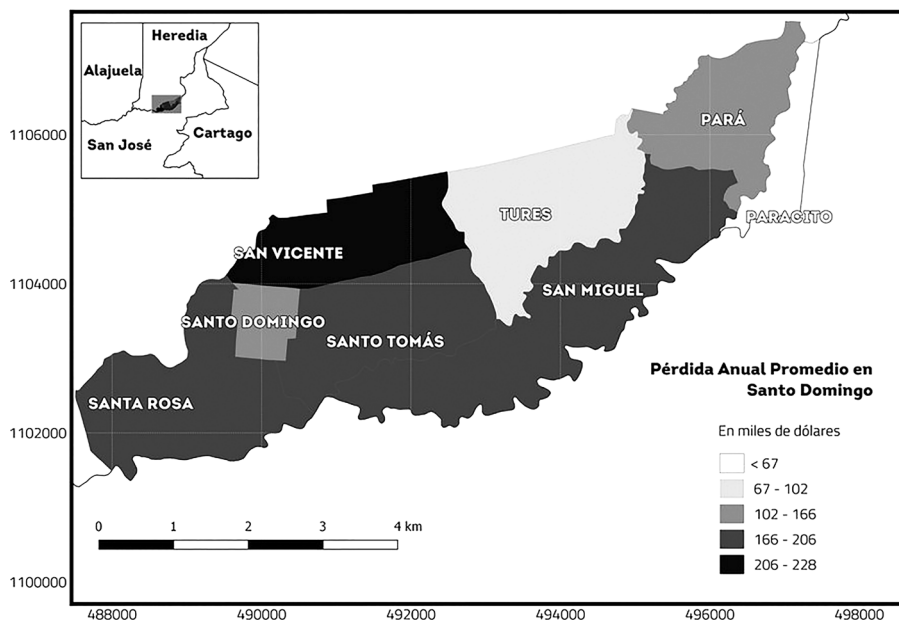


Fig. 5: Pérdida anual promedio esperada para el cantón de Santo Domingo, a nivel de distrito.

ondas sísmicas con la distancia y porque la calidad de las construcciones es muy buena.

Las mayores pérdidas anuales promedio esperadas oscilan entre 206 y 228 mil millones de dólares y serían del distrito San Vicente. Esto se debe a la mayor inversión económica que hay en dicho territorio. Por otro lado, Tures sería el de menos pérdidas, con un valor inferior a 67 mil millones de colones.

### AGRADECIMIENTO

Se agradece a Fausto León la colaboración brindada.

### REFERENCIAS

- Astorga, A., Piedra, M., Chávez, L., Valerín, E. (2011). Informe de Evaluación Ambiental Estratégica del Plan Regulador del Cantón de Santo Domingo, 143 p.
- Benito, M., Lindholm, C., Camacho, E., Climent, A., Marroquin, G., Molina, E., Rojas, W., Escobar, J., Talavera, E., Alvarado, G., Tomas, Y. (2012). A New Evaluation of Seismic Hazard for the Central America Region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(2): 504-523.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos de Costa Rica (INEC). (2011). Censo de Población y Vivienda 1973-2011.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA) de Costa Rica. (2010). Código Sísmico de Costa Rica 2010. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Fernández, M. (2013). Seismotectonic and the hypothetical strike-slip tectonic boundary of Central Costa Rica. In: D'Amico, S., Ed., *Earthquake Research and Analysis-New Advance in Seismology*, INT ECH, Croatia. <http://dx.doi.org/10.5772/54989>
- Fernández, M., Doser, D. (2009). Relocation and Waveform Modelling of the 1924 Orotina, Costa Rica, Earthquake (Ms 7.0), *Tectonophysics*, 479: 197-202.
- González, C. (1910). *Temblores, Terremotos, Inundaciones, Erupciones Volcánicas en Costa Rica 1608-1910*. Tipografía Avelino Alsina, San José, Costa Rica.



- Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS), del Instituto de Investigaciones en Ingeniería (INII) (28-06-2018), *Noticias, informes, actualización e información en general*. San José: Universidad de Costa Rica. Recuperado de <http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=11>
- León, F. (2018). *Basílica de Santo Domingo de Heredia*. Grupo Cívico Domingueño, Santo Domingo de Heredia. Recuperado de <http://grupocivcodomingueno.blogspot.com/p/basilica-de-santo-domingo-de-heredia.html>
- León, F. (2013). *Basílica de Santo Domingo de Guzmán*. Informe inédito.
- Montero, W., Pardo, M., Ponce, L., Rojas, W. Fernández, M., en: Kussmaul, S., Denyer, P. (1994). Terremoto de Limón. *Revista Geológica Central, Volumen Especial, ISSN 0256-7024* 1994.
- Montero, W., Rojas, W., Boschini, I., Barquero, R., Soto, G.J., W., Alvarado, G.E., Vargas, A., Taylor, W., López, A., Climent, A., Moya, A., Peraldo, G., Redondo, C., Taylor, M. (2009). El terremoto de Cinchona. en: Barquero, R. (2009). *El Terremoto de Cinchona del 8 de enero de 2009. Informe interno de la Red Sismológica Nacional (RSN: ICE-UCR)*, 138 p.
- Mora, S., Yasuda, S. Licuefacción de suelos y fenómenos asociados durante el terremoto de Limón, en: Kussmaul, S., Denyer, P. (1994). *Terremoto de Limón. Revista Geológica Central, Volumen Especial, ISSN 0256-7024*.
- Reyes, J., Fernández, M., Solís, D., Bolaños, R. (2014). *Assessment of Physical Vulnerability in Santo Domingo de Heredia, Costa Rica, Central America. World Journal of Engineering and Technology, 2: 78-84*.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR) (28-06-2018) *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030*. United States: United Nations. Recuperado de: <https://www.unisdr.org/we/inform/publications/43291>.
- Vargas, A., Linkimer, L., Barquero, R., Rojas, W., Boschini, I. Intensidades y Principales Efectos, en: Linkimer, L., Soto, G. (2012). *El Terremoto de Sámara del 5 de Setiembre de 2012. Informe interno, Red Sismológica Nacional (RSN: ICE-UCR)*, 134 p.



