



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

EVALUACIÓN DE LA AMENAZA Y EL RIESGO SÍSMICO EN EL SUB-SAHARA
AFRICANO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
SEBASTIÁN GIRALDO GRISALES

TUTOR PRINCIPAL:
DR. MARIO G. ORDAZ SCHROEDER, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

MÉXICO, CDMX. MARZO 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Luis Esteva Maraboto
Secretario: Dr. Eduardo Reinoso Angulo
Vocal: Dr. Mario G. Ordaz Schroeder
1^{er.} Suplente: Dr. Mauro P. Niño Lázaro
2^{do.} Suplente: Dr. Shri K. Singh Singh

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería de la UNAM

TUTOR DE TESIS:

Dr. Mario G. Ordaz Schroeder

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por todo su apoyo a lo largo de estos años de aprendizaje y sus siempre palabras de aliento a pesar de la lejanía.

A Maria Clara, por su constante motivación y estar a mi lado en esta etapa tan importante de mi vida.

A mi tutor de tesis, el Dr. Mario Ordaz, por todas sus enseñanzas y la orientación brindada para el buen desarrollo de esta tesis.

Al Dr. Shri Krishna Singh, por compartir sus conocimientos en el área de la Geofísica.

Al Dr. Mauro Niño, por sus comentarios y sugerencias los cuales ayudaron a enriquecer este trabajo.

Al Dr. Luis Esteva y al Dr. Eduardo Reinoso por la lectura y revisión de esta tesis.

A todos mis compañeros de Maestría y del Instituto de Ingeniería de la UNAM que, de algún modo, hicieron que mi estancia en México fuera más amena.

Al CONACYT y al Instituto de Ingeniería de la UNAM que hicieron posible el desarrollo, y buen término, de este trabajo de investigación.

RESUMEN

El propósito de esta tesis es el estudio de la amenaza y el riesgo sísmico en el Sub-Sahara Africano, específicamente en los países de Etiopía, Kenia y Uganda. El catálogo sísmico que se utilizó fue el resultado de combinar los catálogos reportados por el ISC-GEM y GAR15, y comprende un periodo de tiempo desde 1900 hasta 2011. Las zonas sismogénicas se definieron a partir de la sismotectónica de la zona, junto con la opinión de expertos y resultados de estudios previos. Se definieron doce (12) zonas sismogénicas, incluida la sismicidad de fondo, y para cada una de ellas se calcularon los parámetros sísmicos. La sismicidad local (β y λ) se definió a partir de la metodología propuesta por Arboleda & Ordaz (1993), la cual se basa en el método de los estimadores de máxima verosimilitud. Dada la poca información que se tiene respecto a relaciones de atenuación desarrolladas para la zona de estudio, se decidió utilizar la propuesta de Spudich et al. (1999), que, a pesar de ser aplicable para el oeste de los Estados Unidos de América, es válida para esta zona debido a la similitud entre ellas. Adicional a ello, para las zonas con actividad sísmica más baja, se utilizó la relación de atenuación propuesta por Pezeshk, Zandieh, & Tavakoli (2011). Se obtuvieron mapas de amenaza sísmica en términos de aceleración del suelo para 8 periodos estructurales y 8 periodos de retorno (10, 25, 50, 100, 250, 475, 500 y 1000 años). En todos los mapas se pudo identificar zonas de sismicidad considerable como la Depresión de Afar, el Rift de Etiopía y la rama oeste del sistema EARS dentro de los cuales se pudo observar un máximo de 1,475 gal; así como zonas de relativa calma como la rama este del mismo sistema y los extremos este y oeste de Etiopía. Se construyeron bases de datos exposición para inmuebles, centros de salud e instituciones educativas actualizadas al año 2015 junto con una proyección al 2050 basada en el crecimiento histórico del producto interno bruto (PIB) de cada país. Las funciones de vulnerabilidad se construyeron por medio de modelos analíticos y estudios desarrollados en países donde la construcción es similar, por lo tanto, aplicable a los países en estudio. Se llevó a cabo un análisis probabilista de riesgo en el cual se obtuvieron las pérdidas anuales esperadas para cada uno de los países en cuestión. Para los inmuebles se reportaron las mayores pérdidas, mientras que en los centros de salud e instituciones educativas fueron menores. En ninguno caso se obtuvieron pérdidas mayores al 10% del costo total de reposición. Además, se observó que analizar las pérdidas anuales esperadas por km² de área es un buen parámetro de medida ya que es un valor normalizado y pone en evidencia los lugares en donde se deben enfocar las medidas de mitigación y prevención.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vii
CONTENIDO	ix
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES.....	2
OBJETIVOS	3
Objetivo Principal	3
Objetivos Específicos	3
ALCANCES Y LIMITACIONES	4
CAPÍTULO 1 . DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	5
1.1. ASPECTOS GENERALES	5
1.2. GEOLOGÍA Y TECTÓNICA	6
1.3. SISMICIDAD.....	8
CAPÍTULO 2 . CARACTERIZACIÓN SÍSMICA	9
2.1. CATÁLOGO SÍSMICO	9
2.1.1. ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009).....	9
2.1.2. Evaluación Global sobre la Reducción del Riesgo de Desastres (GAR15).....	10
2.1.3. Consolidación de los Catálogos Sísmicos ISC-GEM y GAR15	11
2.2. ZONAS SISMOGÉNICAS.....	13
2.3. PARÁMETROS SÍSMICOS	17
2.4. RELACIONES DE ATENUACIÓN	19
2.4.1. Zonas Tectónicamente Activas	20
2.4.2. Zonas Tectónicamente Estables	21
2.5. EFECTOS DE SITIO.....	23
2.5.1. Generalidades	24
2.5.2. Cuantificación de los Efectos de Sitio	25
CAPÍTULO 3 . ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE AMENAZA SÍSMICA	29
3.1. HERRAMIENTA COMPUTACIONAL	30
3.2. MARCO TEÓRICO	30
3.3. MODELO PROBABILÍSTICO DE AMENAZA SÍSMICA.....	31
3.4. RESULTADOS DE AMENAZA SÍSMICA.....	32
3.5. RESULTADOS DE AMENAZA CON OTRAS PROPUESTAS DE GMPE	40
3.5.1. Resultados en Roca.....	41
3.5.2. Resultados en Suelo.....	42
CAPÍTULO 4 . BASES DE DATOS DE EXPOSICIÓN	43
4.1. PRODUCTO INTERNO BRUTO	43
4.2. INMUEBLES	45
4.3. CENTROS DE SALUD E INSTITUCIONES EDUCATIVAS	50
CAPÍTULO 5 . FUNCIONES DE VULNERABILIDAD	53
5.1. DEFINICIÓN DE LA CURVA DE CAPACIDAD MEDIA	54
5.2. CRITERIOS DE DAÑO	60
5.3. EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL.....	61

