

Ministerio de Medio Ambiente
y Recursos Naturales

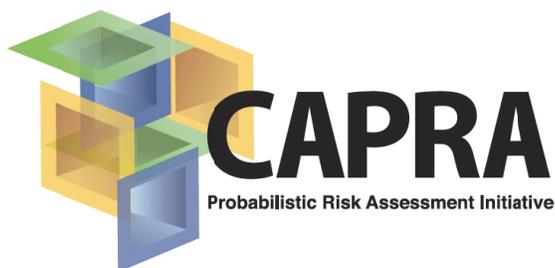


Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN)

**MODELACIÓN PROBABILISTA DE ESCENARIOS DE RIESGO
SÍSMICO PARA EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN
SALVADOR, INCLUYE ANÁLISIS DE LOS PORTAFOLIOS DE
EDUCACIÓN, SALUD Y GOBIERNO**

INFORME EJECUTIVO

ABRIL DE 2012



**Proyecto de Asistencia Técnica (TAP) con fondos del Banco Mundial (BM) y el
Global Facility for Disaster Risk Reduction (GFDRR)**



Asistencia Técnica provista por el consorcio ERN-AL

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



**Con Apoyo de los Ministerios de Educación (MINED) y Salud (MINSAL) y la
Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas" (UCA)**



RECONOCIMIENTOS

El proyecto fue ejecutado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) con el apoyo de los Ministerios de Educación (MINED) y Salud (MINSAL), en el marco del Proyecto de Asistencia Técnica (TAP) con fondos del Banco Mundial y asistido por el consorcio ERN-AL, desarrolladores de las aplicaciones utilizadas para la evaluación del riesgo sísmico.

El estudio se realizó partiendo de información existente y levantando aquella información considerada indispensable para el análisis. Cada una de las capas utilizadas para el análisis está sujeta a ser mejorada con la incorporación de más y/o mejor calidad de datos, lo que pudiera variar de forma significativa los resultados presentados; se trata de una estimación inicial que debe ser complementada y revisada a medida nuevo conocimiento sea adquirido. El usuario final debe estar consciente de las limitaciones y restricciones de los análisis realizados para poder dar uso adecuado a la información.

El informe presentado recopila el trabajo realizado tanto por personal del MARN, como por consultores de la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas” (UCA) y el Consultor Estructural Ricardo Castellanos, bajo la coordinación y supervisión del MARN.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	
1.1	Visión General	1
1.2	Historia Sísmica de El Salvador	1
2	AMENAZA SÍSMICA EN EL AMSS	
2.1	Evaluación de la Amenaza Sísmica	2
2.2	Modelo de Amenaza Sísmica Nacional	2
2.3	Efecto de Sitio	4
2.3.1	Efecto de las Condiciones Locales en el Movimiento Fuerte	4
2.3.2	Estudio de Sitio en el AMSS	4
3	LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN DE EXPOSICIÓN	
3.1	Instituciones Evaluadas	6
3.2	Ficha Técnica	8
3.3	Resultados del Levantamiento de Campo	8
4	GENERACIÓN DE CURVAS DE VULNERABILIDAD SÍSMICA	
4.1	Introducción	11
4.2	Generación de Curvas de Vulnerabilidad	11
5	MODELO DE RIESGO SÍSMICO PARA EL AMSS	13
	CONCLUSIONES	19
	REFERENCIAS	22

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Visión General

Riesgo sísmico se define como la probabilidad de una pérdida causada por un sismo durante un tiempo definido, y puede ser medido en términos humanos, económicos o sociales. La probabilidad de una pérdida causada por un sismo depende de tres factores: la amenaza sísmica, la exposición y la vulnerabilidad de las edificaciones expuestas. De manera simplificada:

$$\text{Riesgo Sísmico} = \text{Amenaza Sísmica} \times \text{Exposición} \times \text{Vulnerabilidad}$$

La amenaza sísmica es la probabilidad de que ocurran movimientos sísmicos de cierta intensidad en una zona y tiempo definido, y refleja características de la naturaleza que generalmente no pueden ser modificadas, como la sismicidad y la geología de la región. La exposición puede medirse en términos del número de personas albergadas en cada edificio o el valor monetario (de reposición) de dicho edificio, y la vulnerabilidad representa el daño que puede esperarse en una estructura expuesta a un movimiento sísmico de cierta intensidad.

La amenaza se convierte en riesgo cuando hay edificaciones/obras expuestas al movimiento del terreno, y el nivel de riesgo depende no solo del nivel de movimiento, sino también de la capacidad de las estructuras expuestas para resistirlo. En las ciudades ubicadas en zonas sísmicas, como es el caso del Área Metropolitana de San Salvador, donde existe una elevada amenaza sísmica y un alto nivel de exposición, el nivel de riesgo está controlado por la vulnerabilidad de la infraestructura existente, y ésta a su vez, relacionada al nivel de conocimiento de la peligrosidad de la región.

El presente informe expone brevemente el estado de avance en la modelación probabilista de escenarios de riesgo sísmico para el Área Metropolitana de San Salvador, portafolios de Educación, Salud y Gobierno, así como el trabajo realizado para su estimación.

1.2 Historia Sísmica de El Salvador

El Salvador se encuentra en una región de alta actividad sísmica, generada principalmente por el proceso de subducción de la placa de Cocos bajo la placa del Caribe. Como consecuencia de la interacción de las placas, se tiene una cadena de volcanes activos y actividad sísmica local. Por lo tanto, El Salvador enfrenta altas tasas de sismicidad, tanto en la zona de subducción, como al interior de la placa del Caribe, en las denominadas fallas geológicas locales.

En el país, los sismos han sido responsables del mayor número de pérdidas tanto humanas como económicas, sumando más del 60% del total de las pérdidas en los últimos 30 años [EMDAT, 2012]. La república de El Salvador sufre un terremoto destructivo aproximadamente cada diez años y la ciudad de San Salvador es probablemente la ciudad en América más frecuentemente dañada por sismos [López et al., 2004]; fue gravemente afectada el 3 de mayo de 1965 (Ms 6.0) y el 10 de octubre de 1986 (Mw 5.7). El evento de 1965 dejó unos 120 muertos, mientras que el de 1986, a pesar de ser de menor magnitud, se tradujo en 1,500 muertos y más de 100,000 personas afectadas [Bommer et al., 1998].

Estos eventos y los más recientes ocurridos el 13 de Enero de 2001 (Mw 7.7, frente a las Costas de El Salvador) y 13 de Febrero de 2001 (Mw 6.6, San Vicente), han puesto en evidencia la alta vulnerabilidad sísmica de las edificaciones existentes en la ciudad. El acelerado y desordenado proceso de urbanización que se ha dado en el AMSS ha tenido consecuencias devastadoras en el pasado y de continuar, el nivel de riesgo seguirá aumentando y eventos futuros podrán provocar elevadas pérdidas humanas y económicas. La Figura 1.1 presenta los sismos que más han afectado al país en el último siglo en términos del número de muertes.

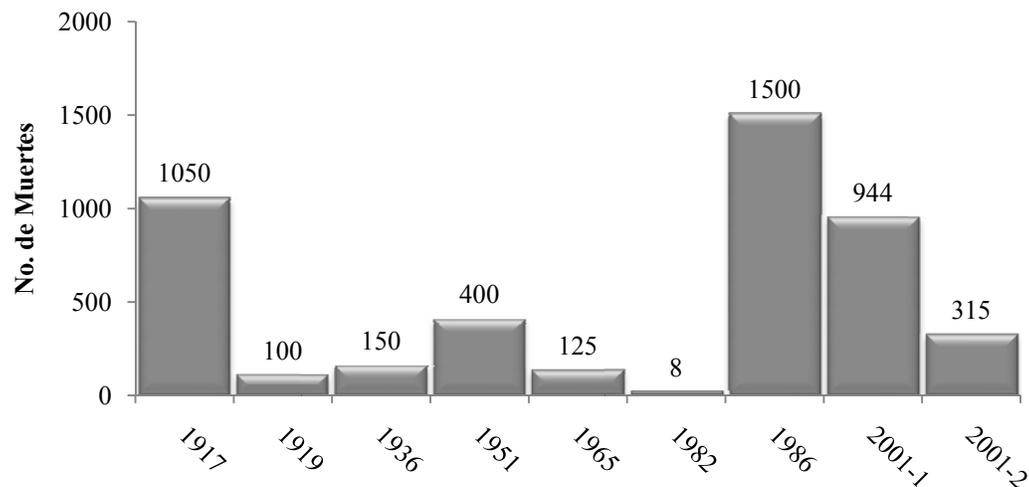


Figura 1.1: Sismos Destructivos del Siglo XX y XXI en El Salvador [SNET, 2004]

2 AMENAZA SÍSMICA EN EL AMSS

2.1 Evaluación de la Amenaza Sísmica

La correcta evaluación de la amenaza sísmica depende del nivel de conocimiento de las características de la región de análisis: la sismicidad del área de influencia, la atenuación sísmica regional y el efecto local del suelo en el emplazamiento. El movimiento fuerte se caracteriza tanto en términos de amplitud como frecuencia, que dependen tanto de la localización y tamaño del sismo como de las características geológicas y topográficas del emplazamiento.

2.2 Modelo de Amenaza Sísmica Nacional

Tomando como base el proyecto RESIS II [ver Molina et al., 2008], se realizó un estudio de amenaza a nivel nacional, considerando las distintas fuentes generadoras de sismos y sus características, y estudiando en detalle modelos de predicción del movimiento (sobre la base de los parámetros de la fuente y el trayecto) que mejor se ajusten a las observaciones.

El mapa de zonificación considera la contribución de distintos escenarios asociados a una probabilidad de ocurrencia. Para cada uno de estos escenarios, se estima la aceleración máxima del terreno y las aceleraciones para distintos períodos estructurales (edificaciones de distinta altura). El modelo probabilista de riesgo sísmico para el AMSS consideró 24,996 escenarios sísmicos probables

La Figura 2.1 presenta el mapa de amenaza sísmica nacional para un período de retorno de 500 años, en términos de la aceleración máxima del terreno (PGA). La Figura 2.2 muestra ejemplos de los casi 25,000 escenarios sísmicos considerados en el modelo de riesgo.

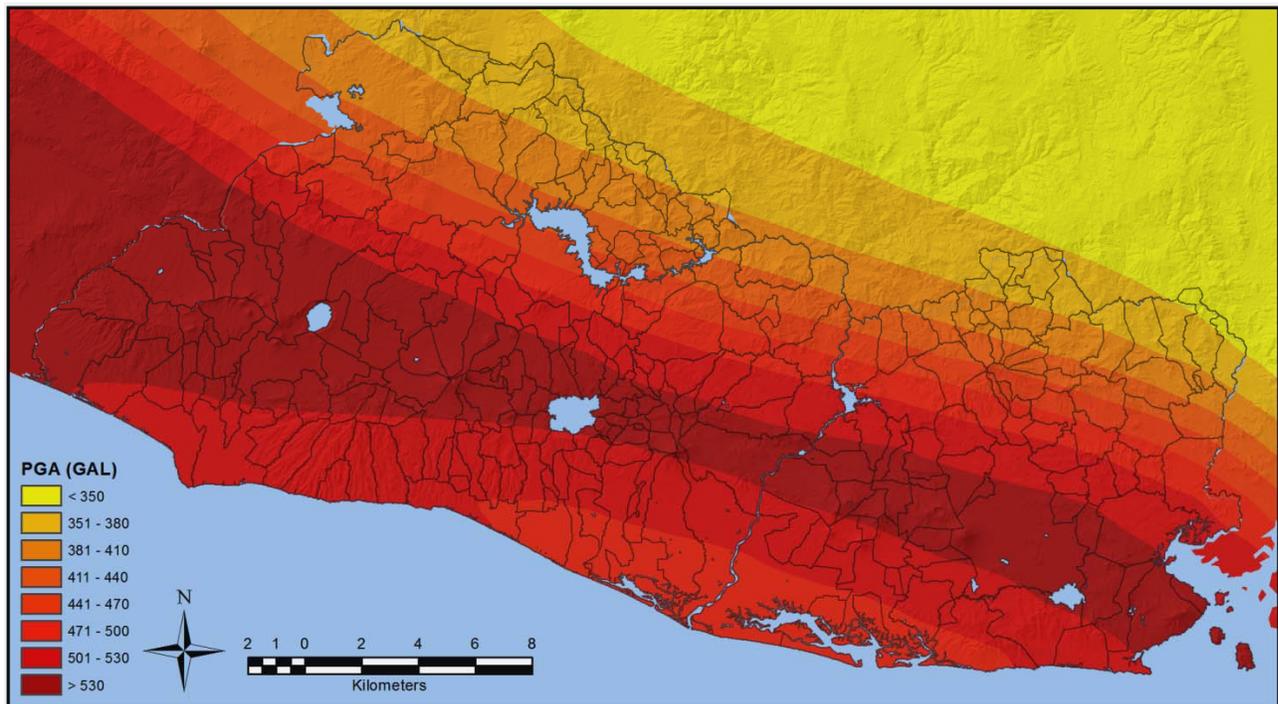


Figura 2.1: Amenaza Sísmica Nacional para un Período de Retorno de 500 años (PGA)

