



COSTA RICA

TOMO II ANÁLISIS PROBABILISTA DE AMENAZAS Y RIESGOS NATURALES

INFORME TÉCNICO ERN-CAPRA-T2-7 RIESGO SÍSMICO DE SAN JOSÉ



opportunities for all



Evaluación de Riesgos Naturales
- América Latina -
Consultores en Riesgos y Desastres

Consortio conformado por:

Colombia

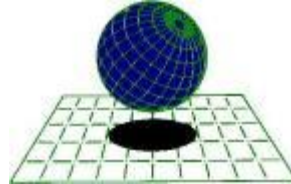
Carrera 19A # 84-14 Of 504
Edificio Torrenova
Tel. 57-1-691-6113
Fax 57-1-691-6102
Bogotá, D.C.



INGENIERIA TECNICA Y CIENTIFICA LTDA

España

Centro Internacional de Métodos Numéricos
en Ingeniería - CIMNE
Campus Nord UPC
Tel. 34-93-401-64-96
Fax 34-93-401-10-48
Barcelona



C I M N E

México

Vito Alessio Robles No. 179
Col. Hacienda de Guadalupe Chimalistac
C.P.01050 Delegación Álvaro Obregón
Tel. 55-5-616-8161
Fax 55-5-616-8162
México, D.F.



ERN Ingenieros Consultores, S. C.

ERN Evaluación de Riesgos Naturales - América Latina
www.ern-la.com

Dirección y Coordinación de Grupos de Trabajo Técnico – Consorcio ERN América Latina

Omar Darío Cardona A.
Dirección General del Proyecto

Luis Eduardo Yamín L.
Dirección Técnica ERN (COL)

Gabriel Andrés Bernal G.
Coordinación General ERN (COL)

Mario Gustavo Ordaz S.
Dirección Técnica ERN (MEX)

Eduardo Reinoso A.
Coordinación General ERN (MEX)

Alex Horia Barbat B.
Dirección Técnica CIMNE (ESP)

Martha Liliana Carreño T.
Coordinación General CIMNE (ESP)

Especialistas y Asesores – Grupos de Trabajo

Miguel Genaro Mora C.
Especialista ERN (COL)

César Augusto Velásquez V.
Especialista ERN (COL)

Karina Santamaría D.
Especialista ERN (COL)

Mauricio Cardona O.
Asistente Técnico ERN (COL)

Andrés Mauricio Torres C.
Asistente Técnico ERN (COL)

Diana Marcela González C.
Asistente Técnico ERN (COL)

Yinsury Sodel Peña V.
Asistente Técnico ERN (COL)

Andrei Garzón B.
Asistente Técnico ERN (COL)

Carlos Eduardo Avelar F.
Especialista ERN (MEX)

Benjamín Huerta G.
Especialista ERN (MEX)

Mauro Pompeyo Niño L.
Especialista ERN (MEX)

Isaías Martínez A.
Asistente Técnico ERN (MEX)

Edgar Osuna H.
Asistente Técnico ERN (MEX)

José Juan Hernández G.
Asistente Técnico ERN (MEX)

Marco Torres
Asesor Asociado (MEX)

Johner Venicio Correa C.
Asistente Técnico ERN (COL)

Mabel Cristina Marulanda F.
Especialista CIMNE(ESP)

Jairo Andrés Valcarcel T.
Especialista CIMNE(ESP)

Juan Pablo Londoño L.
Especialista CIMNE(ESP)

René Salgueiro
Especialista CIMNE(ESP)

Nieves Lantada
Especialista CIMNE(ESP)

Álvaro Martín Moreno R.
Asesor Asociado (COL)

Mario Díaz-Granados O.
Asesor Asociado (COL)

Liliana Narvaez M.
Asesor Asociado (COL)

Asesores Nacionales

Osmar E. Velasco
Guatemala

Sandra Zúñiga
Nicaragua

Alonso Brenes
Costa Rica

Banco Mundial – Gestión de Riesgo de Desastres / Región Latinoamérica y el Caribe

Francis Ghesquiere
Coordinador Regional

Oscar A. Ishizawa
Especialista

Joaquín Toro
Especialista

Fernando Ramírez C.
Especialista

Edward C. Anderson
Especialista

Stuart Gill
Especialista

Banco Interamericano de Desarrollo – Medio Ambiente / Desarrollo Rural / Desastres Naturales

Flavio Bazán
Especialista Sectorial

Cassandra T. Rogers
Especialista Sectorial

Hori Tsuneki
Consultor Interno

LIMITACIONES Y RESTRICCIONES

La aplicación que aquí se presenta es de carácter ilustrativo y presenta limitaciones y restricciones debido al nivel de resolución de la información disponible, de lo cual debe ser consciente el usuario final para efectos de poder dar un uso adecuado y consistente a los resultados obtenidos teniendo en cuenta el tipo de análisis realizado, el tipo y calidad de datos empleados, el nivel de resolución y precisión utilizado y la interpretación realizada. En consecuencia es importante señalar lo siguiente:

- Los modelos utilizados en los análisis tienen simplificaciones y supuestos para facilitar el cálculo que el usuario debe conocer debidamente. Éstas están descritas en detalle en los informes técnicos respectivos (ver referencias).
- Los análisis se han desarrollado con la mejor información disponible que presenta limitaciones en su confiabilidad y su grado actualización. Es posible que exista información mejor y más completa a la cual no se tuvo acceso.
- La información utilizada y los resultados de los análisis de amenaza, exposición y riesgo tienen una asociado un nivel de resolución según las unidades de análisis utilizadas, lo que se explica en el documento descriptivo del ejemplo.
- El uso que el usuario final le dé a la información no compromete a los autores de los estudios realizados, quienes presentan este ejemplo como lo que puede ser factible de hacer si se cuenta con información confiable con la precisión adecuada.
- Es responsabilidad del usuario comprender el tipo de modelo utilizado y sus limitaciones, la resolución y calidad de los datos, las limitaciones y suposiciones de los análisis y la interpretación realizada con el fin de darle a estos resultados un uso adecuado y consistente.
- Ni los desarrolladores del software, ni los promotores o financiadores del proyecto, ni los contratistas o subcontratistas que participaron en las aplicaciones o ejemplos de uso de los modelos asumen ninguna responsabilidad por la utilización que el usuario le dé a los resultados que aquí se presentan, por lo tanto están libres de responsabilidad por las pérdidas, daños, perjuicios o efectos que pueda derivarse por la utilización o interpretación de estos ejemplos demostrativos.

Tabla de Contenido

1	Introducción y objetivo	1-1
2	Metodología de evaluación del riesgo.....	2-1
3	Amenaza sísmica de Costa Rica.....	3-1
3.1	Eventos Históricos	3-1
3.2	Entorno Local de la Amenaza	3-1
3.3	Microzonificación sísmica de la ciudad	3-2
3.4	Estimación determinista.....	3-3
3.5	Estimación probabilista.....	3-4
4	Inventario de Elementos Expuestos	4-1
4.1	Levantamiento de la Información	4-1
4.2	Información de exposición por predios.....	4-2
4.3	Información de vulnerabilidad	4-6
5	Resultados de la Evaluación	5-1
5.1	Escenario determinista	5-1
5.1.1	Mapas de riesgo por distritos.....	5-2
5.2	Escenario probabilista	5-4
5.2.1	Resultados generales	5-4
5.2.2	Mapas de riesgo por distritos.....	5-6
6	Acciones Recomendadas	6-1
7	Referencias	7-1

Índice de figuras

FIGURA 3-1 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ESPECTRAL PARA UN SUELO TÍPICO DE SAN JOSÉ	3-3
FIGURA 3-1 ACELERACIONES MÁXIMAS [CM/S ²] EN TERRENO FIRME PARA ESCENARIO SÍSMICO.....	3-3
FIGURA 3-2 MAPAS DE ACELERACIÓN MÁXIMA DEL TERRENO [CM/S ²] PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO.	3-4
FIGURA 3-3 MAPAS DE ACELERACIÓN ESPECTRAL [CM/S ²] A NIVEL DE TERRENO FIRME. (T _{RET} = 500 AÑOS)	3-5
FIGURA 4-1 MAPA DE ZONAS URBANAS HOMOGÉNEAS DE SAN JOSÉ.....	4-1
FIGURA 4-2 DISTRIBUCIÓN DE VALORES EXPUESTOS Y EDIFICACIONES POR SISTEMAS ESTRUCTURALES.....	4-3
FIGURA 4-3 DISTRIBUCIÓN DE OCUPACIÓN POR SISTEMAS ESTRUCTURALES	4-3
FIGURA 4-4 DISTRIBUCIÓN DE SISTEMAS ESTRUCTURALES ASIGNADOS A LOS PREDIOS	4-4
FIGURA 4-5 DISTRIBUCIÓN DEL VALOR FÍSICO DE PREDIOS	4-4
FIGURA 4-6 DISTRIBUCIÓN DEL NIVEL DE OCUPACIÓN DE PREDIOS. ESCENARIO DÍA.....	4-5
FIGURA 4-7 DISTRIBUCIÓN DEL NIVEL DE OCUPACIÓN DE PREDIOS. ESCENARIO NOCHE.....	4-5
FIGURA 4-8 CURVAS DE VULNERABILIDAD PARA LOS TIPOS ESTRUCTURALES ASIGNADOS	4-7
FIGURA 5-1 VALOR FÍSICO EXPUESTO, PÉRDIDA FÍSICA Y NÚMERO DE EDIFICACIONES POR SISTEMA ESTRUCTURAL	5-2
FIGURA 5-2 OCUPACIÓN Y PÉRDIDA DE VIDAS POR SISTEMA ESTRUCTURAL.....	5-2
FIGURA 5-3 PÉRDIDA FÍSICA AGRUPADA POR DISTRITOS.....	5-3
FIGURA 5-4 NÚMERO DE VÍCTIMAS AGRUPADAS POR DISTRITOS. ESCENARIO DÍA.....	5-3
FIGURA 5-5 NÚMERO DE VÍCTIMAS AGRUPADAS POR DISTRITOS. ESCENARIO NOCHE	5-4
FIGURA 5-6 RESULTADOS ANÁLISIS (IZQUIERDA: CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS, DERECHA: PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS PARA DIFERENTES PERIODOS DE EXPOSICIÓN)	5-5
FIGURA 5-7 PÉRDIDA ANUAL ESPERADA POR SISTEMA ESTRUCTURAL.....	5-5
FIGURA 5-8 PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE.....	5-6
FIGURA 5-9 PÉRDIDA ANUAL ESPERADA AGRUPADA POR DISTRITOS	5-6

Índice de tablas

TABLA 3-1 PRINCIPALES TERREMOTOS DE COSTA RICA	3-1
TABLA 3-2 ACELEROGRAMAS EMPLEADOS EN EL CÁLCULO DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE LOS SUELOS DE SAN JOSÉ.....	3-2
TABLA 4-1 VALORES EXPUESTOS Y OCUPACIÓN POR SISTEMAS ESTRUCTURALES	4-2
TABLA 4-2 DESCRIPCIÓN DE LOS DIFERENTES SISTEMAS ESTRUCTURALES ASIGNADOS.....	4-6
TABLA 4-3 DESCRIPCIÓN DE LOS TIPOS ESTRUCTURALES DEFINITIVOS	4-6
TABLA 5-1 VALORES EXPUESTOS Y PÉRDIDAS ECONÓMICAS POR SISTEMA ESTRUCTURAL.....	5-1
TABLA 5-2 VALORES EXPUESTOS Y AFECTACIÓN HUMANA POR SISTEMA ESTRUCTURAL	5-2
TABLA 5-3 RESULTADOS GENERALES PARA SAN JOSÉ.....	5-4
TABLA 5-4 VALORES EXPUESTOS Y PERDIDAS POR SISTEMA ESTRUCTURAL.....	5-5

1 Introducción y objetivo

El territorio costarricense presenta una alta actividad sísmica, generada principalmente por la interacción tectónica de las placas Cocos y Caribe, y en menor medida, por rompimientos corticales o fallas geológicas superficiales. Este ambiente tectónico da origen a una relativamente alta recurrencia de terremotos de magnitudes intermedias y altas, lo que implica niveles de riesgo considerables sobre la población e infraestructura expuestas.