5.4.	FUNCIONES DE FRAGILIDAD.....	62
5.5.	MODELO DE DAÑOS Y PÉRDIDAS.....	64
5.6.	CONSTRUCCIÓN DE LAS FUNCIONES DE VULNERABILIDAD	66
CAPÍTULO 6 . EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL RIESGO		73
6.1.	MARCO TEÓRICO	73
6.1.1.	Procedimiento para el Análisis del Riesgo.....	73
6.1.2.	Ecuación Básica.....	74
6.1.3.	Incertidumbres	75
6.1.4.	Estimadores Puntuales del Riesgo	76
6.1.5.	Probabilidad de Excedencia de Valores de Pérdida	77
6.2.	HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO.....	77
6.2.1.	Descripción General del Programa CAPRA-GIS	79
6.3.	MODELO PROBABILISTA DE RIESGO.....	80
6.4.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE RIESGO.....	83
6.4.1.	Inmuebles	84
6.4.2.	Centros de Salud.....	92
6.4.3.	Instituciones Educativas	100
CONCLUSIONES.....		109
BIBLIOGRAFÍA.....		111
ANEXO 1. ESTIMADORES DE MÁXIMA VEROSIMILITUD		A1-1
ANEXO 2. RESULTADOS DE AMENAZA SÍSMICA		A2-1

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Zona de estudio	7
Figura 1.2. Sistema de Ruptura de África del Este (East African Rift System, EARS)	7
Figura 1.3. Dirección del movimiento relativo entre las placas África y Somalia	8
Figura 2.1. Periodos de completez para el catálogo sísmico ISC-GEM.....	10
Figura 2.2. Análisis de completez para el catálogo sísmico GAR15	10
Figura 2.3. Periodos de completez para el catálogo sísmico.....	11
Figura 2.4. Localización epicentral de los registros sísmicos	12
Figura 2.5. Distribución de magnitudes de los registros sísmicos	12
Figura 2.6. Histogramas de magnitud y profundidad del catálogo sísmico.....	13
Figura 2.7. Variaciones de la distancia entre fuente y sitio de estudio para diferentes tipos de sismofuentes.....	14
Figura 2.8. Distribución de profundidades dentro del catálogo sísmico	15
Figura 2.9. Mecanismos focales de los eventos sísmicos	15
Figura 2.10. Zonas sismogénicas.....	16
Figura 2.11. Curvas de tasas de excedencia e histogramas acumulados	19
Figura 2.12. Atenuación de la aceleración pico del suelo (PGA) con respecto a la distancia, para algunos valores de magnitud, de acuerdo con la GMPE de Spudich et al. (1999) en roca.....	20
Figura 2.13. Escalamiento de la aceleración pico del suelo (PGA) con respecto a la magnitud, para algunos valores de distancia, de acuerdo con la GMPE de Spudich et al. (1999) en roca .	21
Figura 2.14. Espectro de respuesta de pseudo-aceleración (5% de amortiguamiento, S_a) para $R_{JB}=0$ km, algunos valores de magnitud y periodo estructural, de acuerdo con la GMPE de Spudich et al. (1999) en roca	21
Figura 2.15. Atenuación de la aceleración pico del suelo (PGA) con respecto a la distancia, para algunos valores de magnitud, de acuerdo con la GMPE de Pezeshk et al. (2011) en roca.....	22
Figura 2.16. Escalamiento de la aceleración pico del suelo (PGA) con respecto a la magnitud, para algunos valores de distancia, de acuerdo con la GMPE de Pezeshk et al. (2011) en roca .	22
Figura 2.17. Espectro de respuesta de pseudo-aceleración (5% de amortiguamiento, S_a) para $R_{RUP}=0$ km, algunos valores de magnitud y periodo estructural, de acuerdo con la GMPE de Pezeshk et al. (2011) en roca	23
Figura 2.18. Valores de V_{s30} (m/s) para la zona de estudio.....	25
Figura 2.19. Factor de amplificación para $y_{ref} = 1$ g y algunos periodos estructurales, de acuerdo a la metodología de Chiou & Youngs (2014)	27
Figura 3.1. Valores de PGA (gal), en roca, asociados a $T_r=475$ años.....	33
Figura 3.2. Valores de PGA (gal), en suelo, asociados a $T_r=475$ años	33
Figura 3.3. Aceleraciones espectrales para $T=0.1$ s (gal), en suelo, para $T_r=475$ años.....	34
Figura 3.4. Aceleraciones espectrales para $T=0.2$ s (gal), en suelo, para $T_r=475$ años.....	35
Figura 3.5. Aceleraciones espectrales para $T=0.3$ s (gal), en suelo, para $T_r=475$ años.....	35
Figura 3.6. Aceleraciones espectrales para $T=0.5$ s (gal), en suelo, para $T_r=475$ años.....	36
Figura 3.7. Aceleraciones espectrales para $T=1.0$ s (gal), en suelo, para $T_r=475$ años.....	36
Figura 3.8. Aceleraciones espectrales para $T=1.5$ s (gal), en suelo, para $T_r=475$ años.....	37
Figura 3.9. Aceleraciones espectrales para $T=2.0$ s (gal), en suelo, para $T_r=475$ años.....	37
Figura 3.10. Valores de aceleración (gal), en suelo, para $T_r=475$ años	39
Figura 3.11. Valores de aceleración (gal), en roca, para $T_r=475$ años, diferentes alternativas de GMPEs y árbol lógico	41
Figura 3.12. Valores de aceleración (gal), en suelo, para $T_r=475$ años, diferentes alternativas de GMPEs y árbol lógico	42
Figura 4.1. Producto interno bruto (PIB) anual de Etiopía, Kenia y Uganda.....	44
Figura 4.2. Distribución de las clases de inmuebles en Etiopía	46