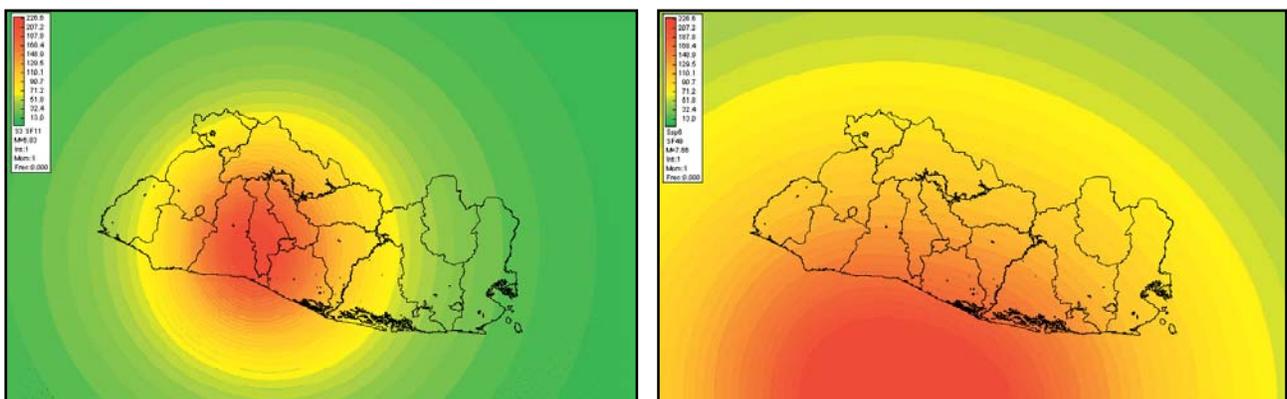


Figura 2.2: Ejemplo de Escenarios Sísmicos Probables (24,996 Escenarios Considerados en el Modelo)

2.3 Efecto de Sitio

2.3.1 Efecto de las Condiciones Locales en el Movimiento Fuerte

Cuando la predicción del movimiento fuerte se realiza sobre la base de los parámetros de la fuente y el trayecto, el movimiento queda caracterizado en roca o suelo duro y resulta necesario incluir la influencia de los efectos locales como factor integrante del movimiento.

El efecto de sitio en el AMSS está principalmente influenciado por la presencia de materiales blandos o cenizas volcánicas (Tierras Blancas), sobre las cuales reside la mayor parte de la ciudad. Estas cenizas se adelgazan ladera arriba del volcán San Salvador (3 m) pero hacia el oriente de la capital (Soyapango e Ilopango) alcanzan espesores de más de 60m [Hernández, 2007]

Cuando las ondas sísmicas pasan de la roca al suelo, que tiene una velocidad de propagación menor, el tren de ondas decelera, pero para mantener el flujo de energía, se incrementa su amplitud. Las ondas sísmicas se amplifican, pero solo en los rangos frecuenciales propios de la respuesta libre del suelo. En otras palabras, el suelo "filtra" la onda al amplificar el movimiento en ciertas frecuencias, atenuándolo en otras [Figura 2.3]. **El análisis de respuesta de sitio es, por tanto, crucial para obtener estimaciones confiables de los efectos del sismo sobre la infraestructura existente en la ciudad.** El nivel de daño máximo probable ocurrirá cuando el período natural de vibración de una edificación coincida con el período natural del suelo que la sostiene.

La Figura 2.4 muestra las aceleraciones registradas durante el sismo del 10 de Octubre de 1986 en contraste con las aceleraciones de diseño del código vigente al momento del sismo (código de 1966), el cual no consideraba las condiciones de suelo. El evento causó daños significativos principalmente en edificaciones de mediana altura (entre 3 y 8 niveles), en correspondencia al período predominante de los suelos del AMSS [Figura 2.4].

2.3.2 Efecto de Sitio en el AMSS

Tomando como base los mapas geológicos y topográficos de la región, así como información geológica/geotécnica recopilada, se estimaron de forma preliminar **Zonas de Respuesta Sísmica Similar**, utilizando como principal criterio para su delimitación, la profundidad de los suelos no consolidados sobre la base rocosa [Figura 2.5]

Las funciones de amplificación relativa para cada zona, estimadas sobre la base de datos sísmicos, reflejan una función de modificación al espectro de respuesta para la condición de "Roca" (considerando suelo en rango elástico). El detalle del espesor de suelo blando superficial, función de amplificación típica, y descripción del tipo de edificación que pudiera verse más afectada por Efectos de Sitio, se muestra en la Tabla 2.1

Las funciones de amplificación se han obtenido en base a la información existente y no se descarta que otros períodos dominantes y/o amplificaciones pudieran obtenerse de tener más información. **Se trata de una primera aproximación para la estimación de respuesta de sitio, y debe ser considerada como tal; no pretende, reemplazar ni descartar estudios de detalle.**

Amplificación ≈ 3.5 para Edificaciones de 2 – 3 Niveles (todos los eventos)

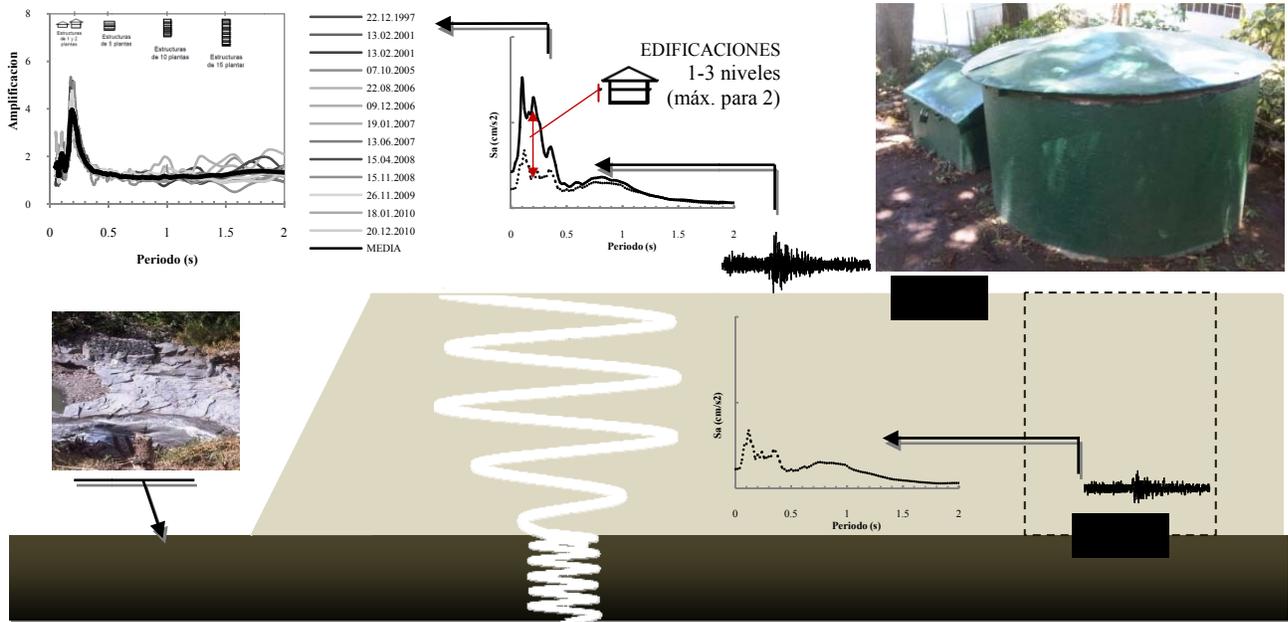


Figura 2.3: Amplificación de Ondas Sísmicas en el Depósito de Suelo Blando para el caso del Pozo Instrumentado en Casa Presidencial (CPRS/CPRF) [Figura 2.3]

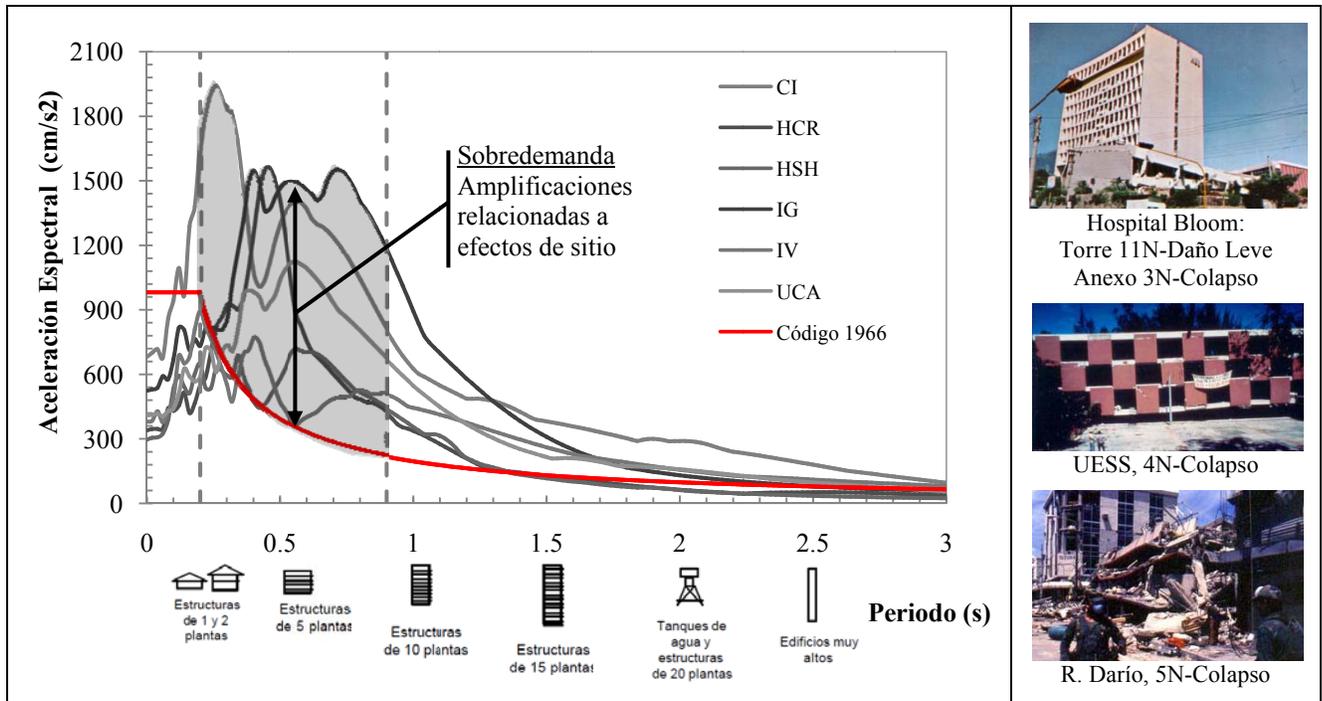


Figura 2.4: Espectros de respuesta elástica para el sismo del 10.10. 1986 y el código de 1966 - condiciones de roca ($\zeta=5\%$) junto con el tipo de edificación que podría verse más afectada (Izq). Ejemplos de daños ocurridos durante el evento (Der.) [modificado de Kattan, 2010]