Considerando la alta exposición en términos de infraestructura y de población a altos niveles de amenaza sísmica, resulta prioritario que la ciudad de San José cuente con planes de contingencia y atención de emergencias, programas para la reducción y mitigación del riesgo y esquemas adecuados de protección financiera, que le permitan prevenir o cubrir las pérdidas asociadas a un terremoto importante y que le den bases a la ciudad para enfrentar con mayor eficiencia una posible situación de desastre generada por un evento sísmico con características catastróficas.

La ciudad de San José, capital de la República de Costa Rica, pertenece al Gran Área Metropolitana del Valle Central de Costa Rica (GAM), el cual se constituye a partir de la conurbación de poblaciones en los cantones de San José, Alajuela, Heredia y Cartago. El GAM cuenta con aproximadamente 2.6 millones de habitantes y tiene una extensión aproximada de 2.044 Km². Corresponde al centro poblado más grande e importante de Costa Rica, albergando alrededor del 57% de la población del país.

En el proceso de conocimiento y evaluación del riesgo que se deriva de la ocurrencia de terremotos, se deben identificar condiciones de la ciudad relativas a la exposición del capital físico y humano y su distribución geográfica, la vulnerabilidad física y de la población y del potencial de daños y pérdidas que podrían presentarse. A través de un procedimiento de este tipo es posible contar con información útil para la toma de decisiones por parte de los funcionarios encargados de la planeación y desarrollo, al poderse estimar la magnitud del impacto económico y social para la ciudad y el país. Así mismo, se pueden establecer parámetros para la formulación de planes dentro de la gestión ex ante y ex post del riesgo de desastres.

El objetivo de la simulación que se presenta más adelante consiste en evaluar el riesgo sísmico potencial de la ciudad de San José en términos de pérdidas económicas anuales esperadas (PAE), pérdidas máximas probables (PML) y afectación directa sobre la población. El análisis se realiza tanto en términos probabilistas como en función de escenarios deterministas correspondientes a posibles sismos ocurridos en el pasado o que pudiesen presentarse en el futuro.

Los resultados de la simulación se presentan de manera que puedan ser usados para análisis detallados posteriores y como insumos para la preparación del plan de contingencia o de atención de emergencias, la formulación de planes de reducción de la vulnerabilidad física, y para plantear posibles estrategias de financiación de las pérdidas esperadas. Las evaluaciones realizadas incluyen:

- (a) Valoración de las pérdidas económicas para el escenario seleccionado.
- (b) Estimación del número de viviendas afectadas (con algún tipo de daño) y de viviendas gravemente afectadas (con posible colapso parcial o total).
- (c) Determinación aproximada del número de personas afectadas por los daños en las viviendas y que requieren reubicación temporal o reemplazo de la vivienda.
- (d) Estimativo de víctimas humanas y su distribución geográfica.

2 Metodología de evaluación del riesgo

Para la evaluación del riesgo sísmico de la ciudad de San José se siguió la metodología propuesta en el marco de la iniciativa CAPRA la cual se describe en detalle en el informe ERN-CAPRA-T1-6 (Metodología de Análisis de Riesgos y sus Aplicaciones, ERN 2009), y en el sitio www.ecapra.org. La metodología para la evaluación del riesgo sísmico de San José incluyó los siguientes aspectos:

- (a) Evaluación de la amenaza sísmica: ésta se evalúa mediante un análisis probabilístico (PSHA - Probabilistic Seismic Hazard Analysis) y mediante escenarios específicos determinísticos. El primero permite obtener resultados relacionados con pérdidas anuales esperadas para cada uno de los bienes y para el portafolio en general. El segundo permite obtenerla pérdida esperada para cada bien y el portafolio en general dada la eventual ocurrencia del evento seleccionado en el escenario.
- (b) Inventario de bienes expuestos: dado que no fue posible contar con la información catastral detallada de la ciudad se recurrió a la conformación de un inventario de activos expuestos basado en indicadores de población y densidad de construcciones promedio por zonas. Este análisis resulta en una base de datos virtual que tiene las propiedades de densidad y ocupación reportadas oficialmente para las diferentes zonas de la ciudad.
- (c) Funciones de vulnerabilidad: los diferentes tipos constructivos identificados en la zona se caracterizan mediante una función de vulnerabilidad que da cuenta de la capacidad de la edificación para resistir la acción sísmica. Estas funciones de vulnerabilidad representan el comportamiento esperado (probable) de las edificaciones de cada tipo estructural particular, por lo que su uso es adecuado en términos estadísticos cuando existe un inventario amplio de activos expuestos.
- (d) Evaluación del riesgo: la evaluación del riesgo se lleva a cabo mediante el asocio de la amenaza sísmica considerada sobre el inventario de activos expuestos con las funciones de vulnerabilidad sísmica relacionadas. Para el efecto se emplea la herramienta de evaluación de riesgo CAPRA-GIS (ERN 2009). Se evalúa, entonces, el porcentaje de daños esperado en cada una de las edificaciones expuestas para cada uno de los escenarios planteados y para el análisis probabilista integral. La valoración del riesgo sísmico se presenta en términos de estimaciones de:
 - Porcentaje de afectación física de las construcciones.
 - Pérdidas económicas directas aproximadas asociadas al daño en las construcciones
 - Afectación humana en términos de pérdida de vidas.
 - Pérdidas económicas máximas probables.
 - Pérdidas anuales esperadas.

3 Amenaza sísmica de Costa Rica

La amenaza sísmica para la ciudad de San José se calculó empleando los avances presentados en el proyecto regional RESIS II (NORSAR et. al. 2008), el cual constituye el estudio más avanzado a la fecha con relación a evaluación de amenaza sísmica en América Central. A partir de la sismotectónica de la región, y la sismicidad registrada e histórica, se definieron una serie de fuentes sismogénicas, las cuales cubren la totalidad del territorio centroamericano, y conservan las condiciones de sismicidad generales y su variación regional.

El modelo de amenaza sísmica de Costa Rica se presenta en detalle en el informe ERN-CAPRA-T2-3 (Modelación Probabilista de Amenazas Naturales, ERN 2009). Las bases teóricas del modelo de amenaza se presentan en el informe ERN-CAPRA-T1-3 (Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales y Selección, ERN2009). Toda la información anterior se encuentra también descrita en detalle en el sitio www.ecapra.org.

3.1 Eventos Históricos

Varios eventos sísmicos importantes, ocurridos en la historia reciente de Costa Rica, ratifican la alta sismicidad del país. Se destacan los terremotos de Cartago (4 de Mayo de 1910), Limón (22 de Abril de 1991) y Chinchona (8 de Enero de 2009), todos con un alto poder destructivo y con consecuencias importantes para la población y la economía del país. La Tabla Tabla 3-1 resume los efectos principales de estos terremotos.

*Tabla 3-1
Principales terremotos de Costa Rica*

Sismo	Fecha	Nº de Muertos	Nº de afectados	Daños en millones de US
Cartago	04-may-1910	362		
Limón	22-abr-1991	47		181
Chinchona	09-ene-2009	23	128,000	492

3.2 Entorno Local de la Amenaza

Costa Rica se encuentra ubicada en la zona de interacción de las placas Cocos y Caribe, en el inicio de la zona de subducción. Al suroriente del país se inicia el punto triple o zona de convergencia de las placas Cocos, Caribe y Nazca, en la región de Golfo Dulce. Esta zona de convergencia posee una alta sismicidad, razón por la cual es común la presencia de enjambres sísmicos en esta región del país.

La subducción es capaz de generar eventos sísmicos de magnitud importante (8+), a profundidades que son variables a medida que se adentra en el continente, siendo más probable la generación de un sismo relativamente superficial en cercanías a la costa Pacífica. Esta situación implica una importante amenaza por tsunamis sobre la infraestructura y poblaciones expuestas en toda la costa del Pacífico del país.

3.3 Microzonificación sísmica de la ciudad

San José cuenta con un estudio de microzonificación sísmica mediante el cual se establecen los espectros de diseño en los diferentes sectores de la ciudad (Schmidt et. al. 2005). Este estudio está basado en la respuesta dinámica de los suelos blandos de la ciudad, caracterizados a partir de mediciones geofísicas y de la mejor información disponible. Dicho estudio considera espesores de suelos blandos de hasta 50m, con periodos fundamentales de vibración de alrededor de 0.5seg.

En este estudio se incluyeron los efectos de sitio en la modelación de la amenaza de la ciudad por medio de funciones de transferencia espectral, las cuales relacionan la intensidad máxima del movimiento en roca, con el nivel de amplificación del movimiento en superficie, para diferentes periodos estructurales.

El suelo típico de la ciudad se modeló como un suelo blando de 50 metros de espesor, con velocidad de onda de corte promedio de 320m/s, con un correspondiente periodo fundamental de 0.48seg. Se adoptaron los modelos de degradación de rigidez y amortiguamiento propuestos por Dobry & Vucetic en 1987, para limos y arcillas plásticas con índices de plasticidad entre 10 y 40. Empleando el programa SHAKE (Schnabel et. al. 1972), se sometió la columna de suelo a movimiento fuerte empleando los acelerogramas relacionados en la Tabla 3-2, escalados a niveles de aceleración máxima entre 0.05 y 0.4 g. La función de transferencia espectral resultante se presenta en la Figura 3-1.

Tabla 3-2

Acelerogramas empleados en el cálculo de la respuesta dinámica de los suelos de San José.