Figura 4.3. Distribución de las clases de inmuebles en Kenia	46
Figura 4.4. Distribución de las clases de inmuebles en Uganda	46
Figura 4.5. Base de datos de inmuebles.....	49
Figura 4.6. Distribución de las clases de centros de salud e instituciones educativas en Etiopía	51
Figura 4.7. Distribución de las clases de centros de salud e instituciones educativas en Kenia	51
Figura 4.8. Distribución de las clases de centros de salud e instituciones educativas en Uganda	51
Figura 4.9. Base de datos de centros de salud e instituciones educativas	52
Figura 5.1. Modelo trilineal de curva de capacidad (adaptada de Bal, Crowley, & Pinho, 2010).....	54
Figura 5.2. Ejemplo de curva de capacidad trilineal (tomada de The World Bank et al., 2016)	57
Figura 5.3. Curvas de capacidad media para marcos de concreto (RC)	58
Figura 5.4. Curvas de capacidad media para estructuras distintas a marcos de concreto (RC)	59
Figura 5.5. Portafolio de curvas de capacidad para una estructura a base de marcos de concreto con muros de mampostería y 3 niveles	59
Figura 5.6. Niveles de daño para construcción pesada de madera	60
Figura 5.7. Niveles de daño para marcos de concreto con muros de mampostería y 3 niveles de entrepiso	61
Figura 5.8. Curvas de capacidad y resultado de desplazamiento vs aceleración de un análisis tiempo-historia de dos estructuras de marcos de concreto con muros de mampostería sometidos al mismo registro de movimiento.....	61
Figura 5.9. Curvas de fragilidad para mampostería con piedra no reforzada (STN)	63
Figura 5.10. Modelos de daños y pérdidas: a) Italia (Di Pasquale & Goretti, 2001); b) Grecia (Kappos et al., 2006); c) Turquía (Bal et al., 2008); d) California - Estados Unidos - (FEMA-443, 2003)	65
Figura 5.11. Modelo de daños y pérdidas económicas	65
Figura 5.12. Función de vulnerabilidad para STN a partir de función de fragilidad y modelo de daños y pérdidas.....	66
Figura 5.13. Funciones de vulnerabilidad para inmuebles (valor esperado de la pérdida en términos de porcentaje del costo de reposición)	69
Figura 5.14. Funciones de vulnerabilidad para centros de salud e instituciones educativas (valor esperado de la pérdida en términos de porcentaje del costo de reposición)	70
Figura 5.15. Desviación estándar típica del daño	71
Figura 5.16. Funciones de vulnerabilidad (desviación estándar de la pérdida)	71
Figura 6.1. Modelo probabilista de riesgo y aplicaciones para la gestión del riesgo de desastre	74
Figura 6.2. Descripción general del software CAPRA	79
Figura 6.3. Localización epicentral para una serie de eventos estocásticos con $M \geq 7.0$ y efectos de sitio	82
Figura 6.4. Aceleración pico del suelo (PGA) para 3 eventos sin efectos de sitio	83
Figura 6.5. Curvas de tasa de excedencia de las pérdidas (Millones de USD) en inmuebles presentes en Etiopía, Kenia y Uganda: a) 2015; b) 2050	84
Figura 6.6. Curvas de tasa de excedencia de las pérdidas (% Costo total de reposición) en inmuebles presentes en Etiopía, Kenia y Uganda: a) 2015; b) 2050.....	85
Figura 6.7. Pérdida anual esperada (PAE) en inmuebles – Etiopía.....	87
Figura 6.8. Pérdida anual esperada (P_{AE}) en inmuebles - Kenia	88
Figura 6.9. Pérdida anual esperada (P_{AE}) en inmuebles - Uganda	91
Figura 6.10. Pérdida anual esperada (P_{AE}) en inmuebles y PGA para $T_r = 475$ años.....	92
Figura 6.11. Curvas de tasa de excedencia de las pérdidas en centros de salud presentes en Etiopía, Kenia y Uganda: a) 2015; b) 2050.....	93
Figura 6.12. Curvas de tasa de excedencia de las pérdidas (% Costo total de reposición) en centros de salud presentes en Etiopía, Kenia y Uganda: a) 2015; b) 2050	94
Figura 6.13. Pérdida anual esperada (P_{AE}) en centros de salud - Etiopía	95
Figura 6.14. Pérdida anual esperada (P_{AE}) en centros de salud - Kenia	96

Figura 6.15. Pérdida anual esperada (P_{AE}) en centros de salud – Uganda.....	99
Figura 6.16. Curvas de tasa de excedencia de las pérdidas en instituciones educativas presentes en Etiopía, Kenia y Uganda: a) 2015; b) 2050	100
Figura 6.17. Curvas de tasa de excedencia de las pérdidas (% Costo total de reposición) en instituciones educativas presentes en Etiopía, Kenia y Uganda: a) 2015; b) 2050	101
Figura 6.18. Pérdida anual esperada (P_{AE}) en instituciones educativas - Etiopía	103
Figura 6.19. Pérdida anual esperada (P_{AE}) en instituciones educativas - Kenia	104
Figura 6.20. Pérdida anual esperada (P_{AE}) en instituciones educativas - Uganda	107