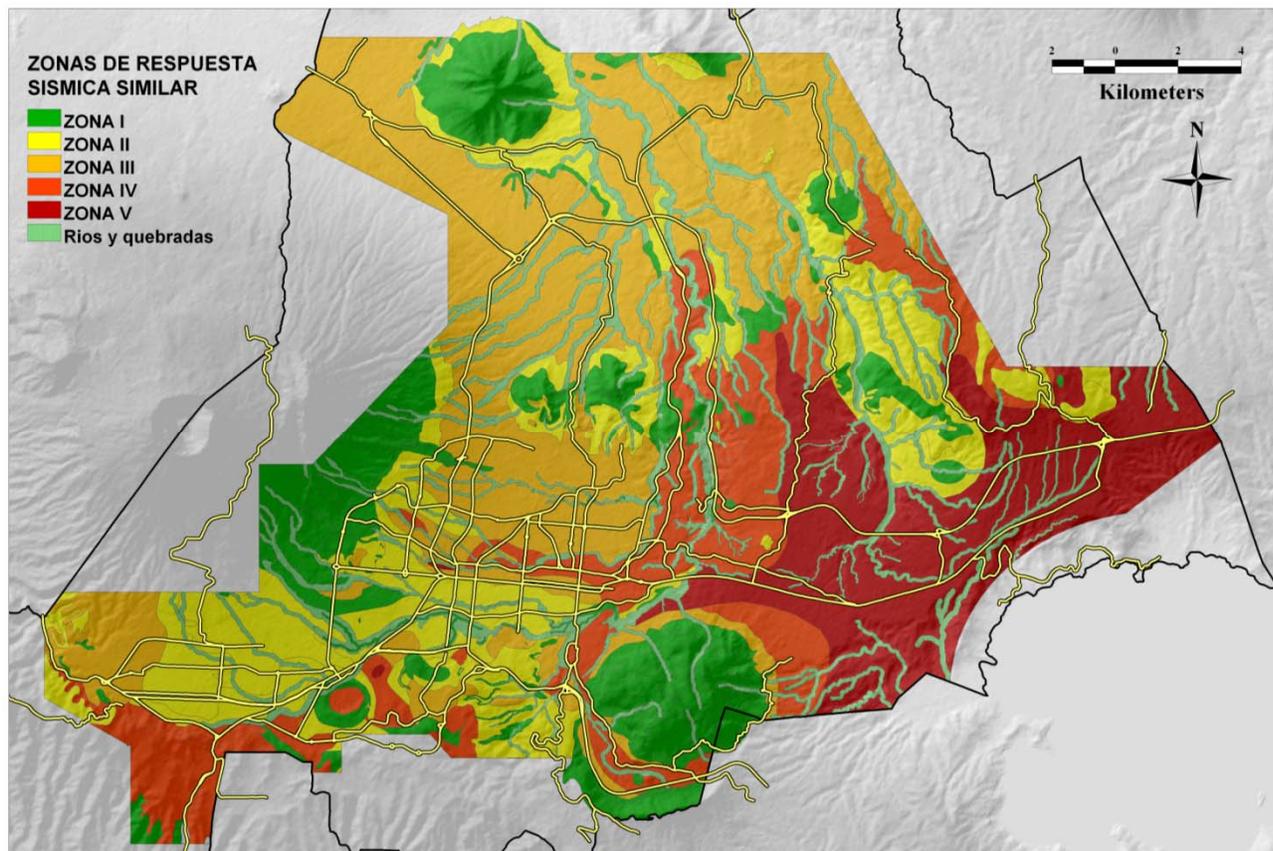


Figura 2.5: Mapa preliminar de Zonas de Respuesta Sísmica Similar.

3 LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN DE EXPOSICIÓN

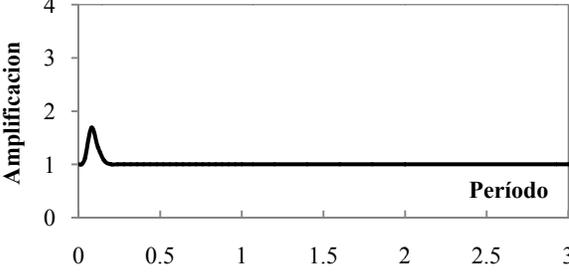
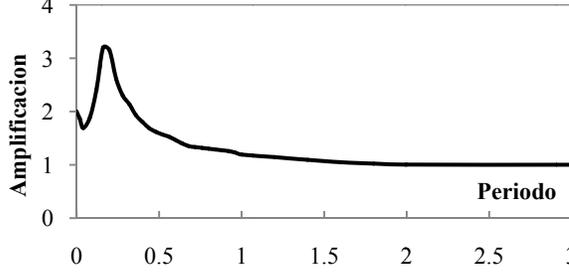
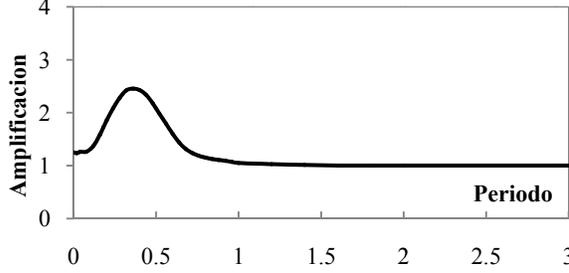
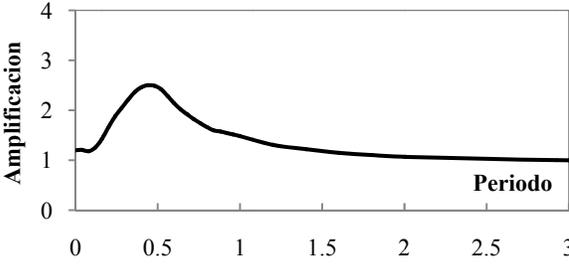
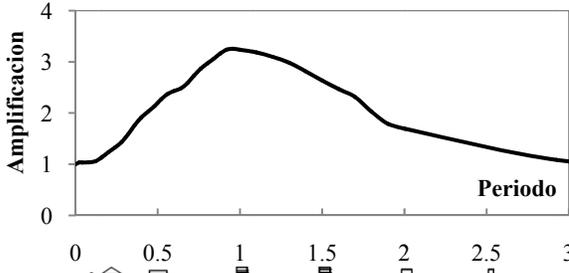
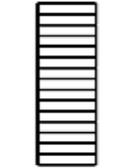
Bajo la coordinación del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), en el marco del Programa Nacional de Reducción de Riesgo (PNRR), se llevó a cabo una consultoría para el Levantamiento de Información sobre Edificaciones Expuestas a Riesgo Sísmico, adjudicada a la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas” (UCA).

3.1 Instituciones Evaluadas

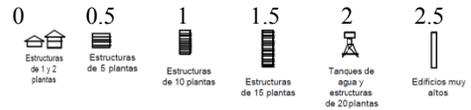
Los portafolios de salud y gobierno fueron definidos por el MARN. En el caso del portafolio de educación se definió una muestra del 20% de las instituciones, aplicando un procedimiento estadístico basado en una distribución estratificada y proporcional, para finalmente aplicar una selección aleatoria, de acuerdo a los siguientes criterios: a) ubicación geográfica, b) sector público o privado (10% privado, 90% público) c) urbano o rural, d) tamaño físico.

Las Figuras 3.1 muestra para los distintos portafolios el detalle de las instituciones levantadas en relación al total de instituciones existentes en el AMSS, así como el número total de edificios estudiados, considerando que una institución puede tener más de un edificio.

Tabla 2.1: Condiciones Típicas de Suelo y Estructuras más Afectadas por Efectos de Sitio

Zona	Condiciones Típicas de Suelo	Funciones de Amplificación (rango elástico) y Estructuras más afectada por Efectos de Sitio	
ZONA I Suelo blando < 5m	 <i>Colonia Escalón (2011)</i>		 Estructuras 1 Nivel
ZONA II Suelo blando 5-15m	 <i>Zona de Multiplaza (2007*)</i>		 Estructuras 1-3 Niveles (Típico 2)
ZONA III Suelo blando 15-25m	 <i>Centro de Gobierno (2010)</i>		 Estructuras 2-5 Niveles (Típico 3)
ZONA IV Suelo blando 25-50m	 <i>Altos del Boulevard (2008*)</i>		 Estructuras 4-9 Niveles (Típico 5)
ZONA V Suelo blando >50m	 <i>Rio Las Cañas (2010)</i>		 Estructuras >8 Niveles (Típico 10)

*Fotografías cortesía de Walter Hernández



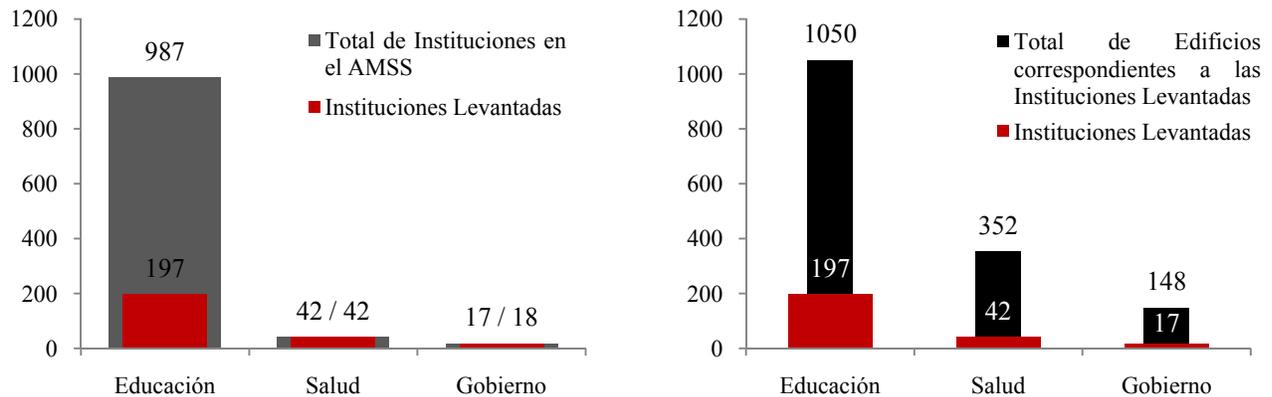


Figura 3.1: Detalle de Instituciones y Edificios levantados por Portafolio

3.2 Ficha Técnica

Para cada una de las edificaciones, en cada una de las instituciones, se levanto tanto información general como información técnica considerada a tener mayor influencia en la vulnerabilidad sísmica de las construcciones, prestando atención a las principales causas estructurales de daños durante eventos sísmicos pasados (ej. defectos estructurales).

a) Información general:

Portafolio y código de institución, ubicación geográfica, uso, área de construcción, número de ocupantes (distinguiendo entre mañana, tarde y noche), valor de reposición.

b) Información Técnica indispensable

Año de construcción (relacionado al nivel de diseño sismoresistente - código vigente), número de pisos y altura típica de entrepiso (relacionado al período estructural), sistema estructural

c) Información Técnica Complementaria

Tipo de estructura de techo, defectos estructurales, información de daños por sismo.

En muchos casos no se logró obtener la información relacionada al número de ocupantes y a los costos de mobiliario y equipo por parte de las instituciones. Para el portafolio de educación, se establecieron criterios conjuntos con MINED para estimar estos datos, sin embargo, para el portafolio de salud, donde el número de instituciones que no entregaron esta información fue considerable (13 de las 42 instituciones, incluyendo 7 de los 8 hospitales), el nivel de complejidad dificultó el establecimiento de criterios para el cálculo, acordando con MINSAL fijar los valor de ocupantes a la unidad para obtener **pérdidas humanas relativas**. El mismo criterio se tomó para las 4 instituciones del portafolio de gobierno que no contaban con la información solicitada. Estos datos podrán ser incorporados al análisis una vez se disponga de la información.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

La asignación del código de las tipologías se basó en el sistema estructural, el número de pisos y el año de construcción [Figura 3.2]. La Figura 3.3 muestra un ejemplo de ficha técnica final y la interfaz de consulta de la información levantada (desarrollada por la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas, 2011). La Figura 3.4 muestra algunos resultados de la investigación de campo para todos los portafolios.