Sismo	País	Fecha	Magnitud	Distancia (km)	Duración (seg)	Amax Registrada (g)	Amax Utilizada (g)
Chalfant Valley	U.S.A	21/07/86	6.2	50	39.81	0.051	0.05
Georgia	U.R.S.S	15/06/91	6.2	52	38.17	0.046	0.05
Palm Springs	U.S.A	08/07/86	6.0	63	24.00	0.053	0.05
Anza	U.S.A	08/07/86	6.0	26	24.00	0.113	0.10
Armenia - Bocatoma	Colombia	19/01/99	6.2	42	31.92	0.084	0.10
Imperial Valley	U.S.A.	15/10/79	6.5	36	28.28	0.109	0.10
Irpinia	Italia	23/11/80	6.5	33	36.34	0.199	0.20
Whittier Narrows	U.S.A	10/01/87	6.0	10	29.96	0.199	0.20
San Fernando	U.S.A	09/02/71	6.6	27	29.66	0.212	0.20
Coalinga	U.S.A.	22/07/83	5.7	12	21.30	0.375	0.40
Northridge	U.S.A.	17/01/94	6.7	35	30.33	0.493	0.40
Park Field	U.S.A.	28/06/66	6.1	10	30.33	0.356	0.40

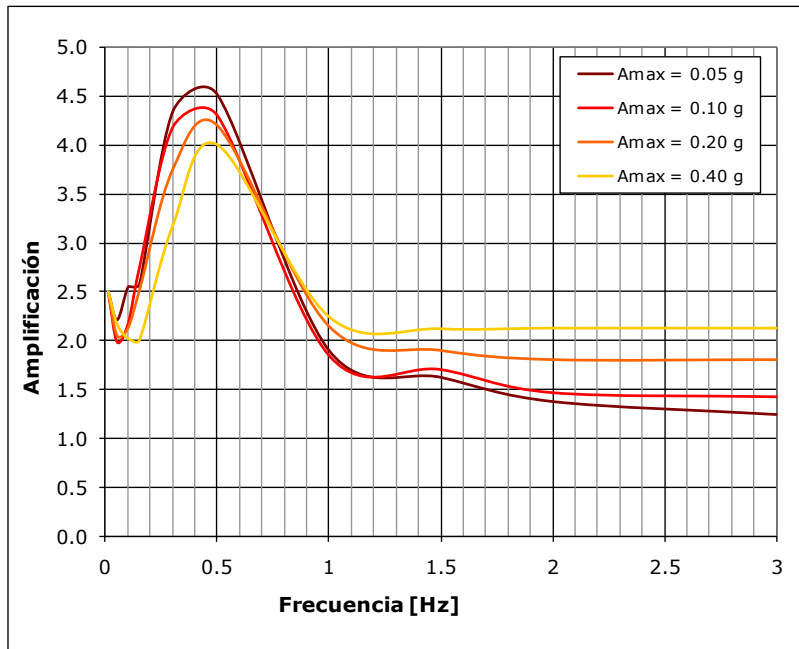


Figura 3-1
Función de transferencia espectral para un suelo típico de San José

3.4 Estimación determinista

La amenaza sísmica basada en eventos deterministas o escenarios específicos se evaluó para un sismo de magnitud 7.0 con epicentro a 5 km hacia el norte de San José y con una profundidad de 15 km. Se considera que este evento generaría un escenario representativo de la peor situación que podría presentarse en la ciudad, por lo cual se considera que es adecuado como insumo para el desarrollo de un plan de contingencia, para formular procedimientos de emergencia por entidades y con fines de proponer programas de mitigación y reducción de la vulnerabilidad. La Figura 3-2 presenta las aceleraciones máximas en terreno firme generadas por el evento seleccionado.

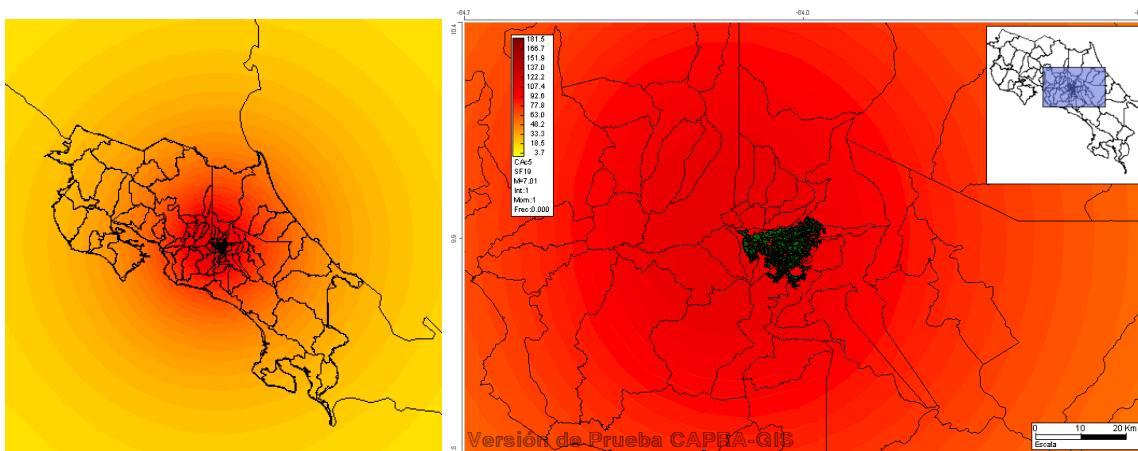


Figura 3-2
Aceleraciones máximas [cm/s²] en terreno firme para escenario sísmico

3.5 Estimación probabilista

Para el análisis probabilista se calcularon un total de 8,616 escenarios de terremoto, cada uno de ellos asociado a una frecuencia de ocurrencia determinada, y que corresponden al conjunto de sismos que representan las diferentes posibilidades de ocurrencia en términos de ubicación, magnitud y profundidad.

En la Figura 3-3 se presentan mapas de amenaza probabilista del país en términos de aceleración máxima a nivel de terreno firme cm/s^2 , calculado para periodos de retorno de 100, 250, 500, 1000, 2500 y 5000 años. Por otro lado en la Figura 3-4 se presentan mapas de aceleración espectral en cm/s^2 , para un periodo de retorno de 500 años y para periodos estructurales de $T= 0.0, 0.1, 0.15, 0.3, 0.5, 1.0$ y 2.0 seg.

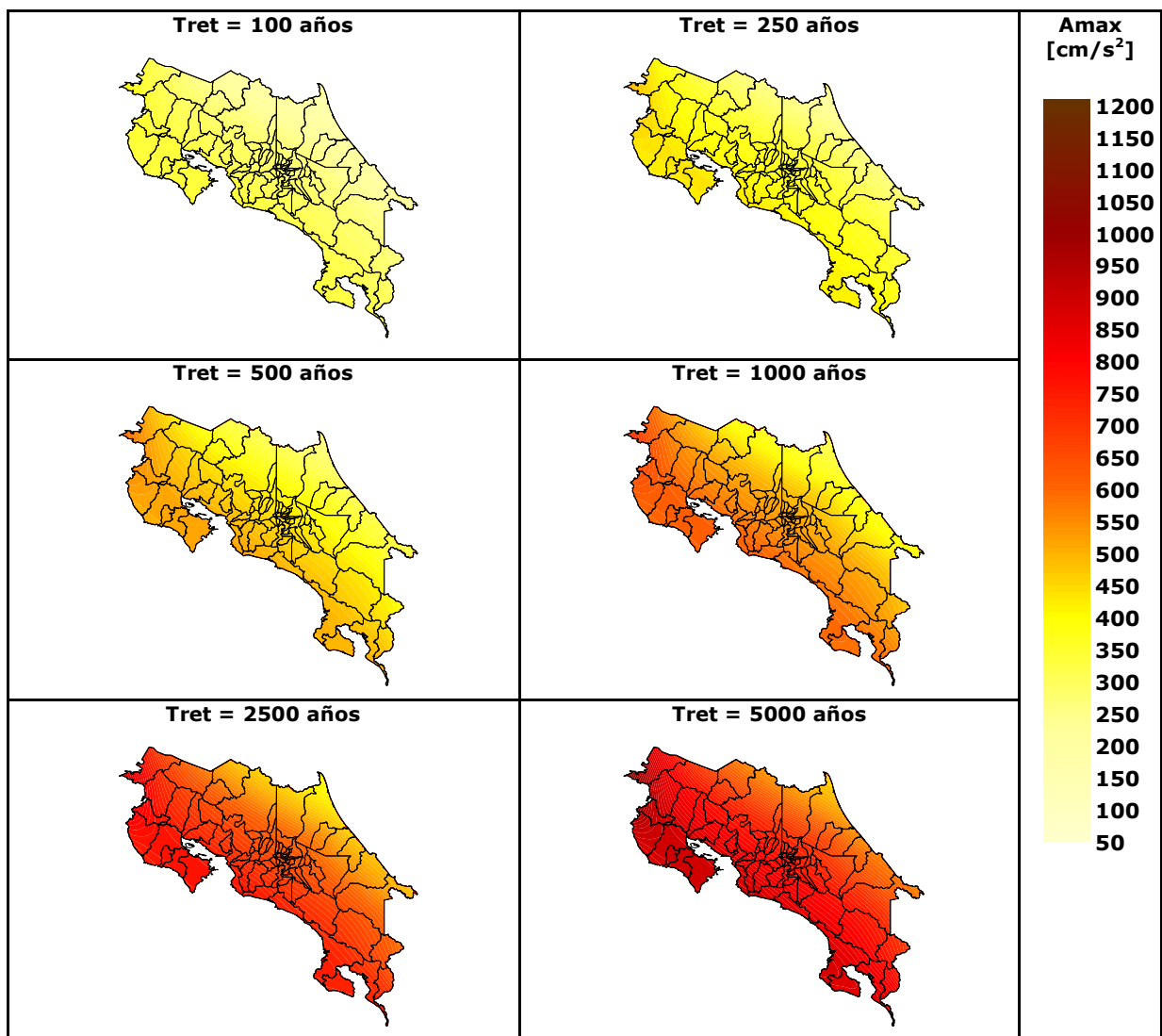


Figura 3-3
Mapas de aceleración máxima del terreno [cm/s^2] para diferentes periodos de retorno.