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Características principales de las zonas sismogénicas	16
Tabla 2.2. Parámetros sísmicos	17
Tabla 2.3. Resumen de relaciones de atenuación	23
Tabla 2.4. Factores de amplificación (FA) por efectos de sitio	26
Tabla 3.1. Herramientas computacionales para el análisis de amenaza sísmica	30
Tabla 3.2. Periodos estructurales e intensidades de cálculo.....	32
Tabla 3.3. Periodos de retorno y probabilidades de excedencia para 50 años de exposición	32
Tabla 4.1. Producto interno bruto (PIB) para Etiopía, Kenia y Uganda.....	44
Tabla 4.2. Número de inmuebles.....	45
Tabla 4.3. Clases de inmuebles	45
Tabla 4.4. Valores promedio de vivienda y costo de reposición para inmuebles.....	47
Tabla 4.5. Esquema de pesos ponderados para la distribución de área y costo de reposición de los inmuebles	48
Tabla 4.6. Proyección al año 2050 del costo total de reposición de los inmuebles	49
Tabla 4.7. Número de centros de salud e instituciones educativas	50
Tabla 4.8. Clases de centros de salud e instituciones educativas	50
Tabla 4.9. Proyección al año 2050 del costo total de reposición de las instituciones educativas y centros de salud	52
Tabla 5.1. Periodo y distorsión de piso de fluencia	55
Tabla 5.2. Parámetros principales para la definición de curvas de capacidad.....	56
Tabla 5.3. Puntos para curva de capacidad de marcos de concreto.....	57
Tabla 5.4. Puntos para curva de capacidad de estructuras distintas a marcos de concreto	57
Tabla 5.5. Estructura de matriz de probabilidad de daño para N estados de daño y 4 niveles de demanda	62
Tabla 5.6. Parámetros estadísticos para curvas de fragilidad asociadas a estructuras con múltiples niveles: mediana (m) y desviación estándar lognormal (β).....	63
Tabla 5.7. Parámetros estadísticos para curvas de fragilidad asociadas a estructuras de un nivel: mediana (m) y desviación estándar lognormal (β)	64
Tabla 6.1. Módulos del software CAPRA	78
Tabla 6.2. Pérdidas en inmuebles a nivel nacional para los diferentes periodos de retorno - Etiopía	86
Tabla 6.3. Pérdidas en inmuebles a nivel nacional para los diferentes periodos de retorno - Kenia	86
Tabla 6.4. Pérdidas en inmuebles a nivel nacional para los diferentes periodos de retorno - Uganda ...	86
Tabla 6.5. Pérdidas en centros de salud a nivel nacional para los diferentes periodos de retorno - Etiopía	94
Tabla 6.6. Pérdidas en centros de salud a nivel nacional para los diferentes periodos de retorno - Kenia	94
Tabla 6.7. Pérdidas en centros de salud a nivel nacional para los diferentes periodos de retorno - Uganda	95
Tabla 6.8. Pérdidas en instituciones educativas a nivel nacional para los diferentes periodos de retorno - Etiopía	102
Tabla 6.9. Pérdidas en instituciones educativas a nivel nacional para los diferentes periodos de retorno - Kenia	102
Tabla 6.10. Pérdidas en instituciones educativas a nivel nacional para los diferentes periodos de retorno - Uganda	102

INTRODUCCIÓN

África es un continente propenso a una amplia variedad de amenazas y desastres naturales. Fenómenos como inundaciones, huracanes, sismos, tsunamis, sequías, incendios forestales, plagas, contaminación en el agua y en el aire causan pérdidas excesivas en la población y en la economía de estos países año tras año. La población de África, estimada en 880 millones de personas al 2005, está creciendo a una tasa anual del 2-4%, por lo que el número de personas expuestas a amenazas y desastres naturales continuará creciendo. Debido al bajo poder económico que poseen los países Africanos, el continente se convierte en el menos preparado y equipado para superar los impactos de las amenazas y desastres naturales que deben afrontar cada año (Mulugeta et al., 2007).

Los eventos hidro-meteorológicos aportan a la mayoría de los desastres en el Sub-Sahara Africano, y tienen impacto en casi todos los países del continente. Entre estos eventos se incluyen inundaciones, ciclones tropicales, marea de tormenta, sequías, temperaturas extremadamente altas (calentamiento global), incendios forestales, tormentas de arena y polvo, y avalanchas y deslizamientos. En el periodo 1975-2002, los desastres de origen hidro-meteorológicos constituyeron el 59% del total de desastres naturales ocurridos en el Sub-Sahara Africano (OFDA/CRED, 2004; UN/ISDR, 2004). Por otro lado, en el sub-Sahara Africano los desastres asociados a amenazas geológicas tienen un bajo impacto comparado con los hidro-meteorológicos. Los sismos representan un 2%, y los deslizamientos y las erupciones volcánicas un 1% de las amenazas que ocurren en el continente (OFDA/CRED, 2004). A pesar de todo, son pocas las medidas preventivas que se toman al respecto, ya que tanto los eventos hidro-meteorológicos como los geológicos son muy insignificantes si se comparan con el impacto que generan la pobreza y el HIV/AIDS (VIH).

El sub-Sahara Africano es, en su mayoría, una región estable intraplaca caracterizada por su nivel sísmico relativamente bajo, con sismos distribuidos en tiempo y espacio de manera aleatoria. Sin embargo, regiones como el Sistema de Ruptura de África del Este (East African Rift System, EARS) y la Línea Volcánica de Camerún, presentan una actividad sísmica moderada donde los sismos se asocian a zonas de fallas activas y actividad volcánica (Mulugeta et al., 2007).

Sismos devastadores con magnitudes cercanas a 7.0 han ocurrido en el continente africano dejando a su paso pérdidas humanas y materiales. En el 2005 en la República Unida de Tanzania se presentó un sismo con magnitud $M_w=6.8$; en 1990 en la República de Sudán del Sur se presentó un evento sísmico con magnitud de $M_w=7.2$, al igual que en 1977 en las inmediaciones del Mar Rojo donde se presentó un sismo de igual magnitud. Por último, en 1928, 1919 y 1910 se presentaron sismos con magnitudes (M_w) iguales a 6.98, 7.22 y 7.50 en los países de Kenia y Tanzania (los últimos dos), respectivamente, siendo el último, el registro el más alto que se tiene del continente Africano durante el último siglo (Ordaz et al., 2014; Storchak et al., 2012).

El perfil de desastres del Sub-Sahara Africano está fuertemente vinculado a la vulnerabilidad de su población y economía, y su baja capacidad de afrontarlo. La mayoría de los países africanos cuentan con limitados recursos para invertir en la reducción de desastres, así como escasos lugares para brindar apoyo luego de que un desastre sucede. Países como Etiopía, Kenia y Uganda son particularmente vulnerables a los impactos económicos que puede generar un desastre natural, lo que genera un retraso considerable en su crecimiento y buen desempeño. Un alto número de personas residen en asentamientos informales, generalmente ubicados en áreas como plantíos, cuencas de drenaje, o zonas propensas a sismos, los cuales se vuelven altamente vulnerables ante desastres. Por otro lado, la infraestructura más importante como carreteras, telecomunicaciones y presas no están construidas de acuerdo a los estándares de prevención de desastres (Dingel & Tiwari, 2010; Worku, 2014).