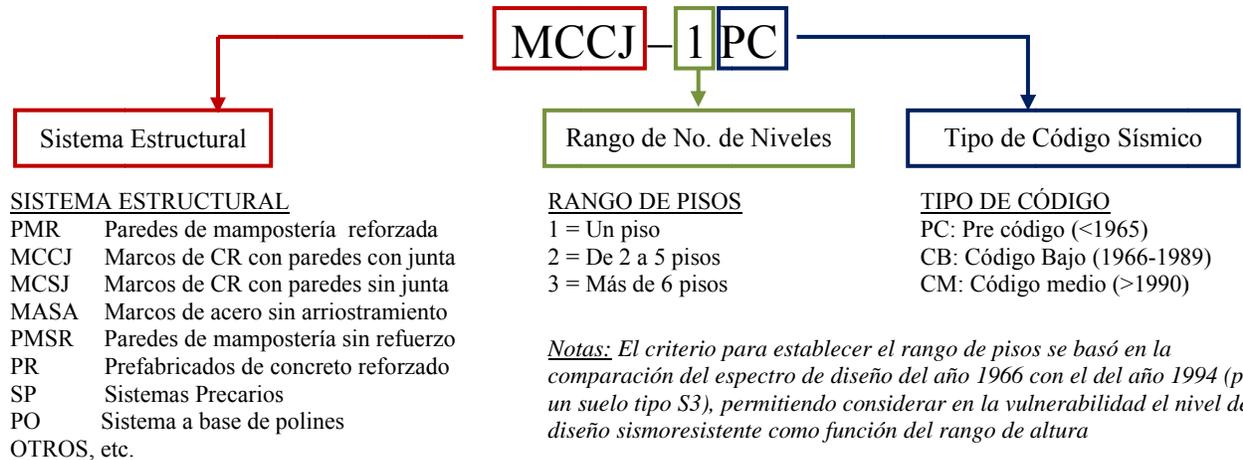
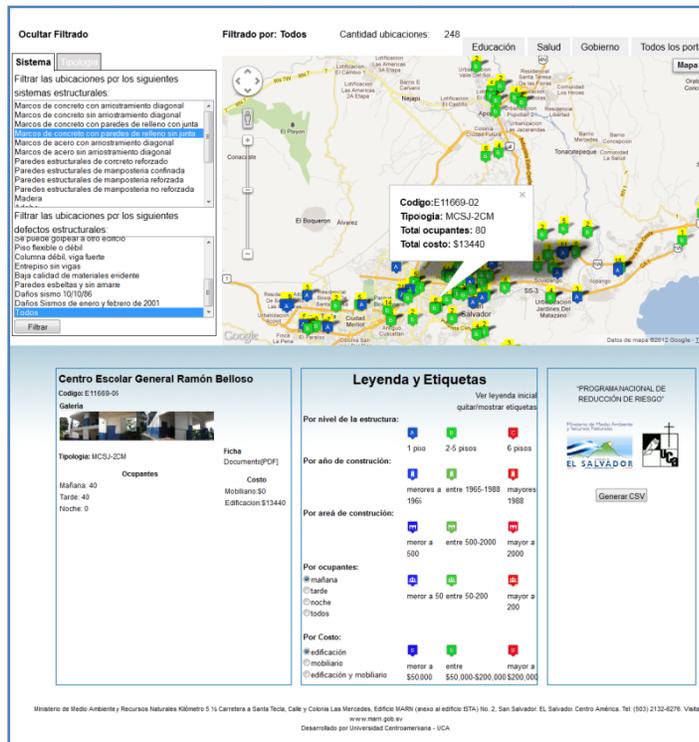
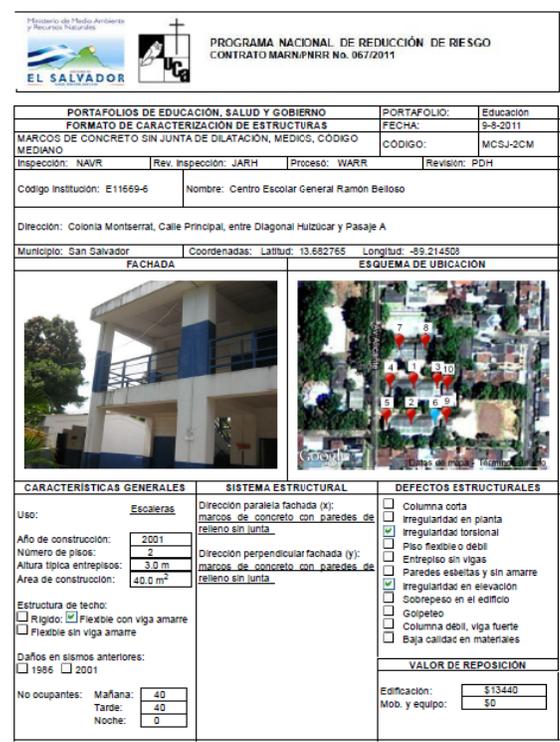


Figura 3.2: Codificación Básica de Tipologías Constructivas

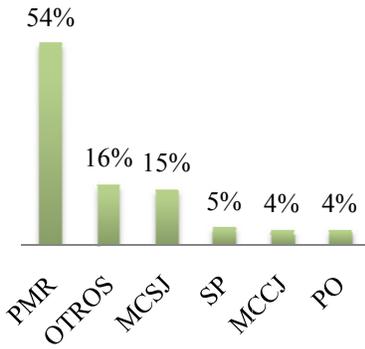


a) Interfaz de Consulta

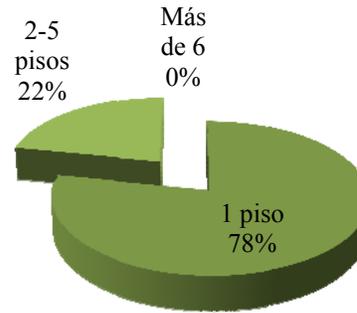


B) Ficha Final

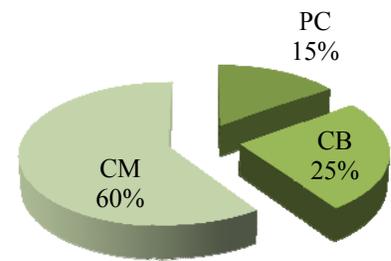
Figura 3.3: Ejemplos de Pantalla de la Interfaz de Consulta de la Información Levantada [desarrollada por la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”, 2011] y Ficha Técnica Final



Según Tipologías

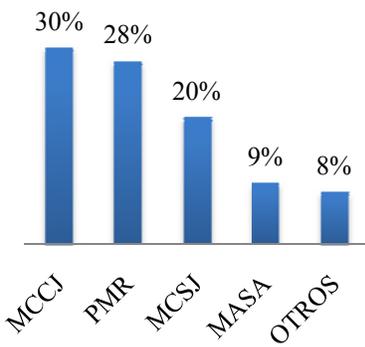


Según Número de Pisos

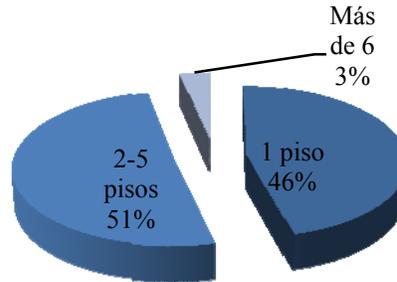


Según Código de Diseño

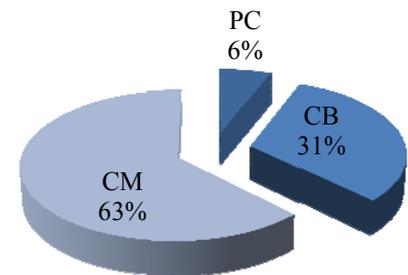
a) Portafolio de Educación



Según Tipologías

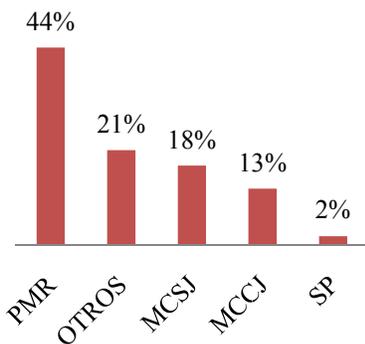


Según Número de Pisos

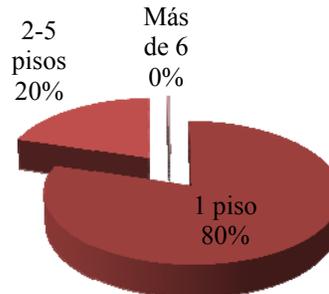


Según Código de Diseño

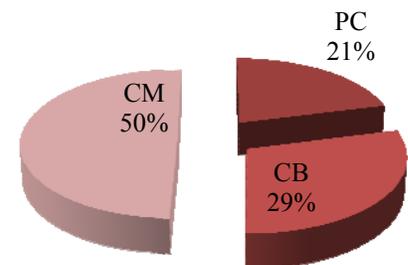
b) Portafolio de Gobierno



Según Tipologías



Según Número de Pisos



Según Código de Diseño

c) Portafolio de Gobierno

Figura 3.4. Análisis de Edificaciones Evaluadas para los Portafolios de Educación, Salud y Gobierno

4 GENERACIÓN DE CURVAS DE VULNERABILIDAD SÍSMICA

4.1 Introducción

Parte fundamental del análisis de riesgos es definir la susceptibilidad al daño o vulnerabilidad de un activo sometido a una amenaza determinada, en este caso la amenaza sísmica. La vulnerabilidad se mide en términos de un porcentaje medio de daño, definido en general como el costo necesario para llevar el bien a su estado inicial (costo de reposición), como porcentaje del valor total del bien. Se llama función de vulnerabilidad a la relación entre este valor con el parámetro de intensidad seleccionado para el fenómeno amenazante, para el caso la aceleración espectral correspondiente (considerando únicamente vulnerabilidad estructural). La Figura 4.1 muestra ejemplo de curvas de vulnerabilidad.

4.2 Generación de Curvas de Vulnerabilidad

Las curvas de vulnerabilidad pueden generarse mediante resultados experimentales de pruebas de carga (ej. proyecto Taishin), mediante procedimientos analíticos en edificios con suficiente información para desarrollar modelos y obtener curvas de capacidad (ej. análisis sísmicos no lineales) [Figura 4.2], mediante procedimientos aproximados y bajo criterio de expertos.

Para el caso, se generaron curvas de vulnerabilidad para todos los sistemas identificados, diferenciando tipologías constructivas, rango de número de niveles, nivel de código sismoresistente (año de construcción), e incorporando factores de reducción de resistencia ante la existencia de defectos estructurales. Las curvas de vulnerabilidad resultantes fueron calibradas utilizando información de daños de los sismos de 2001 (ver Benito et al., 2003) y registros acelerográficos. Para cada edificación se relacionó la intensidad correspondiente (aceleración espectral), en la estación acelerográfica más cercana, al nivel de daño según la calificación por bandera [Figuras 4.3].