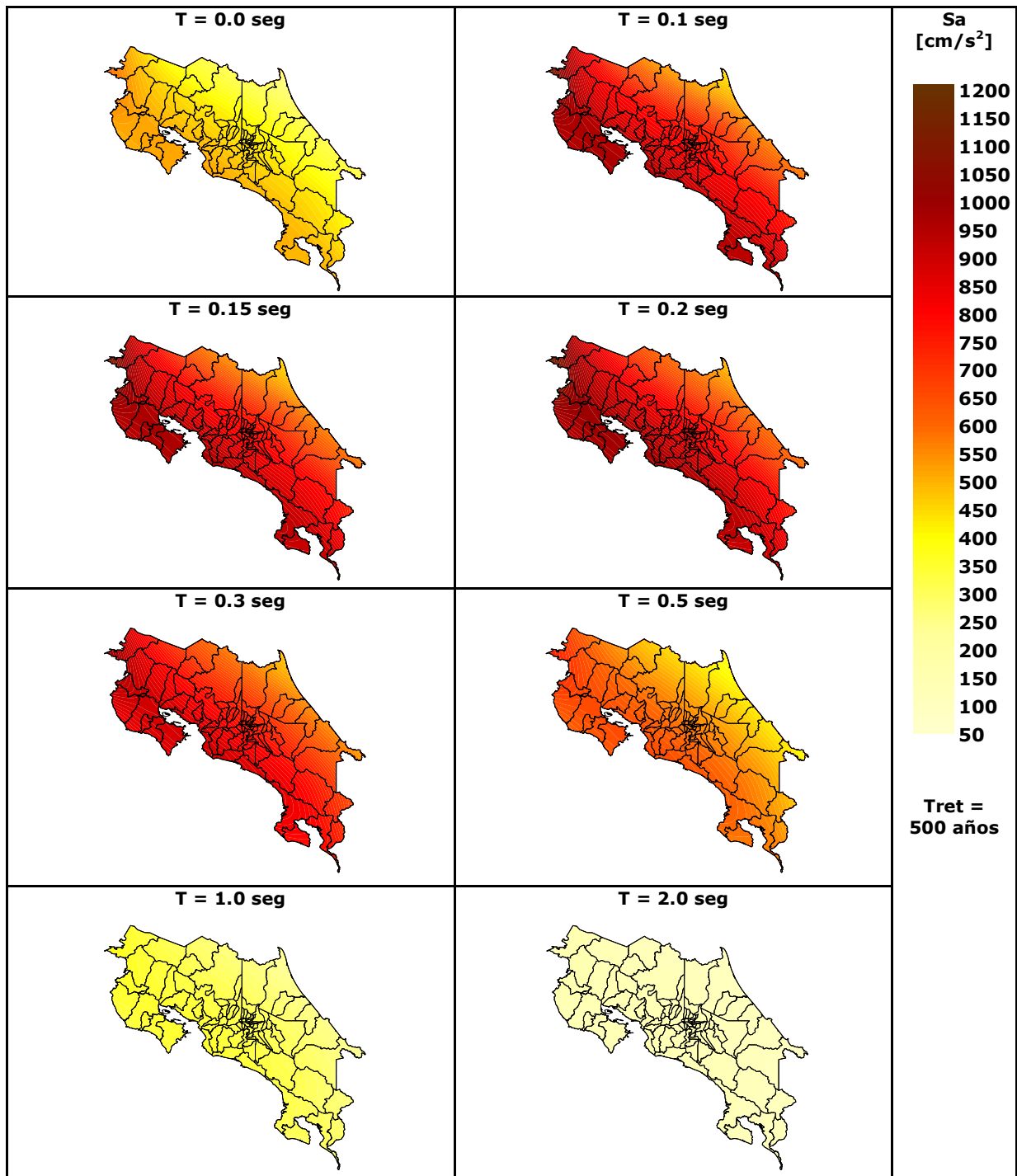


Figura 3-4

Mapas de aceleración espectral [cm/s²] a nivel de terreno firme. (Tret = 500 años)

4 Inventario de Elementos Expuestos

4.1 Levantamiento de la Información

Dado que no fue posible conseguir la información catastral oficial de la ciudad, se procedió a hacer un levantamiento empleando la herramienta web de Zonificación Urbana de CAPRA (disponible en www.ecapra.org/zonhu.php). Dicha herramienta permite identificar, sobre imágenes satelitales de Google Maps, zonas de exposición homogénea, es decir, zonas en donde pueden identificarse condiciones de uso, niveles de ocupación, costo y densidades de construcción similares. Cada zona es luego calificada en términos de porcentajes identificados de tipos constructivos, con relación a lo observado durante el levantamiento. El mapa de zonas homogéneas de la ciudad se presenta en la Figura 4-1.

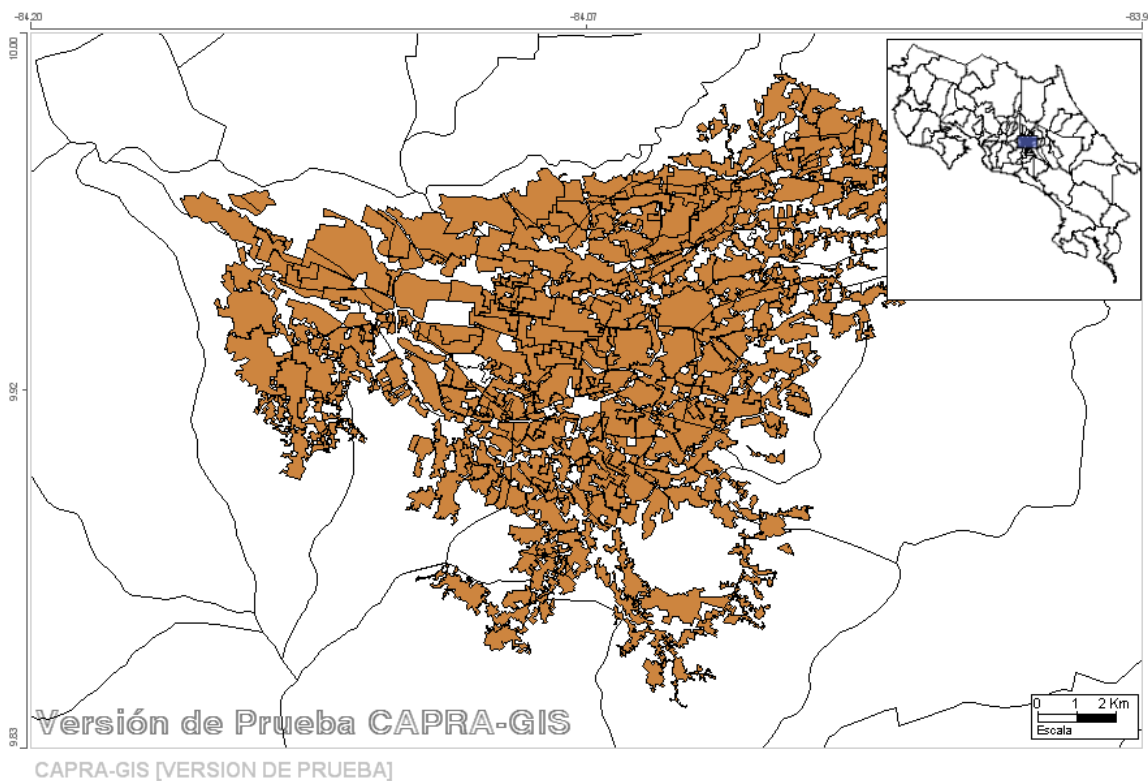


Figura 4-1
Mapa de zonas urbanas homogéneas de San José

Estas zonas homogéneas fueron luego discretizadas, para simular los predios de la ciudad. El proceso de discretización consiste en ubicar aleatoriamente puntos dentro de cada zona homogénea, asignando a cada punto un costo y ocupación consistente con los valores identificados en la zona, y un tipo constructivo en función de los porcentajes previamente definidos. El número total de predios ubicados por zona es consistente con la densidad de construcciones identificada en el levantamiento.

4.2 Información de exposición por predios

La base de datos de predios virtual conformada como se explicó anteriormente cuenta con cerca de 303,000 edificaciones y una población de 1'534,994 habitantes. Debe tenerse en cuenta que las zonas homogéneas levantadas, y en consecuencia, los predios asignados mediante el proceso de discretización predial, se encuentran ubicados en su totalidad en la provincia de San José, por lo que los valores acá presentados no corresponden a la totalidad del GAM.

Las condiciones de exposición de San José, medidas en términos de valor de reposición y número de ocupantes de las edificaciones, se encuentran claramente identificadas en la base de exposición levantada. Constituye la mejor información disponible a la fecha, al permitir establecer distribución geográfica de sistema estructural y número de pisos, los cuales son los principales determinantes de la vulnerabilidad asociada a cada predio.

Con el fin de tomar en cuenta posibles variaciones en el nivel de ocupación en función de la hora del día, se definieron dos escenarios de ocupación diferentes de los predios de San José. El primer escenario representa la condición de ocupación en la noche, donde casi la totalidad de la población se encuentra ubicada en predios de tipo residencial. El segundo escenario es representativo de una condición de ocupación en el día, en donde la población se encuentra repartida en predios de tipo industrial, comercial e institucional, y en menor medida en predios de tipo residencial, junto con un cierto porcentaje que no se encuentra bajo techo.

La Tabla 4-1, Figura 4-2 y Figura 4-3 presentan la distribución general de valores expuestos y ocupación de edificaciones, para los diferentes tipos estructurales identificados y los escenarios definidos.

Tabla 4-1
Valores expuestos y ocupación por sistemas estructurales

Sistema	N° edificaciones	Valor Físico [\$USD x10⁶]	Ocupación Día [Hab]	Ocupación Noche [Hab]
Mampostería Estructural	103,756	\$11,678	359,036	469,579
Mampostería Simple	76,180	\$6,080	396,943	521,130
Madera	73,077	\$5,668	395,341	524,206
Pórticos de Concreto	49,806	\$7,386	81,816	20,079
TOTAL	302,819	\$30,813	1,233,136	1,534,994

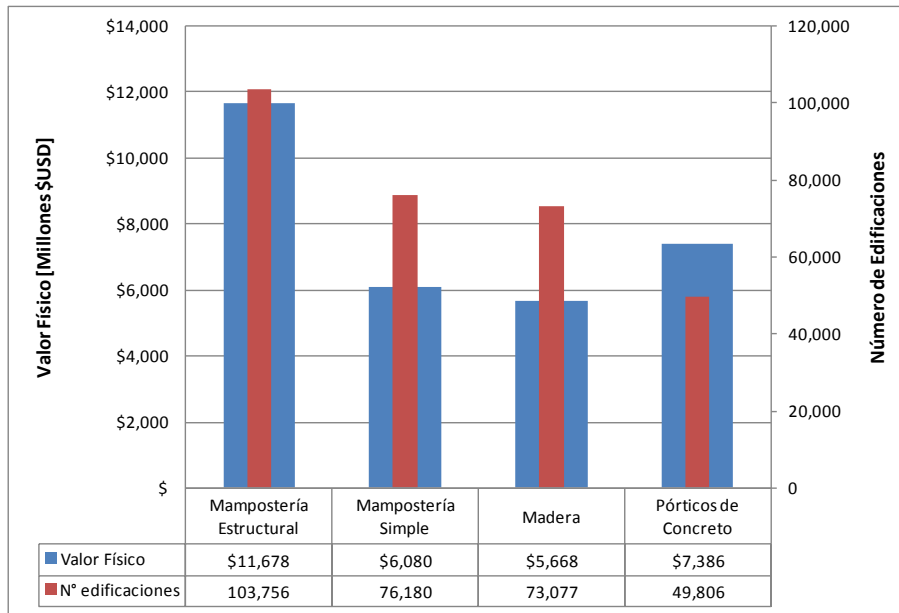


Figura 4-2

Distribución de valores expuestos y edificaciones por sistemas estructurales

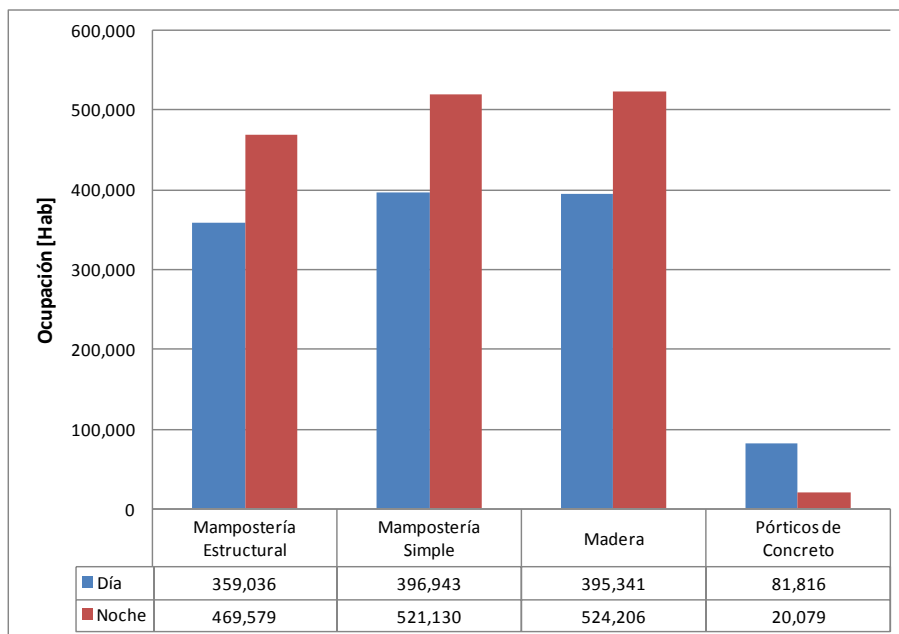


Figura 4-3

Distribución de ocupación por sistemas estructurales

Las Figuras siguientes presentan mapas de distribución geográfica de las principales variables de exposición asignadas a la base de datos de predios generada para San José. Los mapas se encuentran dibujados predio por predio, tomando los predios como puntos con una localización geográfica asignada por medio del algoritmo de discretización predial explicado anteriormente.