Con algunas excepciones, el Sub-Sahara Africano carece de la capacidad para dirigir investigación en amenazas y desastres naturales debido a sus escasos recursos; no se aplica el conocimiento que se tiene ni tampoco se desarrollan tecnologías para mitigar los desastres. Además, la proporción del PIB (Producto Interno Bruto) destinado para este campo es mínimo, si se compara con otras necesidades que demandan estos países, como lo es la lucha contra el VIH; sin embargo, esto no es una razón para olvidar que existe una amenaza sísmica que puede generar grandes pérdidas, tanto humanas como económicas. Los gobiernos africanos tienden a depender de donativos internacionales en lugar de promover la capacidad de investigación local. Por lo tanto, hay una necesidad de fomentar la investigación para no depender de agencias o donativos externos, y aumentar la interacción entre la comunidad investigativa y los agentes tomadores de decisiones (Mulugeta et al., 2007).

Por todo lo expuesto anteriormente, queda en evidencia la necesidad de poner especial atención a la zona del Sub-Sahara Africano, la cual se ha visto expuesta a grandes desastres naturales. Sin embargo, referirse al Sub-Sahara Africano no es del todo claro debido a su gran extensión y heterogeneidad. Por ello, se ha decidido que este trabajo se centrará en la evaluación de la amenaza y el riesgo sísmico presente en los países de Etiopía, Kenia y Uganda, ya que por su cercanía al Sistema de Ruptura del África del Este (EARS), presentan una evidente actividad sísmica comparada con otras zonas del continente.

ANTECEDENTES

Diversos autores y agencias internacionales han hecho el esfuerzo de adelantar estudios de amenaza y riesgo en el Sub-Sahara Africano. A continuación, se listan lo más relevantes los cuales pueden servir como referencia para el buen desarrollo del presente trabajo:

Kebede & Van Eck (1997) llevaron a cabo un análisis probabilístico de la amenaza sísmica (PSHA) presente en el Cuerno de África (Horn of Africa¹). La sismicidad local se definió a partir de estudios previos a éste y de acuerdo a la sismicidad presente en ellas. Debido a la poca información que se tenía en la zona, se utilizaron las relaciones de atenuación propuestas para la zona oeste de Estados Unidos (California). Se obtuvieron mapas de amenaza y curvas de excedencia (éstas últimas para 7 ciudades de interés) expresadas en PGA e intensidades de la escala de Mercalli Modificado para una probabilidad de excedencia anual de 0.01 (100 años de periodo de retorno). También se obtuvieron espectros de respuesta (5% de amortiguamiento) para cada una de las ciudades de interés. Finalmente, se realizó un análisis de sensibilidad para conocer las principales fuentes de incertidumbre en el cálculo de la amenaza sísmica.

Twesigomwe (1997) elaboró mapas de amenaza sísmica para Uganda basado en información instrumental. Basado en la sismicidad y la tectónica de la zona se determinaron 13 zonas sismogénicas. A diferencia de los demás estudios, las incertidumbres en los parámetros se trataron por medio del uso de un árbol lógico. Sin embargo, el común denominador en la falta de información respecto a las relaciones de atenuación, llevó al uso de expresiones semi-teóricas. Por medio del programa NPRISK se obtuvieron mapas de amenaza en términos de PGA para diferentes periodos de retorno. Adicionalmente, se calcularon las escalas de intensidad para los resultados obtenidos.

Midzi et al. (1999) presentan la evaluación de la amenaza sísmica para las zonas este y sur de África haciendo uso de un análisis probabilístico. Las zonas sismogénicas se definieron a partir de un análisis detallado de las estructuras tectónicas de la zona y su correlación con la sismicidad que se conocía en ese entonces. A pesar de la falta de información y los pocos estudios desarrollados en torno a las

¹ **Horn of Africa (Cuerno de África):** El Cuerno de África es la región del África Oriental, ubicada en donde se une el mar Rojo con el océano Índico, en la parte meridional del golfo de Adén, frente a la península arábiga. Está conformado por la totalidad de los países de Somalia, Yibuti, Eritrea y Etiopía.

relaciones de atenuación aplicables a la zona de estudio, se utilizaron propuestas locales. Los parámetros para definir la sismicidad local de cada una de las zonas sismogénicas se calcularon con la ayuda del programa SEISAN V6.0. Por medio del programa FRISK88M V1.70 se obtuvieron mapas de amenaza sísmica en términos de PGA para un 10% de probabilidad de excedencia en un periodo de tiempo de exposición de 50 y 100 años, así como para periodos de retorno iguales a 50 y 100 años.

Abdalla, Eeri, Mohamedzein, & Wahab (2001) realizaron la evaluación de la amenaza y la zonificación sísmica de Sudán y sus alrededores mediante un análisis probabilístico sin considerar efectos de sitio. Las zonas sismogénicas y los parámetros sísmicos se determinaron a partir de la opinión y juicio de expertos en el tema, caracterización tectónica de la zona y distribución espacial de la actividad sísmica. Por medio del programa EQRISK se obtuvieron los resultados de aceleración pico del suelo (PGA) con una probabilidad del 10% de ser excedida durante los periodos de exposición de 50, 100, 200 y 250 años. Los resultados mostraron que el valor de PGA varía desde 0.02 g para zonas de baja sismicidad, hasta 0.62 g de alta sismicidad (Mar Rojo). De igual se forma, se presentaron resultados de PGA para un periodo de retorno de 475 años y 10% de excedencia.