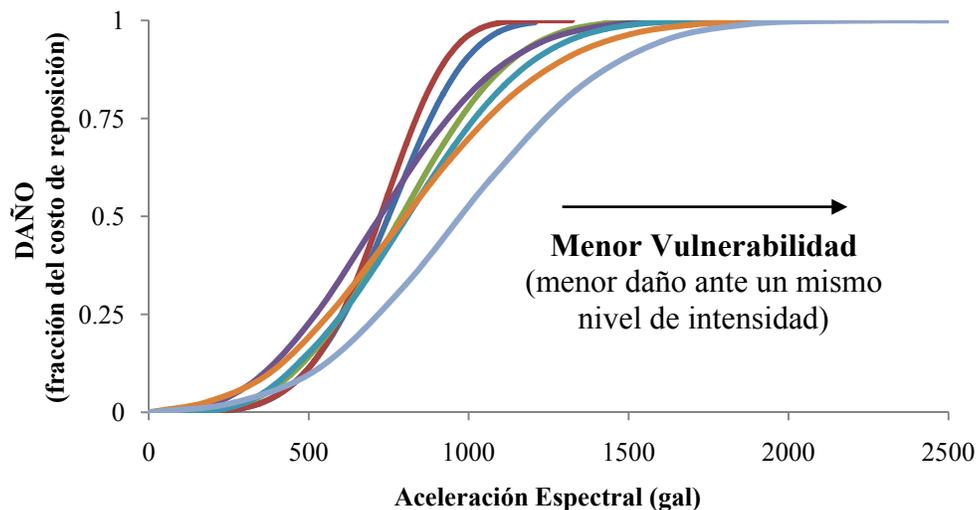
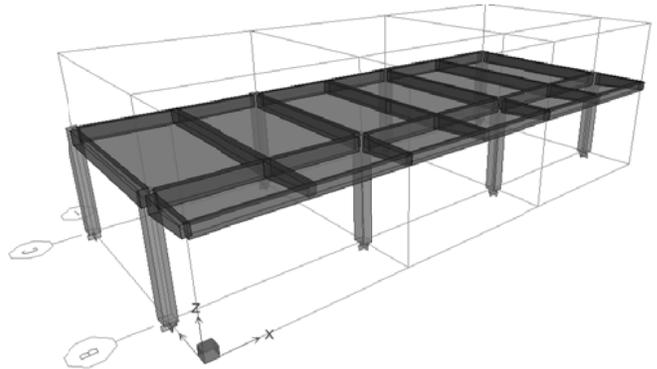


Figura 4.1: Curvas de Vulnerabilidad



a) Fotografía de Fachada



b) Modelo Tridimensional

Figura 4.2: Modelo utilizado para el Análisis Estático No-Lineal de la Escuela Walter T. Denninger.

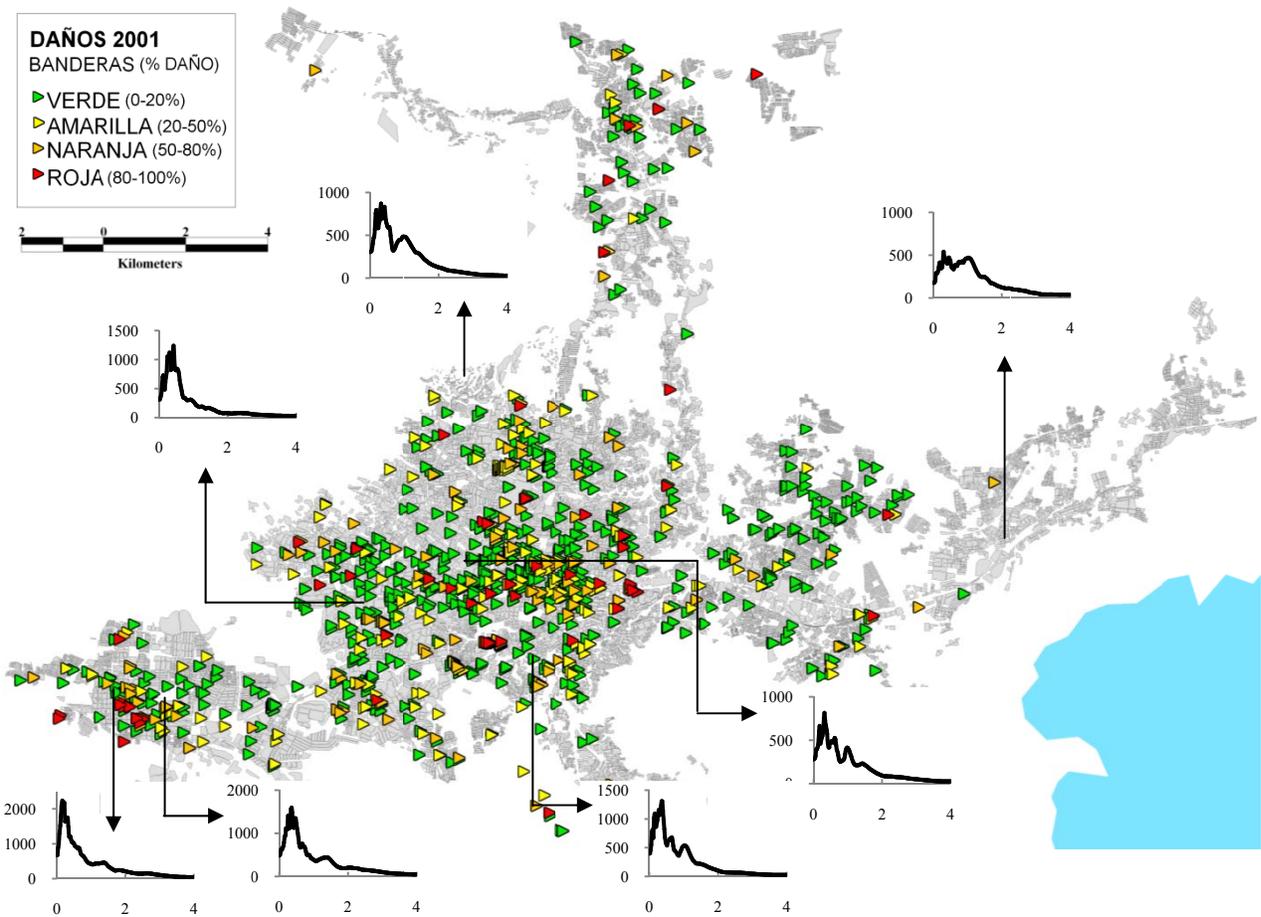


Figura 4.3: Aceleraciones Espectrales y Daños Observados (banderas) para el Sismo del 13.01.2001

5 MODELO DE RIESGO SÍSMICO PARA EL AMSS

El análisis probabilista de riesgo sísmico consideró 24,996 posibles escenarios sísmicos y 1550 edificaciones de los Portafolios de Educación, Salud y Gobierno.

Del Análisis Probabilista de Escenarios de Riesgo Sísmico se obtuvo un valor de “Prima Pura” (costo anual del riesgo, sin considerar gastos de gestión) de US \$14.7 Millones, lo que representa aproximadamente un 5.78% del valor de infraestructura expuesta. La prima pura indica el valor que debe ser reservado anualmente para cubrir las pérdidas esperadas futuras, y está dada por la pendiente de las pérdidas acumuladas en el tiempo [Figura 5.1]. La Figura 5.2 presenta los resultados en términos de pérdida máxima probable para diferentes períodos de retorno. Debido a la falta de información, los costos de mobiliario y equipo no fueron considerados en el análisis, por lo que las pérdidas físicas están relacionadas únicamente al valor de reposición de la infraestructura.

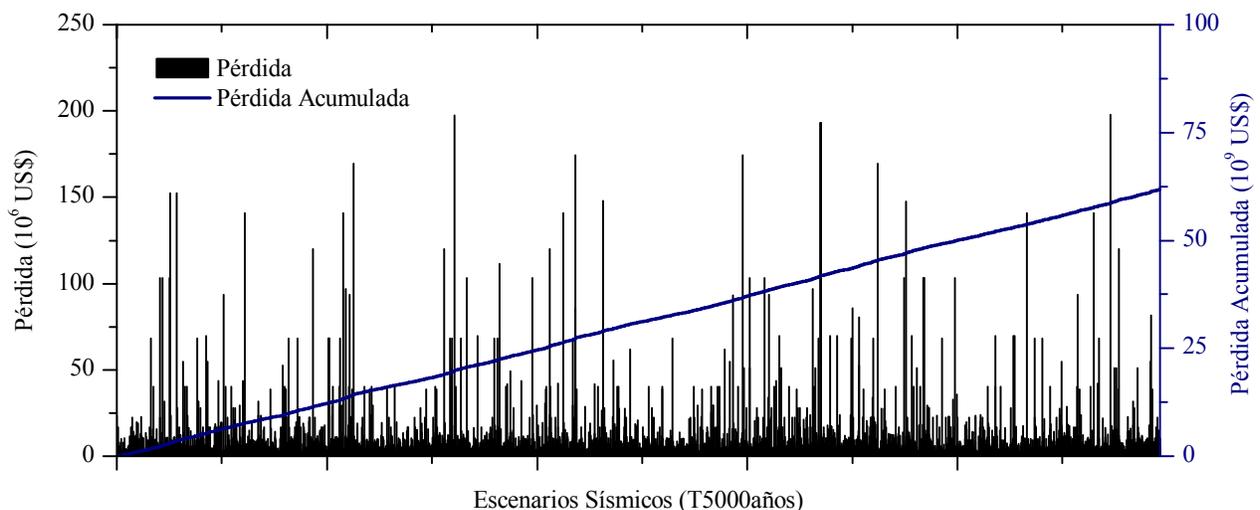
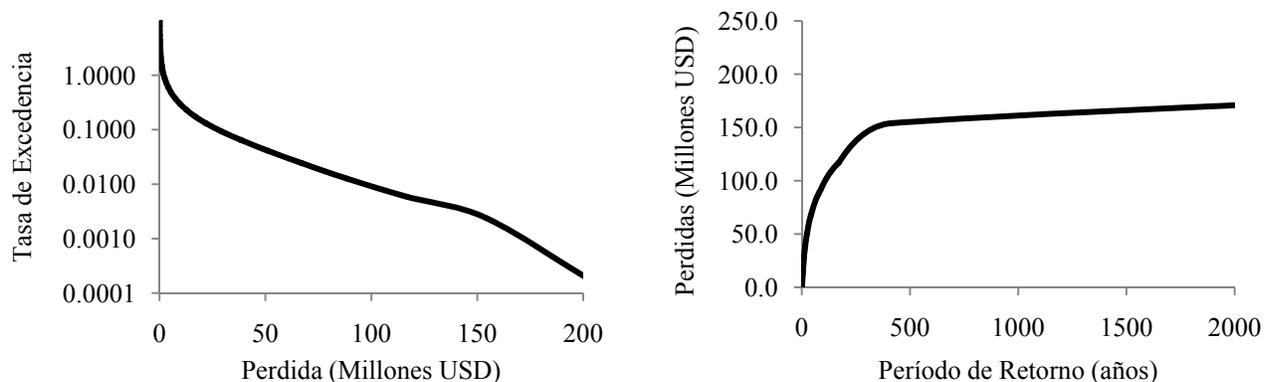


Figura 5.1: Resultados del Análisis Probabilista de Riesgo - Prima Pura (costo anual del Riesgo)



a) Curva de tasa de excedencia de pérdidas

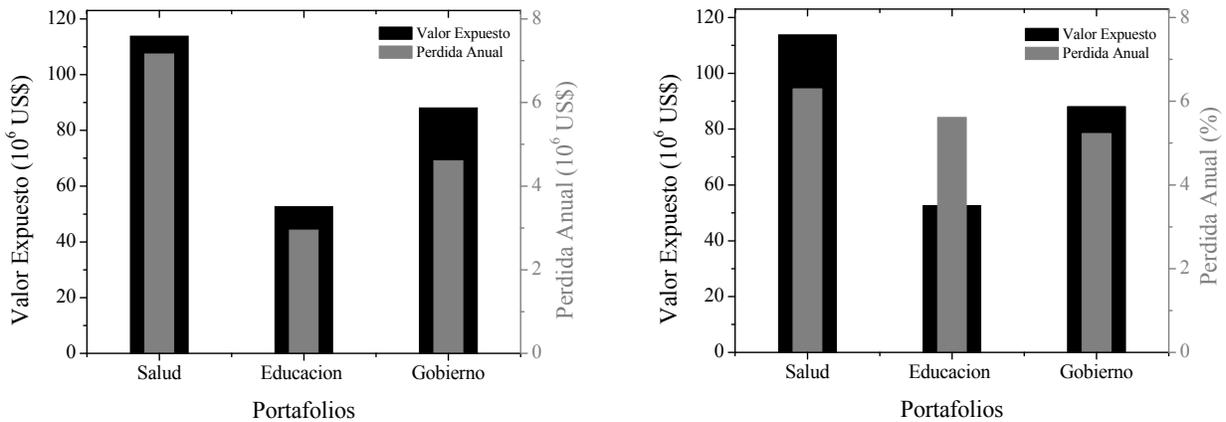
b) Variación de PML con el Período de Retorno

Figura 5.2: Resultados del Análisis Probabilista de Riesgo – Pérdida Máxima Probable (PML)

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Las mayores pérdidas físicas las concentra el portafolio de salud, con una prima pura o pérdida anual esperada de US\$7.16 Millones, que corresponde al 6.29% del valor total expuesto para este portafolio. Para los portafolios de educación y gobierno, se estiman pérdidas físicas anuales esperadas de US\$2.95 Millones y US\$4.61 Millones respectivamente, 5.61% y 5.22% de los valores expuestos de la infraestructura analizada. La Figura 5.3 presenta los resultados obtenidos para cada portafolio en términos de pérdida anual esperada o prima pura.