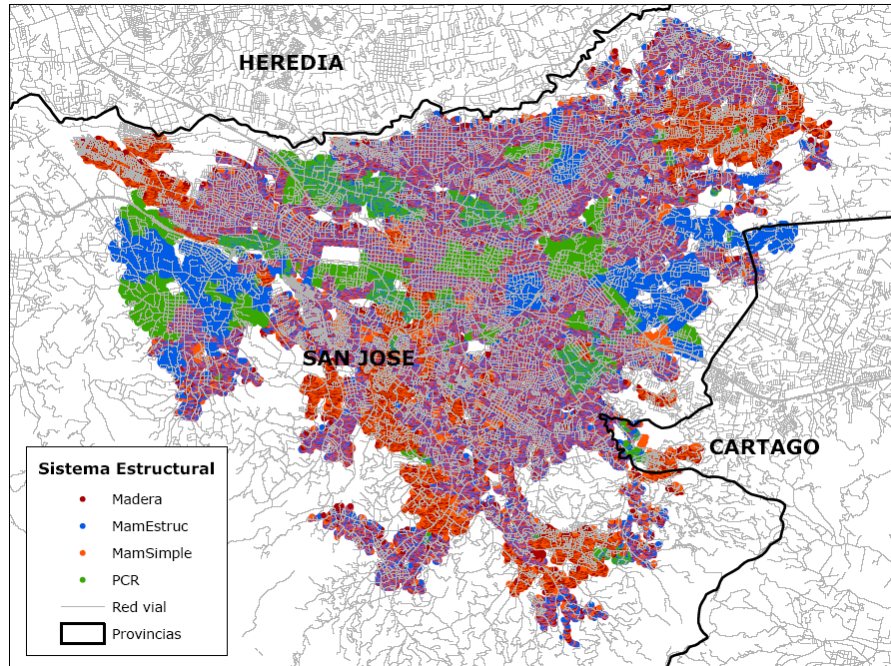


Figura 4-4
Distribución de sistemas estructurales asignados a los predios

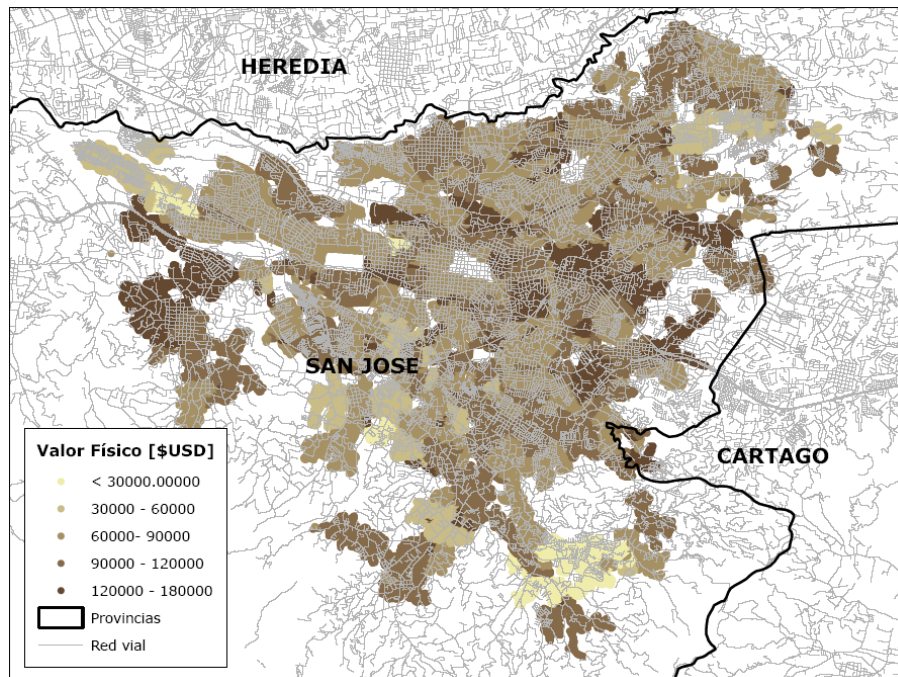


Figura 4-5
Distribución del valor físico de predios

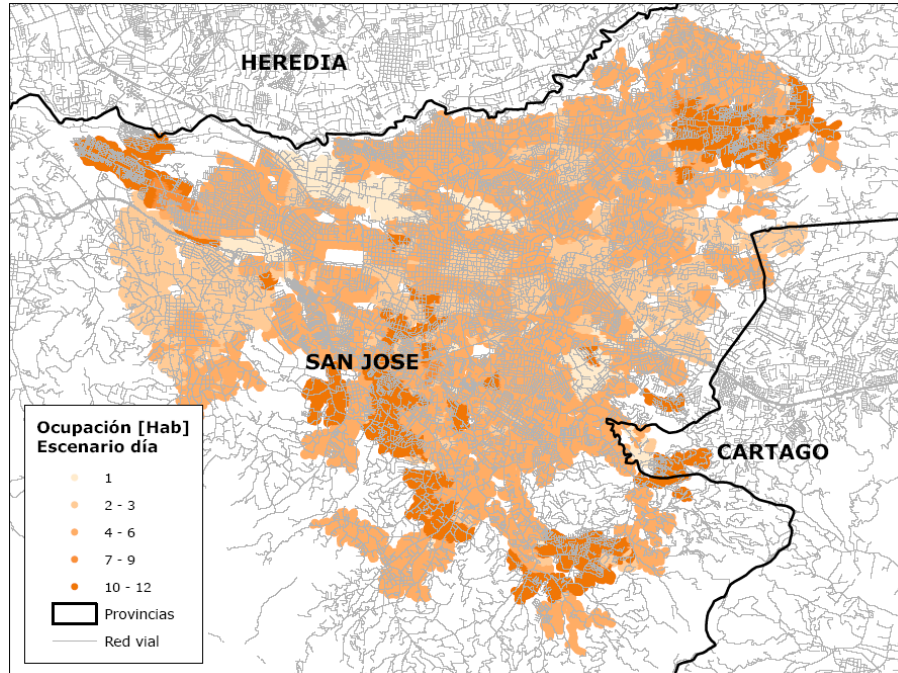


Figura 4-6
Distribución del nivel de ocupación de predios. Escenario Día

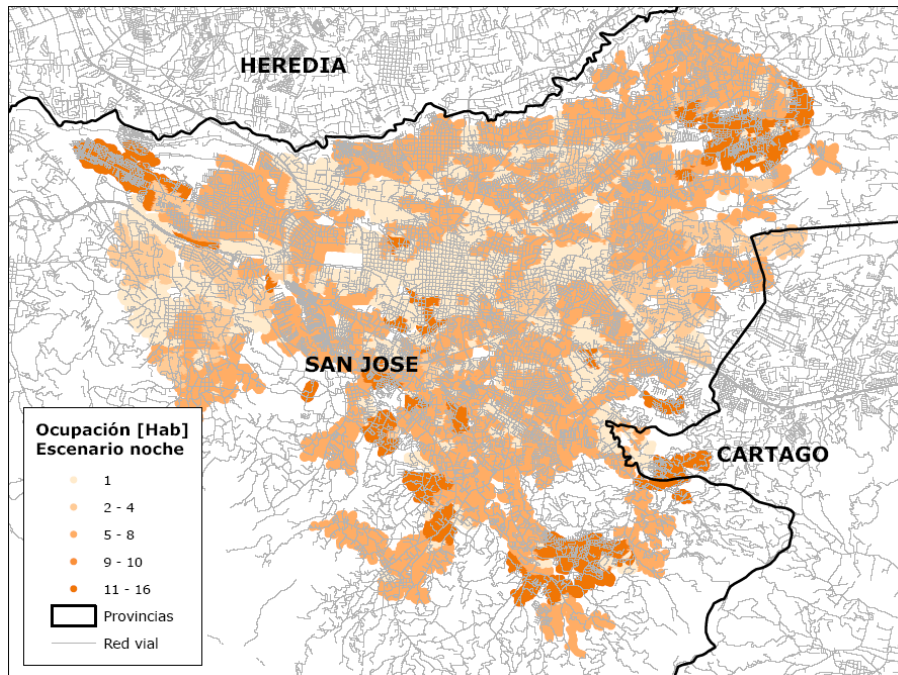


Figura 4-7
Distribución del nivel de ocupación de predios. Escenario Noche

4.3 Información de vulnerabilidad

Los sistemas estructurales asignados a la base datos corresponden a los presentados en la Tabla 4-2. Estos tipos se caracterizaron mediante las funciones de vulnerabilidad de pérdida física y humana presentadas en la Figura 4-8.

*Tabla 4-2
Descripción de los diferentes sistemas estructurales asignados*

Sistema	Descripción
Mampostería Estructural	Muros de mampostería estructural o confinada, con o sin diafragma y con cubierta ligera o pesada
Mampostería Simple	Muros de mampostería simple, con o sin diafragma y con cubierta ligera o pesada
Madera	Madera con o sin diafragma con cubierta ligera o pesada
Pórticos de Concreto	Marcos de Concreto con o sin diafragma y con cubierta ligera o pesada

Se subdividieron estos sistemas estructurales en función de las características de exposición asignadas a los predios de la ciudad, con el fin de tener en cuenta posibles variaciones en la calidad de las construcciones. Se definieron 8 tipos estructurales diferentes, según como se muestra en la Tabla 4-3.