Mavonga & Durrheim (2009), por medio de un análisis probabilístico, desarrollaron mapas de amenaza sísmica para la República Democrática del Congo y sus alrededores, así como el nivel de amenaza sísmica para 14 ciudades de la región. Las zonas sismogénicas se definieron a partir de estudios previos a éste, mientras que los parámetros de la sismicidad local se calcularon por medio del programa SEISAN 8.1 BVALUE. Se utilizaron las relaciones de atenuación locales y otras propuestas para zonas similares. El análisis de amenaza se llevó a cabo con la ayuda del programa Ez-Frisk V7.24, con el cual se obtuvieron mapas en términos de PGA para una probabilidad de excedencia del 2%, 5% y 10% en un periodo de exposición de 50 años, que corresponde a un periodo de retorno de 2475, 975 y 475 años, respectivamente.

Mengistu (2013) realizó el estudio de la amenaza sísmica en el Sub-Sahara Africano. Se hizo una recopilación bibliográfica para conseguir un catálogo sísmico completo y actualizado. La sismicidad local de la zona se definió de acuerdo al procedimiento Aki-Utsu. A pesar de que no existen grandes avances en el desarrollo de relaciones de atenuación, se utilizaron algunas propuestas locales junto con otras externas. Por medio del programa OpenQuake se obtuvieron mapas de amenaza sísmica en términos de PGA para un periodo de retorno de 475 años.

OBJETIVOS

Objetivo Principal

Elaborar mapas de amenaza y riesgo sísmico para los países de Etiopía, Kenia y Uganda, ubicados en el Sub-Sahara Africano, para diversos periodos de retorno.

Objetivos Específicos

- Determinar la sismicidad local de la región a partir de un catálogo sísmico completo y actualizado, y una correcta zonificación de la misma.
- Desarrollar un análisis probabilístico de la amenaza sísmica, en términos de aceleración, para periodos de retorno de 10, 25, 50, 100, 250, 475, 500 y 1000 años.
- Proporcionar curvas de excedencia y tablas de pérdidas, a nivel nacional, para cada periodo de retorno en cada uno de los países.

- Calcular, de manera aproximada, la pérdida total anual y la pérdida promedio anual para cada uno de los países, dado que se presente un evento sísmico importante en la zona de estudio.
- Estimar el riesgo sísmico, en cada país, para el año 2050 basado en el crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB).

ALCANCES Y LIMITACIONES

Toda la información necesaria para la elaboración de este estudio fue tomada de trabajos previos realizados por otros autores o agencias internacionales, por lo tanto, no se llevará a cabo ningún trabajo de campo para recopilar nueva información de la región.

Por medio del presente estudio, se elaborarán mapas de amenaza y riesgo sísmico para los países de Etiopía, Kenia y Uganda, por lo tanto, las regiones que se encuentran fuera de éstos no son de interés para este trabajo.

Se llevará a cabo un análisis probabilístico de la amenaza sísmica, ya que por medio de éste se pueden conocer las probabilidades de excedencia de un evento sísmico y las incertidumbres que lleva consigo. Por tal motivo, no será tema del presente trabajo el análisis determinista de la amenaza sísmica.

Los resultados de un estudio de amenaza sísmica se pueden ver influenciados (amplificación o deamplificación) por los efectos de sitio presentes en la zona de estudio. En este trabajo, se hará una cuantificación de los efectos de sitio teniendo en cuenta el parámetro V_{s30}^2 , calculado a partir de la pendiente del terreno (USGS, 2013).

Las bases de datos de exposición necesarias para el análisis del riesgo se construyeron a partir de imágenes satelitales, censos poblacionales y estudios previos, por lo tanto, no hubo necesidad de realizar trabajos de campo para recolectar dicha información. Cabe aclarar que dichas bases de datos fueron elaboradas por un grupo de trabajo diferente al involucrado en el presente estudio y que sólo se hace una reseña de la metodología que emplearon para obtener las mismas.

Las funciones de vulnerabilidad se elaboraron a partir de modelos matemáticos con la ayuda de métodos analíticos e información reportada en la literatura. No hubo necesidad de llevar a cabo visitas de campo o ensayos de laboratorio. Al igual que las bases de datos de exposición, las funciones de vulnerabilidad fueron desarrolladas por un grupo externo a éste, sin embargo, se describe el proceso y las consideraciones que tuvieron en cuenta para obtenerlas.

El análisis probabilista de riesgo se efectuó para determinar las pérdidas económicas (cuantificada en dólares) en diferentes tipos de construcción, sin embargo, no fue tema del presente trabajo determinar las pérdidas humanas ni el impacto a la economía local de cada país, así como tampoco las pérdidas en los componentes no estructurales contenidos dentro de cada estructura evaluada. El valor de reposición de cada activo se determinó de acuerdo al avalúo actual del mismo, sin embargo, no consideró una depreciación a lo largo del tiempo.

² Se denomina **Vs30** al valor promedio de la velocidad de las ondas de corte en los primeros 30 m de suelo.

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

1.1. ASPECTOS GENERALES

La región del Sub-Sahara Africano hace referencia a aquellos países del continente africano que no limitan con el mar Mediterráneo; también se le conoce como la zona geográfica ubicada al sur del desierto del Sahara. Como se mencionó anteriormente, este estudio se centrará en la región cubierta por los países de Etiopía, Kenia y Uganda, los cuales se han agrupado dentro de un polígono con coordenadas 10°S-20°N y 20°-50° E, al que se le llamará zona de estudio. Dicha zona se localiza al este del continente de África, cercana al Mar Rojo y al Golfo de Adén. De los tres países, Etiopía es el único que pertenece al Cuerno de África (Horn of Africa), zona caracterizada por su actividad sísmica (Gouin, 1979; Kebede & Van Eck, 1997).

Etiopía limita al norte con Eritrea, al sur con Kenia y Somalia, al este con Yibuti y Somalia, y al oeste con Sudán. Tiene un relieve montañoso dividido en cuatro regiones:

- El norte dominado por el macizo etíope que llega a los 4,620 m de altitud en el monte Dashan
- El centro del país con la depresión del Valle del Rift, donde se encuentran los lagos Shamo, Abaya y Zwai, así como el río Awash
- La llanura de Dancalia, que en su parte más baja llega a los 116 m bajo el nivel del mar
- La región del Ogadén, en el sureste, formada por mesetas semidesérticas.

Cuenta con un clima cálido y húmedo, con temperaturas que van de los 13° C a los 30 ° C (The World Bank & Gobierno de España, 2015a).