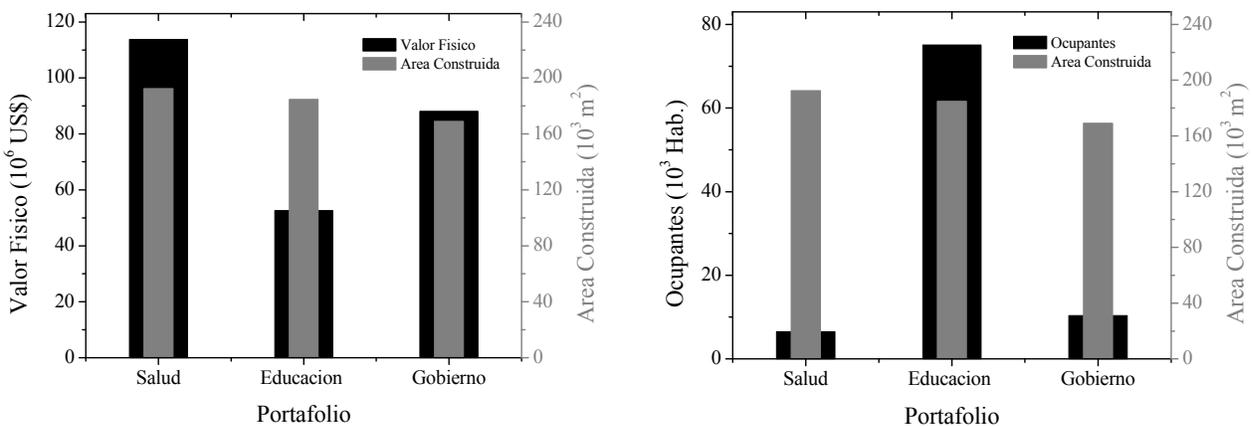
Importante notar que en el portafolio de salud, a pesar de estar constituido por únicamente 42 de las 256 instituciones evaluadas, el total de área construida y el valor físico expuesto es considerablemente mayor que para el resto de carteras [Figura 5.4]. La población expuesta parece estar concentrada en su mayoría en el sector educativo, lo cual se debe en gran parte a que no se cuenta con información completa para los portafolios de salud y gobierno. La Figura 5.5 muestra los histogramas de las pérdidas para cada uno de los portafolios, en términos de pérdidas anuales esperadas físicas (totales y como porcentaje del valor expuesto). La Figuras 5.6 y 5.7 muestran la distribución espacial de las pérdidas (prima pura) para todos los portafolios.



a) Pérdida anual esperada en Millones US\$

b) Pérdida anual esperada en % del valor expuesto

Figura 5.3: Valor Expuesto y Pérdida Anual Esperada para los Portafolios Analizados

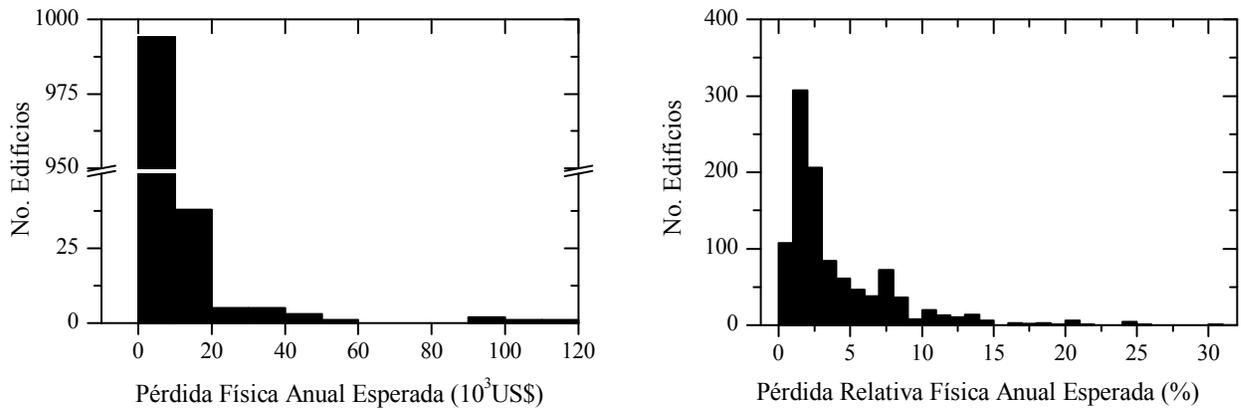


a) Valor Físico

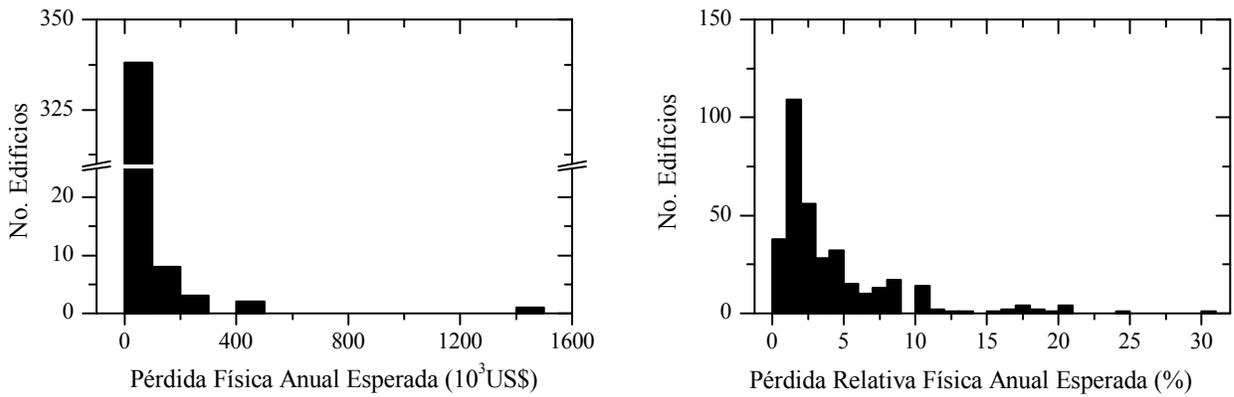
b) Ocupación

Figura 5.4: Distribución de Valores Expuestos y Área Construida para los Portafolios Analizados

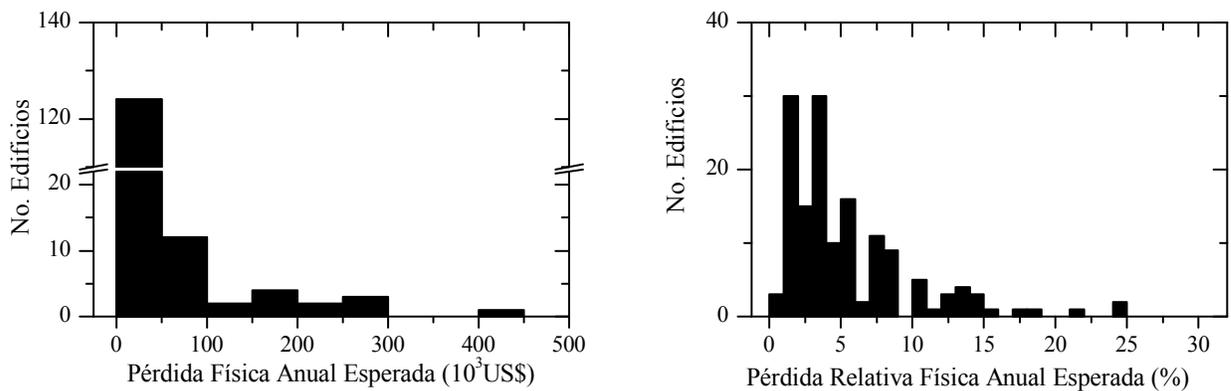
Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales



a) *Portafolio de Educación*



b) *Portafolio de Salud*



c) *Portafolio de Gobierno*

Figura 5.5: Histogramas de Pérdidas Físicas para cada uno de los Portafolios

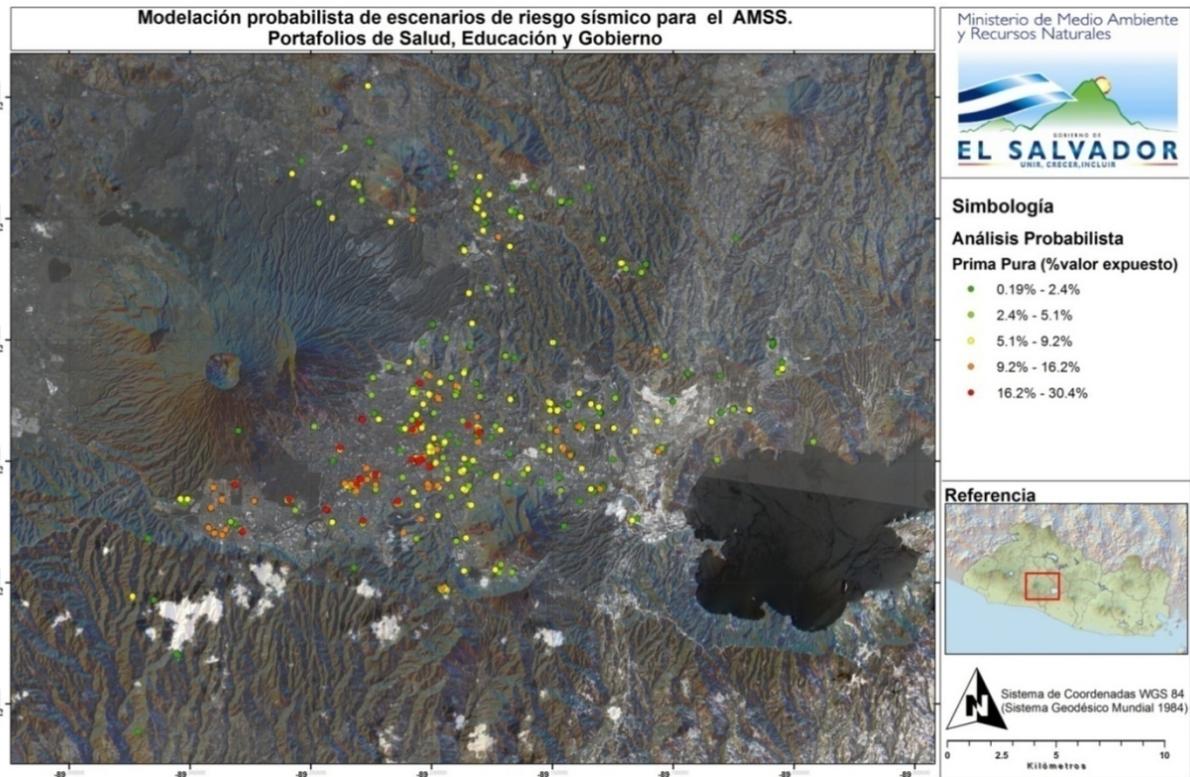


Figura 5.6: Pérdida Anual Esperada (Prima Pura) como Porcentaje del Valor Expuesto