*Tabla 4-3
Descripción de los tipos estructurales definitivos*

Sistema	Tipo	Uso	No. pisos	Nivel Socioeconómico
Mampostería Estructural	MamEstruc	Todos	Todos	Todos
Mampostería Simple	MamSimple_RB	Residencial	Todos	Bajo
	MamSimple	Otros	Todos	Otros
Madera	Madera_RB	Residencial	Todos	Bajo
	Madera	Otros	Todos	Otros
Pórticos de Concreto	PCR_RB	Residencial	1 a 3	Bajo
	PCR_RMA	Residencial	1 a 3	Otros
	PCR	Otros	Otros	Todos

Se emplearon las siguientes nomenclaturas en la subdivisión

RB: Residencial nivel socio económico bajo

RMA: Residencial nivel socio económico medio a alto

PCR: Pórticos de concreto reforzado

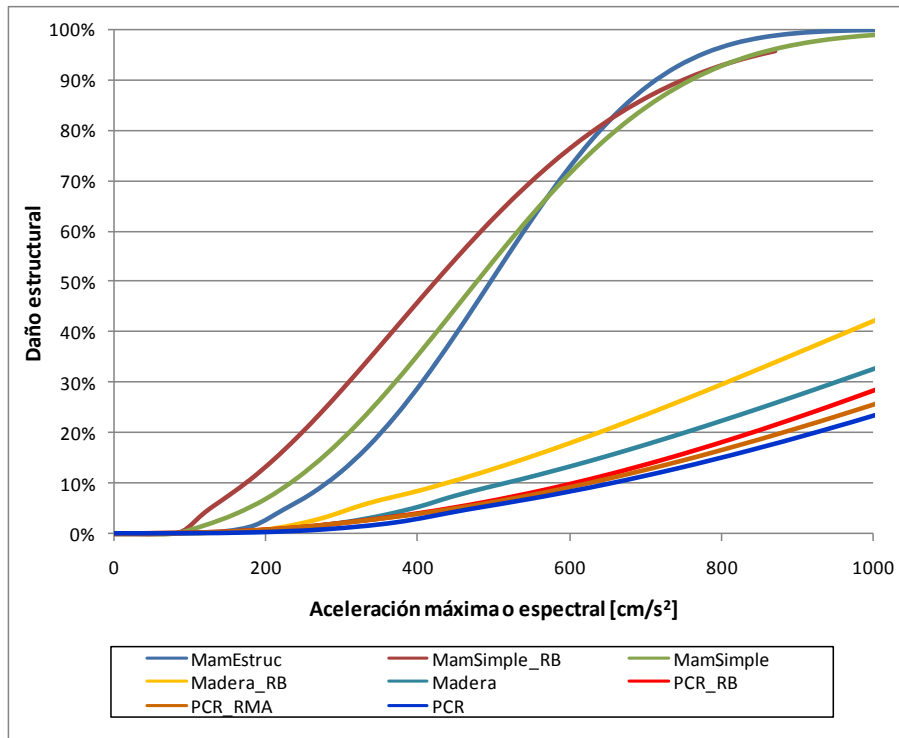


Figura 4-8
Curvas de vulnerabilidad para los tipos estructurales asignados

5 Resultados de la Evaluación

5.1 Escenario determinista

La estimación del escenario de amenaza determinista y la simulación de las pérdidas esperadas que se derivan del evento seleccionado se llevaron a cabo utilizando las herramientas de evaluación de amenaza y riesgo de CAPRA (ERN 2009, ver www.ecapra.org). Esta plataforma permite realizar evaluaciones de amenaza sísmica, la asignación de las curvas de vulnerabilidad y el cálculo de riesgo para una base de exposición determinada. Los resultados se condensan en una serie de tablas y figuras que dan cuenta de la distribución general y espacial de las pérdidas económicas y humanas.

La Tabla 5-1 y la Tabla 5-2 resumen los resultados encontrados para este escenario en términos de pérdidas económicas totales y en porcentaje con respecto al valor expuesto total, pérdida de vidas humanas esperado en el escenario diurno y en el nocturno. Con base en esto se hace un estimativo complementario de número esperado de heridos en el escenario diurno y en el nocturno.

Tabla 5-1
Valores expuestos y pérdidas económicas por sistema estructural

Sistema	N° Edif.	Valor Físico [\$USD x10 ⁶]	Pérdida Física	
			[\$USD x10 ⁶]	[%]
Mamp. Estr.	103,756	\$11,678	\$933	3.0
Mamp. Simple	76,180	\$6,080	\$640	2.1
Madera	73,077	\$5,668	\$348	1.1
Pórticos de Concreto	49,806	\$7,386	\$258	0.8
TOTAL	302,819	\$30,813	\$2,180	7.1

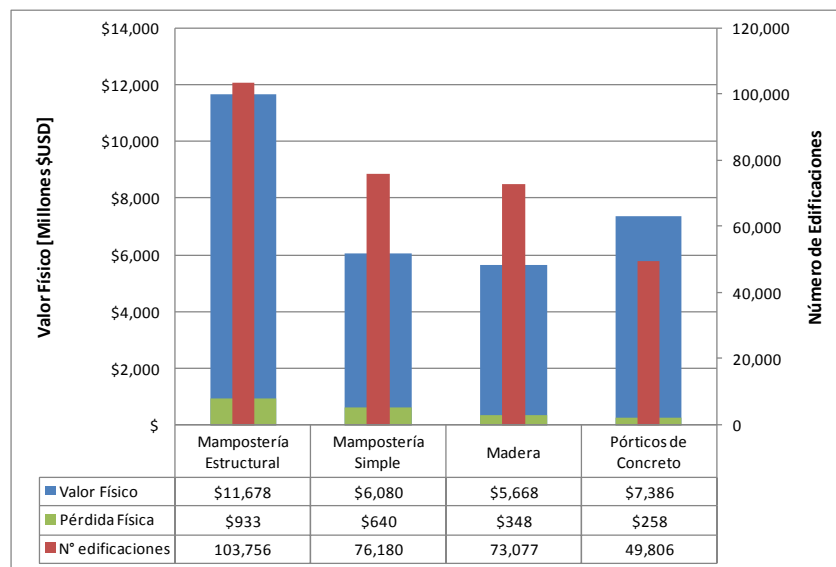


Figura 5-1
Valor físico expuesto, pérdida física y número de edificaciones por sistema estructural

Tabla 5-2
Valores expuestos y afectación humana por sistema estructural

Sistema	N° Edif.	Ocupación Día [Hab]	Víctimas Día [Hab]	Heridos Día [Hab]	Ocupación Noche [Hab]	Víctimas Noche [Hab]	Heridos Noche [Hab]
Mamp. Estr.	103,756	359,036	2,691	15,249	469,579	3,521	19,952
Mamp. Simple	76,180	396,943	2,975	16,858	521,130	3,908	22,145
Madera	73,077	395,341	2,497	9,988	524,206	3,348	13,392
Pórticos de Concreto	49,806	81,816	613	613	20,079	150	150
TOTAL	302,819	1,233,136	8,776	42,708	1,534,994	10,927	55,640

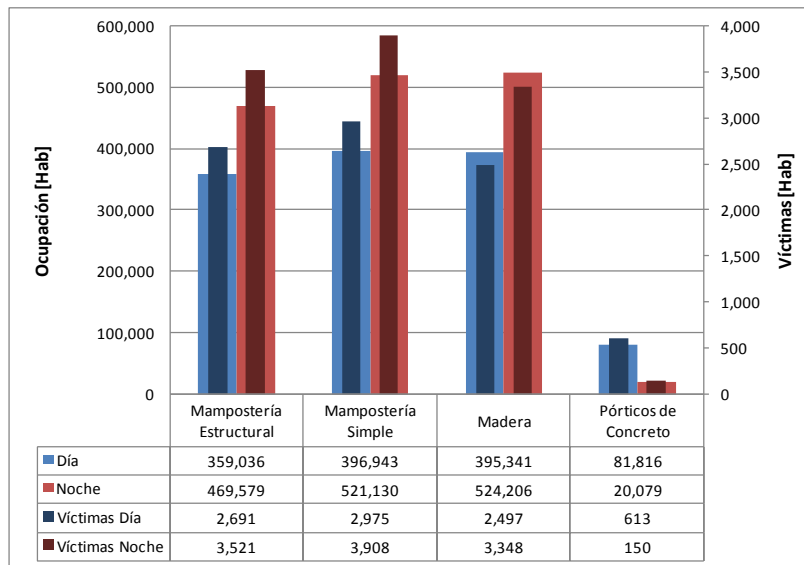


Figura 5-2
Ocupación y pérdida de vidas por sistema estructural

5.1.1 Mapas de riesgo por distritos

A continuación se muestran los mapas de pérdidas esperadas, económicas y de vidas humanas, para el escenario sísmico escogido, y los escenarios de ocupación definidos. Los resultados han sido agrupados a nivel de *Distrito*, lo que permite verlos de manera más globalizada.