Kenia limita al norte con Sudán, Etiopía y Somalia, al sur con Tanzania y el Océano Índico, al este con Somalia, y al oeste con Uganda y Tanzania. Se distinguen cuatro zonas geográficamente diferenciadas:

- La meseta central dominada por el Valle del Rift que la atraviesa de norte a sur, desde el Lago Turkana hasta el Lago Magadí
- La meseta occidental, donde se encuentran el Lago Victoria, el Monte Elgán y los principales Parques Nacionales de Kenia
- El cinturón litoral con 500 km de costas
- La zona semidesértica del noreste del país dominada por el desierto de Chalbi.

Las elevaciones principales, de origen volcánico, son el monte Kenia de 5,199 m de altitud, que es el segundo monte más alto de África, detrás del Kilimanjaro, y el monte Elgon de 4,321 m. La hidrografía está formada principalmente por los numerosos lagos existentes (Victoria, Turkana, Baringo, Nakuru, Hannington, etc.). Cuenta además con dos ríos importantes, el Athi y el Tana. El clima varía entre templado y tropical con temperaturas que van de los 10° C a los 30° C (The World Bank & Gobierno de España, 2015b).

Uganda limita al norte con Sudán y Kenia, al sur con Ruanda y Tanzania, al este con Kenia y al oeste con la República Democrática del Congo. Su relieve está dominado por una altiplanicie flanqueada por el Valle del Rift, con dos grandes volcanes, el Ruwenzori de 5,119 m y el monte Elgon de 4,321 m de altura. El sistema hidrográfico está dominado por los lagos Victoria, Eduardo, Jorge, Alberto y Kioga.

Los ríos principales son el Aswa y el Katonga. El clima es tropical, con una temperatura media anual de 20° C (The World Bank & Gobierno de España, 2015c).

1.2. GEOLOGÍA Y TECTÓNICA

La región del Sub-Sahara Africano es sísmicamente estable comparada con otras regiones del mundo que son consideradas sísmicamente activas. La mayor actividad tectónica de la zona se le atribuye al Sistema de Ruptura de África del Este (EARS), el cual se extiende desde la Depresión de Afar, al este de África, hasta el norte de Tanzania y Malawi, en el sur (Midzi et al., 1999; Yang & Chen, 2010). Las zonas centro y oeste de África son influenciadas por las fallas provenientes del océano Atlántico y aquellas que rodean el continente, por lo que son consideradas relativamente estables comparadas con el EARS (Skobelev et al., 2004). En la *Figura 1.1* y *Figura 1.2* se presenta la ubicación general de la zona de estudio y el alineamiento del sistema EARS, respectivamente.

El EARS separa las placas África (también conocida como Nubia) y Somalia, contiene sistemas de fallas y numerosos volcanes, de los cuales, algunos son sísmicamente activos. El sistema se trata de un caso particular ya que está conformado por varias zonas de ruptura sísmicamente activas y de tamaño significativo, tanto que se consideran de escala continental (Shudofsky, 1985; Yang & Chen, 2010).

Se cree que el EARS se creó como resultado de la extensión de la corteza de la tierra. Fallas normales en los valles de ruptura prueban que el fenómeno de “rifting” (ruptura) está presente, lo que convierte a este sistema en un límite de placa extensional con actividad sísmica asociada (McKenzie, Davies, & Molnar, 1970). Una de las zonas reportadas como sísmicamente activas, se encuentra en la unión de las placas África, Somalia y Arabia, en el extremo sur del Mar Rojo, lugar que se le conoce como la Depresión de Afar.

El sistema EARS se divide en dos ramas principales, este y oeste. La rama este empieza desde la Depresión de Afar, en el este de África, pasa por las zonas altas de Etiopía y el Gregory Rift (Kenia), terminando en el Lago Narton ubicado al norte de Tanzania. Por otro lado, la rama oeste comienza en el sur de Sudán y pasa a través de los lagos del Great Rift Valley, hasta el norte de Mozambique (ver *Figura 1.2*).

La tectónica del EARS presenta movimiento divergente, incluyendo deformación extensional localizada en la litósfera continental. Esto se traduce en deformaciones alongadas y estrechas dentro de la corteza fracturada. En estas angostas zonas de la litósfera, se observan intrusiones profundas de la litósfera oceánica (astenosfera) hacia el manto superior, expresadas en la superficie como elevaciones del terreno y registros geofísicos de la zona. Por las condiciones que se presenta la tectónica, el sistema de ruptura EARS se puede interpretar como el comienzo de un nuevo océano entre las placas continentales África y Somalia (Chorowicz, 2005). En la *Figura 1.3* se puede observar el movimiento relativo entre las placas África y Somalia, así como los mecanismos normales al norte y centro del continente, y de rumbo al sur del mismo.