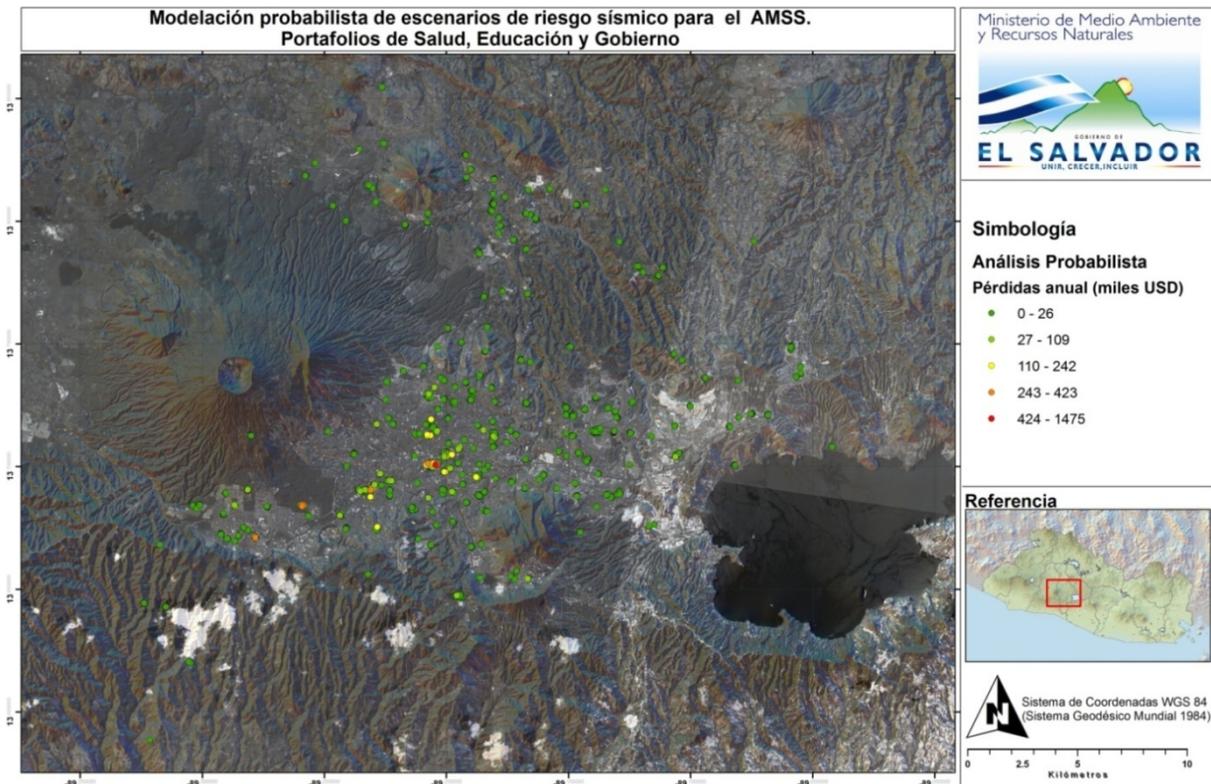


Figura 5.7: Pérdida Anual Esperada (Prima Pura) en Monto Económico

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Estos resultados representan el monto por infraestructura expuesta que debería ser reservado anualmente para cubrir el costo de las pérdidas futuras (por ej., una pérdida anual esperada del 2% del valor de la edificación, representa que anualmente se debe reservar el 2% del costo de la edificación para cubrir pérdidas futuras por sismo) y permiten priorizar las edificaciones que deben ser estudiadas en detalle y posiblemente intervenidas: aquellas en las que es más rentable invertir en reforzamiento estructural que afrontar las pérdidas futuras. Los resultados muestran que las mayores pérdidas están concentradas en un pequeño porcentaje de las edificaciones expuestas.

Las pérdidas físicas máximas pueden estar concentradas en edificios en los que los niveles de daño no sean los más altos, pero que tengan un alto costo de reposición. Las pérdidas relativas físicas nos indican los sistemas que pueden resultar más dañados, sin que esto necesariamente represente pérdidas económicas o humanas significativas, ya que puede tratarse de sistemas de muy bajo costo (ej. sistemas precarios) o de edificaciones con bajos niveles de ocupación. Tener claro el significado de estos resultados es vital para establecer criterios para la priorización de las edificaciones estratégicas.

Por otra parte, con el objetivo de estimar el nivel de daño que pudiera esperarse en la infraestructura actual de los portafolios analizados, se estudiaron también escenarios sísmicos con características similares a eventos históricos. Se consideraron en el estudio los sismos del 10 de Octubre de 1986 (5.7 Mw) y 13 de enero de 2001 (7.7 Mw) [Figura 5.8 y 5.9]. La Figura 5.10 muestra los resultados para el evento que representa las máximas pérdidas, siendo este un sismo de Mw 6.8 con epicentro en el AMSS a una profundidad de 10 km.

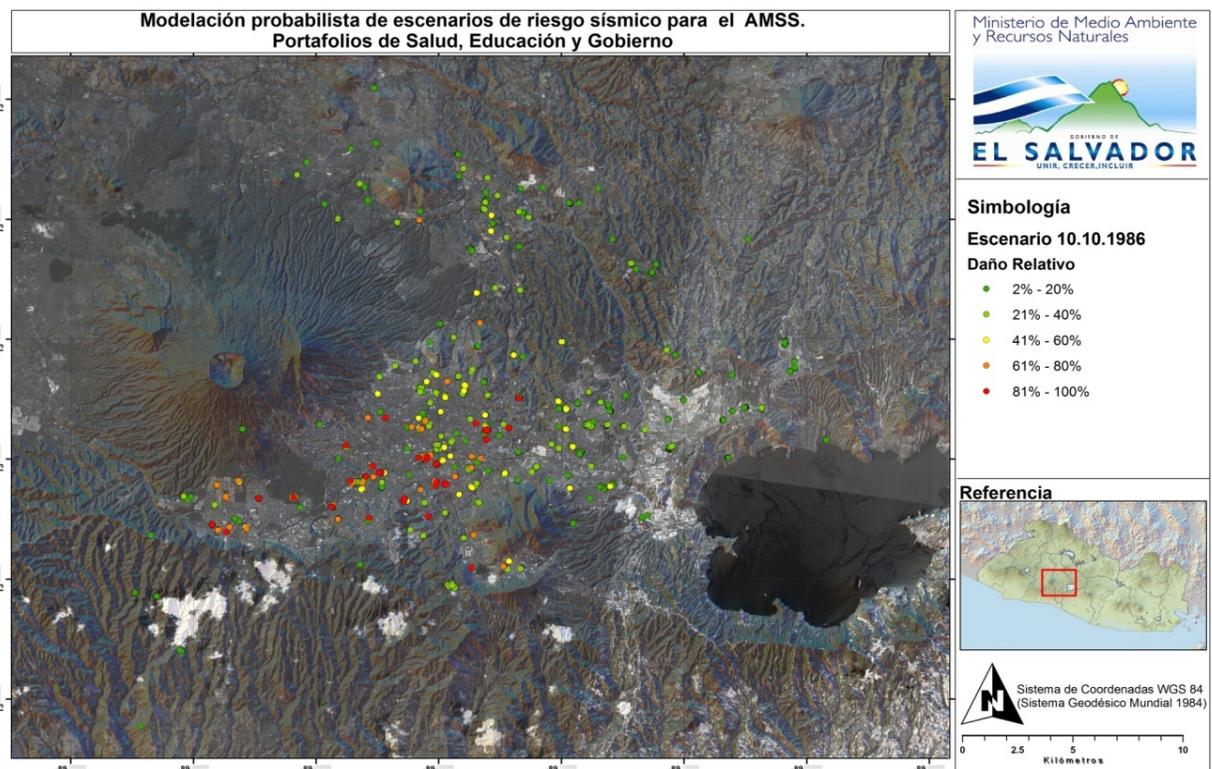


Figura 5.8: Resultados para Sismo con las Mismas Características del Evento del 10.10.1986

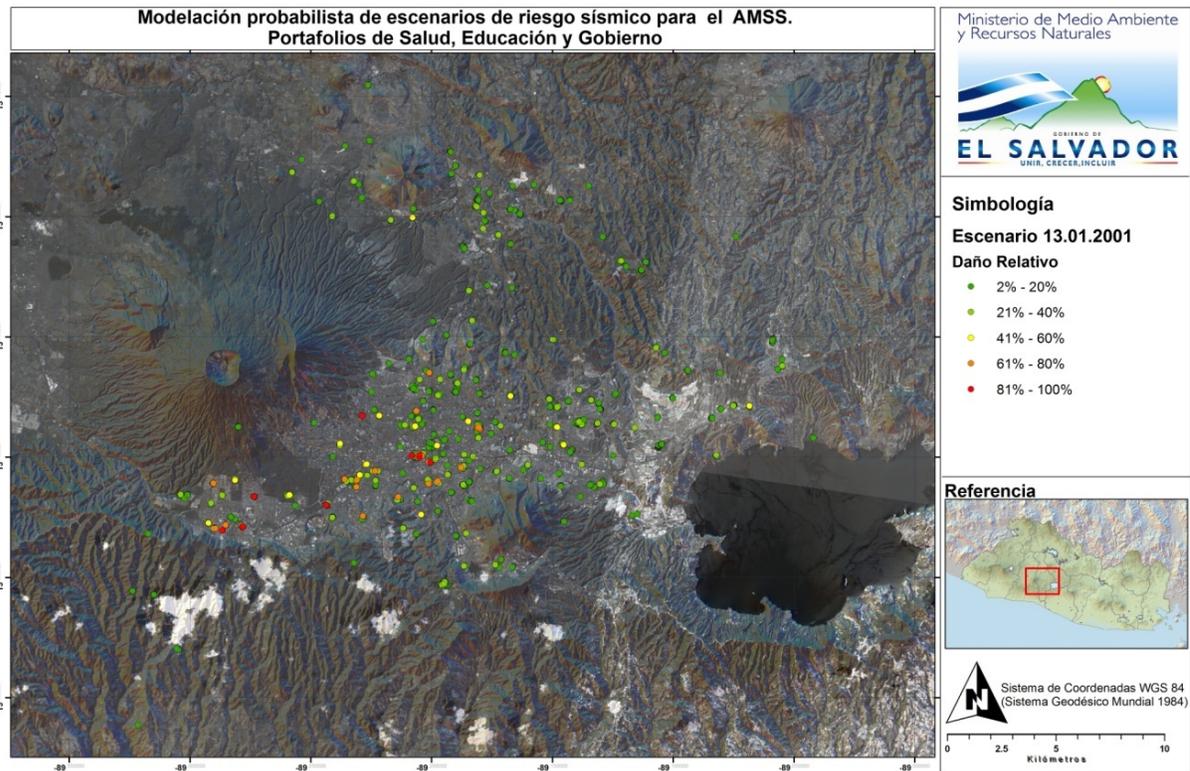


Figura 5.9: Resultados para Sismo con Características Similares a las del Evento del 13.01.2001