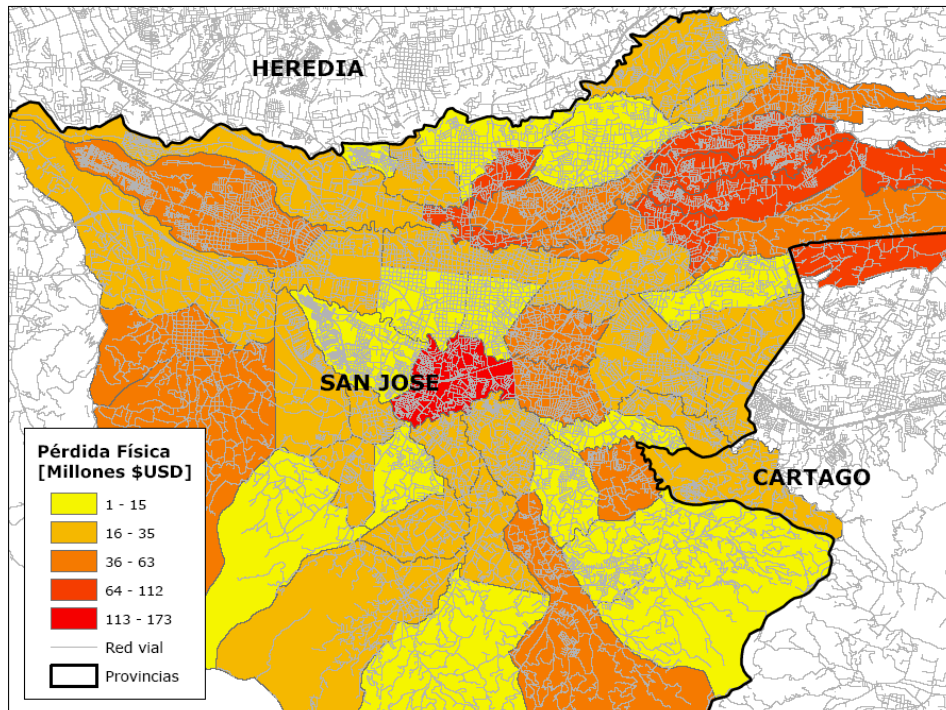


Figura 5-3
Pérdida física agrupada por distritos

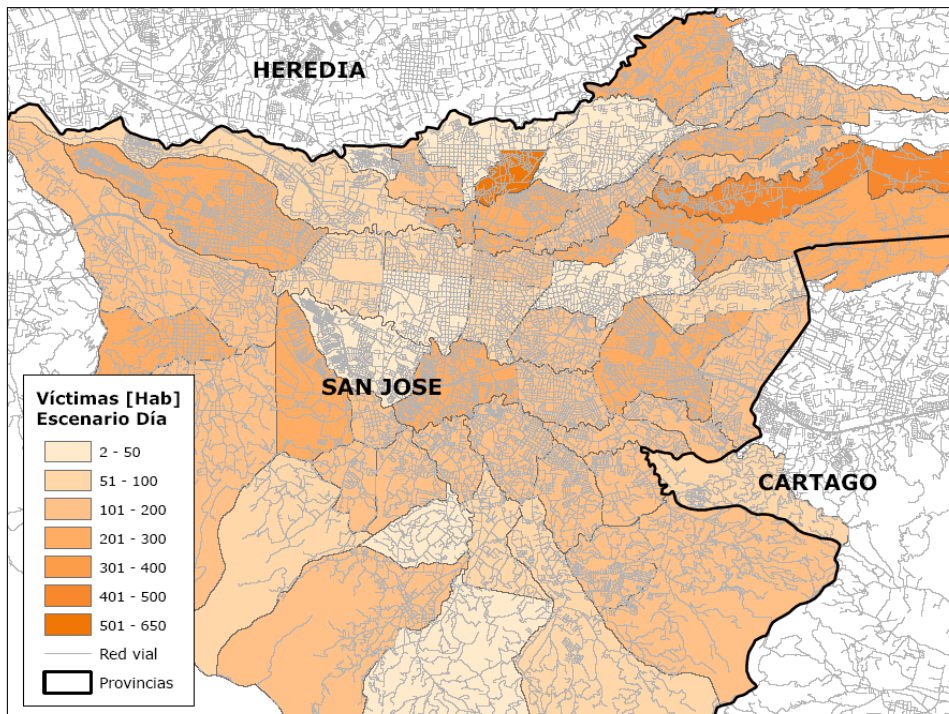


Figura 5-4
Número de víctimas agrupadas por distritos. Escenario Día

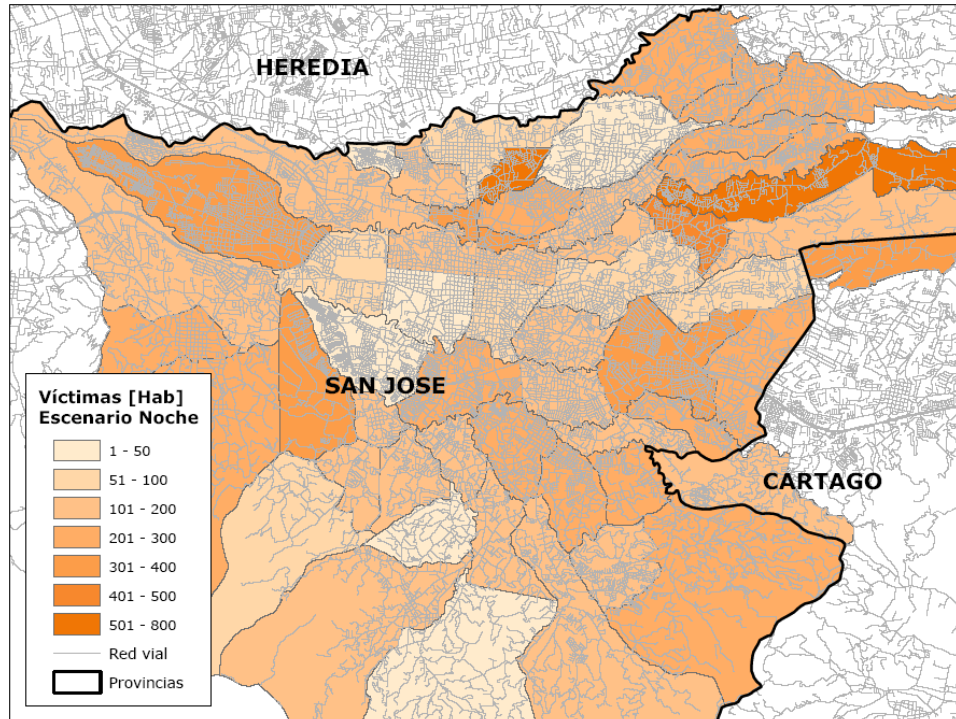


Figura 5-5
Número de víctimas agrupadas por distritos. Escenario Noche

5.2 Escenario probabilista

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la evaluación probabilista de pérdidas por terremoto para San José. En el sitio www.ecapra.org se puede consultar en detalle la metodología de evaluación de pérdidas empleada en este estudio.

5.2.1 Resultados generales

Tabla 5-3
Resultados generales para San José

Resultados		
Valor Expuesto	USD\$ x10⁶	\$30,813
Pérdida anual esperada	USD\$ x10⁶	\$188.6
	‰	6.1
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	USD\$ x10⁶	%
100	\$1,952	6.4
250	\$3,128	10.0
500	\$4,238	13.8
1000	\$5,450	17.7

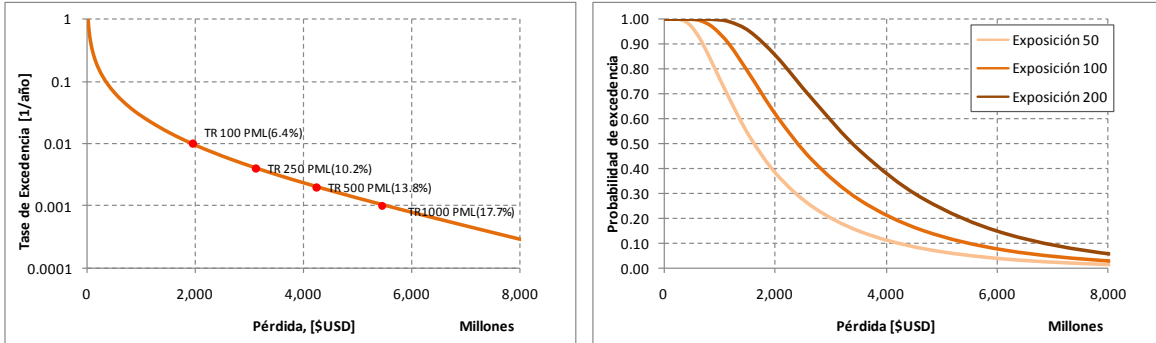


Figura 5-6

Resultados análisis (Izquierda: Curva de excedencia de pérdidas, Derecha: Probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición)

Tabla 5-4

Valores expuestos y pérdidas por sistema estructural

Sistema	Valor Físico [\$USD x10 ⁶]	Pérdida Anual	
		[\$USD x10 ⁶]	‰
Mampostería Estructural	\$11,678	\$80.8	2.6
Mampostería Simple	\$6,080	\$55.4	1.8
Madera	\$5,668	\$30.1	1.0
Pórticos de Concreto	\$7,386	\$22.3	0.7
TOTAL	\$30,813	\$188.6	6.1

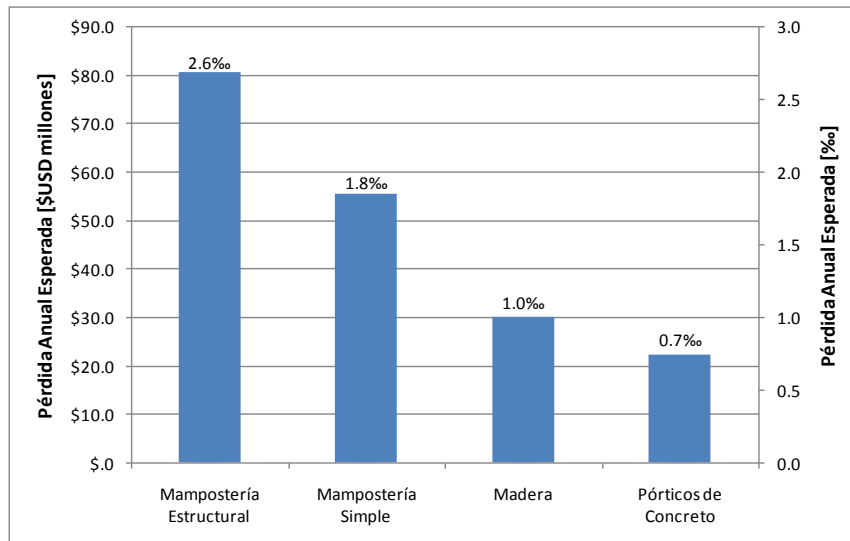


Figura 5-7

Pérdida anual esperada por sistema estructural

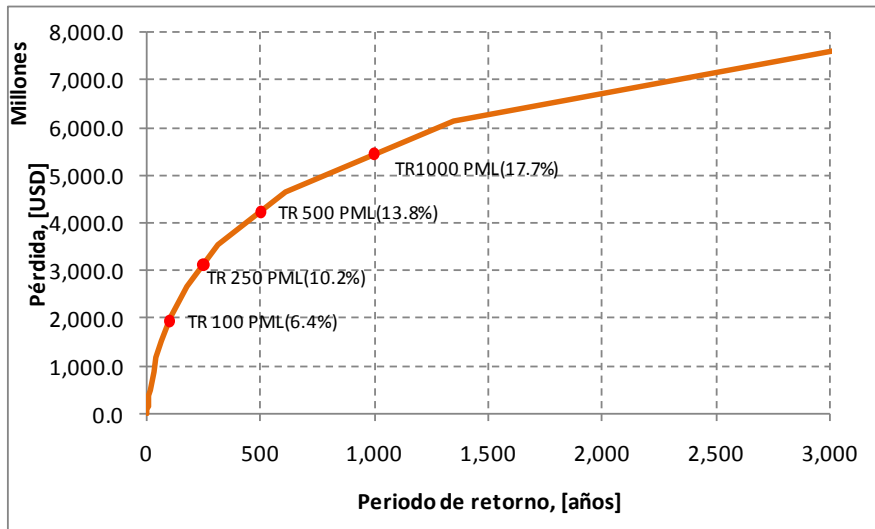


Figura 5-8
Pérdida máxima probable

5.2.2 Mapas de riesgo por distritos

A continuación se muestran los mapas de riesgo probabilístico generados por medio de la evaluación realizada. Los resultados han sido agrupados a nivel de *Distrito*, lo que permite verlos de manera más globalizada. Los resultados se presentan en términos de pérdidas anuales esperadas, PAE.