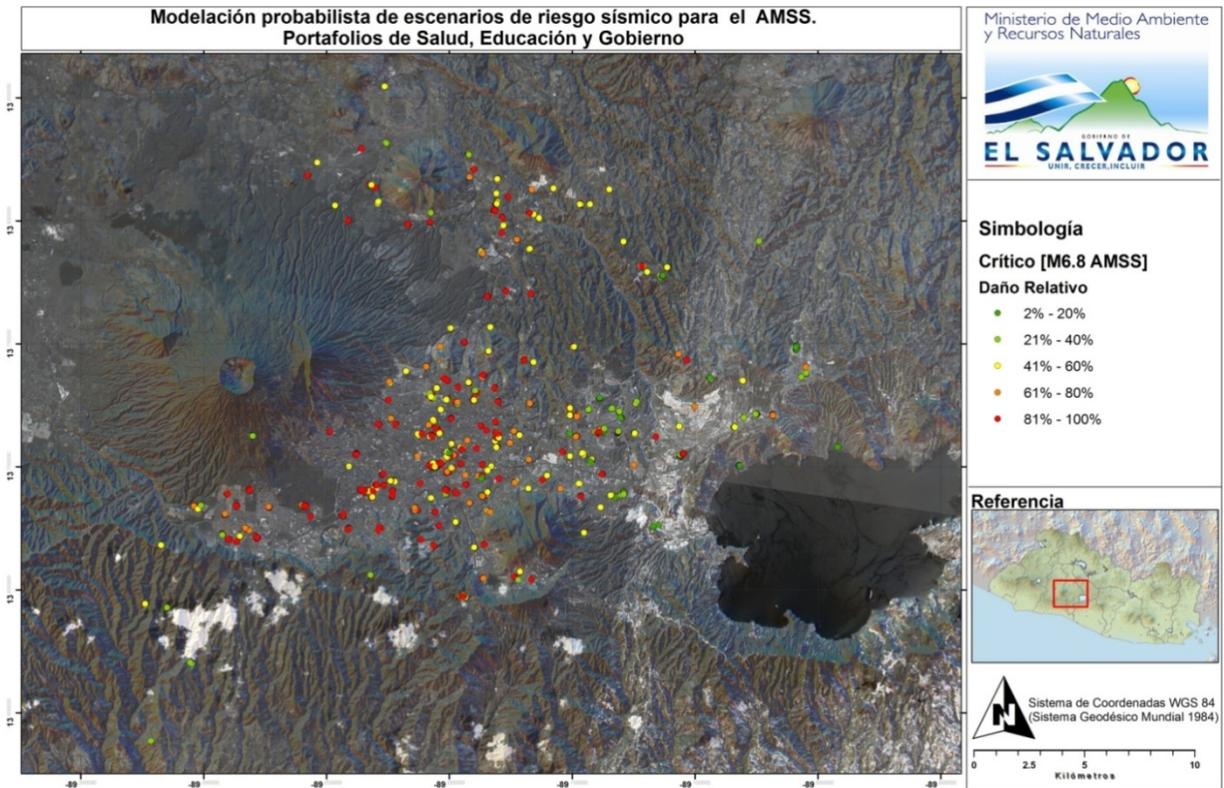


Figura 5.10: Resultados para el Escenario Crítico (Mw 6.8 con epicentro en el AMSS, Prof. 10 km.)

CONCLUSIONES

El análisis de Riesgo Sísmico presentado para el Área Metropolitana de San Salvador, particularmente para los Portafolios de Educación, Salud y Gobierno, debe concebirse como una estimación inicial según la información existente, y debe ser complementada y revisada a medida nuevo conocimiento sea adquirido. Aún con las limitantes del caso, los resultados obtenidos son ya valiosos para efectos de toma de decisiones.

Del análisis de riesgo sísmico para el AMSS para la infraestructura de los portafolios seleccionados, se obtiene una pérdida máxima probable de US\$154.76 Millones para un período de retorno de 500 años, lo que equivale al 60.81% del valor expuesto. La prima pura del riesgo sísmico calculada para los sectores es del orden del US\$14.7Millones, aproximadamente el 5.78% del valor total expuesto, con las máximas pérdidas concentradas en un pequeño porcentaje de edificaciones. La condición de riesgo es considerable, y se deben tomar medidas para reducirlo. Los resultados del análisis de riesgo permiten priorizar edificaciones estratégicas, a las cuales se les deberán realizar estudios de detalle para determinar posteriormente su posible intervención.

Durante el levantamiento de información de exposición se seleccionaron los parámetros considerados como más influyentes en el comportamiento sísmico de las edificaciones, prestando atención a las principales causas estructurales de daños durante eventos sísmicos pasados. El trabajo de campo evidenció el crecimiento desordenado que se viene dando en la ciudad, tanto por la impresionante cantidad de edificaciones (1550 edificaciones en únicamente 257 instituciones), como por la improvisación observada al momento de construcción, resultando en combinación de sistemas y defectos estructurales/constructivos, y por tanto, en una alta vulnerabilidad sísmica.

La influencia de los defectos estructurales en el comportamiento sísmico de las estructuras es un factor muy importante a considerar, especialmente en tipologías que suponen una considerable cantidad de defectos (ej. marcos de concreto sin junta de dilatación) y que han evidenciado un mal comportamiento durante eventos sísmicos pasados. El 53.2% de las edificaciones expuestas presentan al menos un defecto estructural y/o constructivo. Se debe poner especial atención a los sistemas identificados como precarios o con defectos críticos, realizar comprobaciones de campo, estudios de detalle e intervenciones en caso necesario. Estos defectos, pueden tener una fuerte influencia no solo en el porcentaje de daño esperado, sino también en el tipo de colapso, lo cual debe ser estudiado en detalle para mejorar análisis futuros.

Los escenarios de riesgo para eventos sísmicos históricos muestran buena consistencia en cuanto a la distribución de daños observada. Esto se debe principalmente a las condiciones de sitio, demostrando la importancia de su investigación. La influencia de las condiciones locales de suelo en el daño potencial sísmico para diferentes tipos de edificaciones, debe ser considerada tanto en los planes de desarrollo y ordenamiento territorial como en las normativas de diseño sismo-resistente.

Lineamientos para la Reducción del Riesgo Sísmico

El objetivo del análisis de riesgo sísmico es determinar el nivel de riesgo existente en un determinado lugar, con el fin último de reducirlo a niveles “aceptables” dentro de las limitaciones económicas del país. La valoración del riesgo sísmico es, entonces, el punto de partida para la definición de líneas de acción que permitan avanzar hacia una gestión integral de éste.

En el Salvador, como es el caso de muchos países en vías de desarrollo, la gestión de riesgos ha estado enfocada principalmente en una gestión reactiva. Eventos pasados han evidenciado las consecuencias del desordenado proceso de urbanización, la falta de planificación y de definición de políticas para la prevención y reducción del riesgo, y eventos futuros podrían causar enormes pérdidas tanto económicas como en términos de vidas humanas.

Los desastres naturales se encuentran íntimamente relacionados con los procesos de desarrollo humano, y este a su vez, puede generar nuevos riesgos al no considerar debidamente los peligros naturales. En ciudades ubicadas en zonas sísmicas, como es el caso del AMSS, donde existe una elevada amenaza sísmica y un alto nivel de exposición, el nivel de riesgo sísmico está controlado por la vulnerabilidad sísmica de la infraestructura existente, relacionada a su vez al nivel de conocimiento de la peligrosidad de la región.

La gestión integral del riesgo debe incorporar desde la identificación de la amenaza y las características de la infraestructura existente, hasta la implementación de medidas correctivas para reducir la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones, el desarrollo y actualización de normativas de ordenamiento territorial por riesgo sísmico y códigos de diseño sismoresistente, y la definición de planes de respuesta ante la emergencia.

La aplicación de medidas de mitigación y reducción del riesgo sísmico permitirán reducir las pérdidas de vidas humanas durante futuros terremotos, promoviendo el desarrollo sostenible de la ciudad. La Tabla 6.1 resume las actividades que han sido o están siendo actualmente desarrolladas por el MARN en el tema de riesgo sísmico, así como actividades futuras identificadas en el estudio para reducir el nivel de riesgo existente, considerando los distintos componentes involucrados en la gestión integral del riesgo.

Tabla 6.1: Investigaciones desarrolladas por el MARN en el tema de riesgo sísmico y actividades futuras identificadas para reducir el nivel de riesgo existente

Medida		Actividades Desarrolladas	Actividades Futuras Necesarias
VALORACIÓN DEL RIESGO	Instrumentación para generar datos. Evaluación de amenaza y riesgo sísmico.	Ampliación de la red de monitoreo sísmico (de 40 a 82 estaciones) Evaluación de Amenaza Sísmica en América Central (2008) [NORSAR/CEPREDENAC] Evaluación Preliminar de Efecto de Sitio en el AMSS y sus efectos sobre la Infraestructura (2011) Levantamiento de información de exposición en los sectores Salud Educación, y Gobierno e investigación sobre el comportamiento ante sismos de estructuras típicas (2011) Modelo de Riesgo Sísmico para el AMSS – Portafolios de Salud, Educación y Gobierno (2012) [BM].	Actualizar constante-mente los estudios de amenaza a partir de la generación de nuevos datos Microzonificación Sísmica de la RMSS Levantamiento de información de exposición y estudio de características de la infraestructura existente en ciudades principales Instrumentación de edificios importantes para estudiar su comportamiento sísmico y monitorear su estado
GESTIÓN REACTIVA	Planes de respuesta ante la emergencia – identificar zonas más afectadas para dirigir ayuda	Ampliación de la red de Monitoreo Sistema de Localización automática, para reducir tiempos de divulgación de la información (en prueba)	Mapas de Intensidad (aceleración) en tiempo real en base a modelos y datos acelerográficos Mapas de riesgo en tiempo real para identificar zonas críticas (necesario conocer las características de la infraestructura existente en la ciudad) Elaboración de planes de respuesta
G. CORRECTIVA Y PROSPECTIVA	Reducir la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones (existentes y futuras)	Identificación de Infraestructura con mayores niveles de riesgo sísmico (infraestructura crítica) para priorizar su estudio y posible intervención (Educación, Salud y Gobierno) Evaluación Preliminar de Efecto de Sitio en el AMSS y sus efectos sobre la Infraestructura (2011)	Estudios de detalle de infraestructura estratégica y posible reforzamiento estructural Definición de lineamientos de Ordenamiento Ambiental territorial por riesgo sísmico (Microzonificación) Actualización de Normativa de Diseño Sismoresistente Programas de concientización

REFERENCIAS

Benito B., Hasbun, P., Cepeda, J., Hernández, D., Pullinger, C., Marroquin, G., Martínez, J., (2005) *Caracterización del Movimiento del Suelo y sus Efectos en la Infraestructura durante los Terremotos del 2001, El Salvador*, Universidad Politécnica de Madrid, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas y Servicio Nacional de Estudios Territoriales, San Salvador, El Salvador

Bommer, J., W. Salazar, R. Samayoa. (1998) *Riesgo Sísmico en la Región Metropolitana de San Salvador*. Programa Salvadoreño de Investigación sobre Desarrollo y Medio Ambiente (PRISMA).

EM-DAT (2012): The OFDA/CRED International Disaster Database www.em-dat.net - Université Catholique de Louvain - Brussels - Belgium"

Hernández, W. (2007), *Aspectos Geológicos que Influyen en las Aguas Subterráneas y en la Respuesta Sísmica del Área Metropolitana de San Salvador*, Revista de la Asociación Salvadoreña de Ingenieros y Arquitectos (ASIA), San Salvador, El Salvador.

Kattan Jokisch, C. (2010). *Re-Interpretation of Seismic Damage Scenarios: Risk Mapping for the case Study of San Salvador (El Salvador, 1986)*, Master Thesis, Bauhaus Universität Weimar & Earthquake Damage Analysis Center, Weimar, Alemania.

López M, Bommer, J.J., y Pinho, R. (2004) *Seismic Hazard Assessments, Seismic Design Codes and Earthquake Engineering in El Salvador*, in Rose, W.I, et al., eds., *Natural Hazards in El Salvador*, Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Paper 375, p.p. 301

Marroquín G. y Benito, B (2009), *Evaluación de la Amenaza Sísmica en El Salvador*. Informe nacional derivado del estudio RESIS II

Molina, E., Marroquín, G., Escobar J., Talavera, E., Rojas, W., Climent, A., Camacho, E., Benito, B., Lindholm, C. (2008), *Evaluación de la Amenaza Sísmica en Centroamérica*, NORSAR Informe de Proyecto RESIS II

Servicio Nacional de Estudios Territoriales SNET, ahora Dirección General del Observatorio Ambiental (2004), *Sismos En El Salvador 1900-2001: Contexto*
<http://www.snet.gob.sv/Riesgo/analisis/SISMOSELSALVADORyCA.pdf>