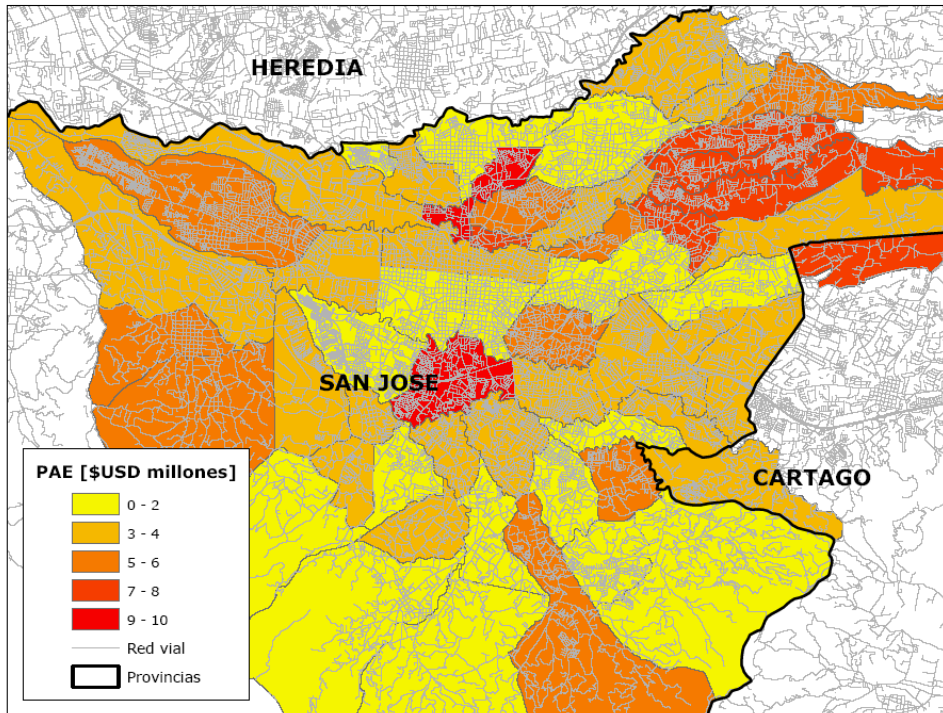


Figura 5-9
Pérdida anual esperada agrupada por distritos

6 Acciones Recomendadas

El análisis de riesgo sísmico presentado para la ciudad de San José debe verse como una plataforma inicial que permite la cuantificación y calificación del riesgo en la ciudad en cualquier instante de tiempo (según la mejor información disponible) y que debe servir de base para que mediante la complementación paulatina de la información se convierta en el corto plazo en una evaluación integral de riesgo para efectos de toma de decisiones.

A continuación se dejan explícitas las limitaciones en la información utilizada para los análisis, lo cual debe servir de base para los planes de trabajos y estudios futuros por parte de la ciudad con miras a mejorar la calidad y confiabilidad de estos resultados preliminares presentados.

- (a) Información Sísmica: se puede considerar de muy buena calidad y completa para efectos del presente análisis. El costo y tiempo requerido para mejorar este tipo de información es muy alto y no se justifica en el corto plazo. Sí resulta de la mayor importancia mantener el catálogo sísmico actualizado, la red sismológica en funcionamiento y la red de acelerógrafos activa con miras a contar con mejor información sísmica en el futuro para efectos de calibración y ajuste de los modelos.
- (b) Información de microzonificación sísmica: Se recomienda realizar una actualización del estudio de microzonificación sísmica de la ciudad con miras a su vinculación al presente estudio de riesgo. Dicho estudio debe llegar a la propuesta de una serie de zonas homogéneas cada una de ellas caracterizada mediante una función de transferencia en diferentes rangos de aceleración máxima de entrada.
- (c) Información de exposición: debe recurrirse a la base catastral de la ciudad. El modelo utilizado en el presente análisis solo sirve con propósitos ilustrativos e indicativos de valores globales a esperar. Para efectos de resultados para toma de decisiones debe contarse con la base catastral de la ciudad y con índices oficiales de ocupación y costos.
- (d) Las funciones de vulnerabilidad deben revisarse y evaluarse en un plan en el mediano plazo, mediante la vinculación de universidades y centros de investigación. Estos trabajos deben basarse en modelaciones analíticas y experimentales de los tipos constructivos típicos de la ciudad.
- (e) Los resultados de los análisis de riesgo y su interpretación para la toma de decisiones debe realizarse de manera conjunta con las entidades y especialistas a cargo de cada uno de los aplicativos que pueden derivarse de estos resultados.

Los resultados presentados anteriormente dependen directamente de la calidad y tipo de información suministrada al modelo. Entre más detallada y confiable sea la información, menor será la incertidumbre asociada a los resultados y por lo tanto el proceso de toma de decisiones podrá realizarse con mayor nivel de confianza.

En particular se hace especial énfasis en actualizar la información referente a:

- Inventario de construcciones expuestas incluyendo sus características principales.
- Valoración de activos, sus contenidos y posibles pérdidas consecuenciales.
- Identificación de tipos estructurales dominantes y distribución dentro de la ciudad.
- Categorización de tipos de contenidos, calificación y valoración.
- Calificación de la vulnerabilidad estructural y humana ante las diferentes fuentes de amenaza.
- Inventario, valoración y calificación de toda la infraestructura complementaria expuesta incluyendo vías, puentes, infraestructura de servicios públicos, instalaciones industriales importantes, plantas de generación de energía, hidroeléctricas, presas, túneles, aeropuertos y en general toda la infraestructura expuesta relevante del país.

Mediante una información más detallada especialmente de infraestructura expuesta el sistema CAPRA permitiría realizar las siguientes evaluaciones complementarias:

- (a) Identificación de infraestructura crítica para la ciudad en términos de peligrosidad, valor expuesto, ocupación humana y otros criterios. Esto con el fin de priorizar inversión pública en recuperación o modernización de elementos claves para el desarrollo.
 - (b) Evaluación del riesgo por sectores incluyendo residencial, industrial, comercial, salud, educación, públicos y otros.
 - (c) Requerimientos de reforzamiento de activos públicos, especialmente edificaciones indispensables y de atención a la comunidad.
 - (d) Estimación del riesgo de activos privados para estratos bajos, medios y altos con fines de protección financiera y concientización del riesgo.
 - (e) Análisis de vulnerabilidad y requerimiento de reforzamiento para mitigación de impactos de los siguientes sistemas de servicios públicos:
 - a. Acueducto y alcantarillado: se incluyen las redes de tuberías principales o troncales. Se incluyen instalaciones importantes tales como estaciones de bombeo, cuartos de control, subestaciones, edificaciones administrativas y otras ubicadas dentro del perímetro urbano de la ciudad.
 - b. Energía: se incluye la red de distribución principal y las subestaciones eléctricas e instalaciones importantes para el funcionamiento del sistema.
-

- c. Comunicaciones: se incluyen únicamente las subestaciones y centros de control importantes del sistema al igual que los sitios relevantes de retransmisión, antenas y demás puntos que se consideren estratégicos para el funcionamiento del sistema.
 - d. Gas: se considera la red de distribución principal del sistema de gas y las instalaciones relevantes tales como edificaciones administrativas, centros de control o “city gates”.
 - e. Puentes vehiculares urbanos: se consideran los puentes vehiculares urbanos principales que hacen parte de la malla vial de la ciudad. }
 - f. Instalaciones industriales de alta peligrosidad.
- (f) Análisis de riesgo de incendios posteriores al terremoto e incidencia en el escenario de daños y afectaciones a las construcciones y a la población.
- (g) Requerimientos especiales para normativa sismo resistente, actualización o complementación de la misma.

Por otro lado, un análisis más detallado de la información que se presenta en este documento sirve de base para realizar una serie de análisis complementarios para efectos de los planes y preparativos de emergencia de la ciudad, incluyendo los siguientes:

- (a) Sector salud: requerimientos de atención médica para heridos, centros de atención de emergencia, ubicación, requerimientos de servicios públicos, personal médico, ambulancias, organización del tema de víctimas mortales.
 - (b) Seguridad: requerimientos de seguridad en los instantes y días posteriores al evento en cuanto a organización policial. Posibilidad de problemas sociales por falta de alimentos o de servicios.
 - (c) Atención de la emergencia: planeación de las diferentes acciones posteriores a la ocurrencia del desastre tales como reconocimiento, identificación y clausura de edificaciones afectadas, demoliciones, avisos a la población, cuadrillas de rescate, manejo de donaciones, suministros de alimentación, viviendas temporales, manejo de residuos, disponibilidad de maquinaria, etc.
 - (d) Requerimientos de viviendas temporales, campamentos, comida, víveres, suministros, atención médica post-emergencia, etc. Problemática de la vivienda de interés social.
 - (e) Problemática de personas sin empleo o lugar de trabajo según zonas, requerimientos inmediatos, afectación de la producción, efectos a largo plazo, medidas de mitigación de impactos.
-

- (f) Planes de contingencia para los diferentes sectores de servicios públicos y sociales incluyendo suministro de agua, energía, gas, transporte público, generación de energía, telecomunicaciones y otras.
- (g) Pérdidas económicas esperadas, efectos en el mediano y largo plazo en las finanzas públicas, necesidades de mecanismos de transferencia del riesgo, planes de aseguramiento, proyección hacia el futuro.

El análisis de riesgo con las herramientas indicadas se convierte por lo tanto en un elemento fundamental en la gestión integral del riesgo de ciudades como San José, factor clave para el desarrollo económico y social. El proceso exige la participación activa de entidades públicas, universidades, sector privado y de la comunidad en general relacionada con esta temática.

7 Referencias

- Biblioteca Virtual en Población. Centro Centroamericano de Población. Censo de Población de Costa Rica 1971. Disponible en: <http://ccp.ucr.ac.cr/bvp/censos/CostaRica/1971/index.htm>
- Dobry, R., & Vucetic M., 1987. Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits, In proceedings of the International Symposium n Geotechnical Engineering of soft soils, Vol. 2, Manual J. Mendoza y Luis Montañez (eds), Mexico, 1987.
- Evaluación de Riesgos Naturales ERN – América Latina. Metodología de Análisis Probabilista de Riesgos. Informe ERN-CAPRA-T1-6. <http://www.ecapra.org>. 2009.
- Evaluación de Riesgos Naturales ERN – América Latina. Modelación Probabilista de Amenazas Naturales. Informe ERN-CAPRA-T2-3. <http://www.ecapra.org>. 2009.
- Evaluación de Riesgos Naturales ERN – América Latina. Inventario de Elementos Expuestos. Informe ERN-CAPRA-T2-4. <http://www.ecapra.org>. 2009.
- Evaluación de Riesgos Naturales ERN – América Latina. Plataforma para la Evaluación Probabilista de Riesgo CAPRA-GIS. <http://www.ecapra.org>. 2009.
- Evaluación de Riesgos Naturales ERN – América Latina. ERN-Vulnerabilidad V1.0. 2009
- HAZUS MH MR3. Multi-hazard loss estimation methodology. FEMA. <http://www.fema.gov>
- INEC, Instituto Nacional de Estadística y Censos. Censo de población Costa Rica 2000. <http://www.inec.go.cr/>
- NORSAR et. al. Proyecto regional RESIS II – Evaluación de la Amenaza sísmica en Centroamérica. 2008.
- Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. <http://www.fao.org/>
- Schmidt, V., Moya, A., Climent, A., Rojas, W., Boschini, I. 2005. Microzonificación Sísmica de San José, Costa Rica. Universidad de Costa Rica.
- Schnabel, B; Lysmer, J., & Seed H. B., 1972. SHAKE: a Computer Program for the Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, University of California, Berkeley, EERC Report 72-12-1972.
-