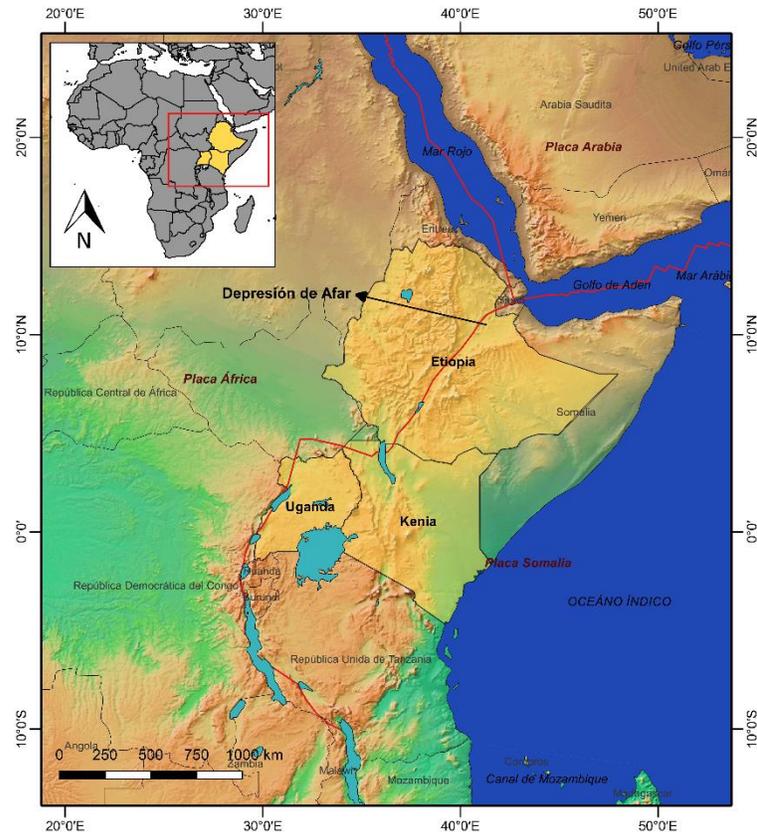


Figura 1.1. Zona de estudio

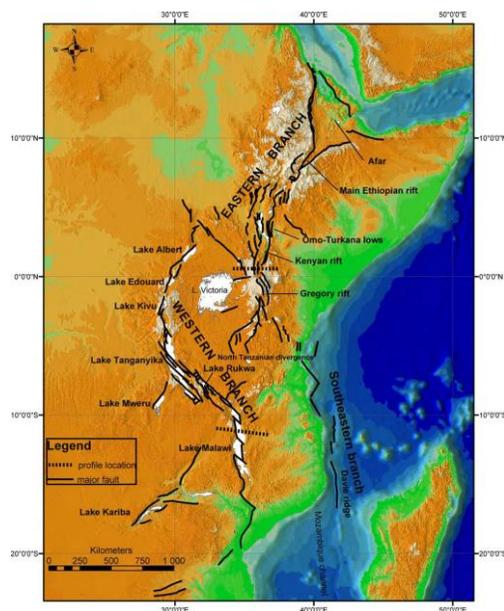


Figura 1.2. Sistema de Ruptura de África del Este (East African Rift System, EARS) (Chorowicz, 2005)

CAPÍTULO 2

CARACTERIZACIÓN SÍSMICA

2.1. CATÁLOGO SÍSMICO

El catálogo sísmico es uno de los aspectos más importantes a la hora de evaluar la amenaza sísmica en un lugar determinado. De éste depende que la sismicidad local de la zona quede bien definida y se puedan obtener buenos resultados en la evaluación de la amenaza. Procesamiento de datos históricos, localización y relocalización de los epicentros, homogenización de las magnitudes y umbrales de completéz, son características que debe tener un buen catálogo sísmico para ser utilizado en un modelo de amenaza sísmica.

Para este caso, se utilizaron dos fuentes de información que, de manera conjunta, dieron como resultado un catálogo sísmico completo y actualizado, el cual cubre un periodo de tiempo entre 1900-2011. Es importante resaltar que los valores de magnitud asociados a cada registro se reportan en términos de M_w .

2.1.1. ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009)

En el año 2010, la fundación Global Earthquake Model (GEM) propuso elaborar un catálogo sísmico global desde 1900 hasta la fecha para la caracterización de la distribución sísmica espacial, la relación frecuencial de eventos y la magnitud máxima que se pudiese presentar en cierto lugar de estudio. Para ello, junto con el International Seismological Centre (ISC), el GEM reunió un grupo de expertos para llevar a cabo el proyecto, los cuales, a su vez, recibieron asesoría de la Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI).

En el periodo previo a 1964, año a partir del cual los registros sísmicos estuvieron disponibles en formato digital, se realizó el mayor trabajo ya que se tuvo que revisar, interpretar y digitalizar todos los reportes y bases de datos disponibles, los cuales no siempre se presentaban en el mismo formato. Éstos constaban de anotaciones de campo, boletines o reportes emitidos por diversos autores u organizaciones. Adicionalmente, se llevó a cabo un proceso de relocalización por medio del cual se corrigieron errores en el cálculo de las coordenadas con la ayuda de otros registros. Por último, se realizó la homogenización de magnitudes en el que cada registro sísmico se expresó en términos de M_w .

Finalmente, se obtuvo un catálogo completo y actualizado de 18,781 registros a nivel global, para un periodo de tiempo entre 1900-2011, con tres periodos de completéz (ver *Figura 2.1*):

- 1900-1917: $M_w \geq 7.50$
- 1918-1959: $M_w \geq 6.25$
- 1960-20011: $M_w \geq 5.50$

La primera versión del catálogo sísmico del ISC-GEM se realizó para un periodo de tiempo comprendido entre 1900-2009. Sin embargo, se han elaborado nuevas versiones donde se han incluido nuevos registros sísmicos; el último reporte comprende el periodo de tiempo entre 1900 y 2011.

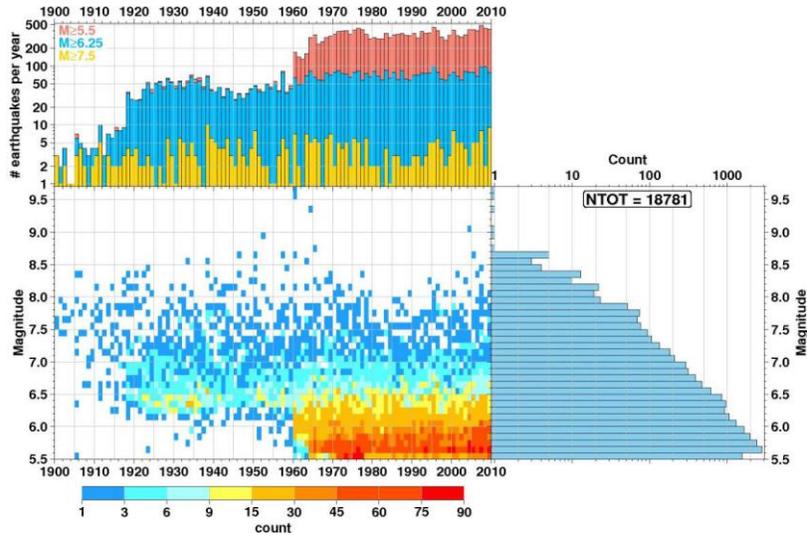


Figura 2.1. Periodos de completéz para el catálogo sísmico ISC-GEM (Storchak et al., 2012)

2.1.2. Evaluación Global sobre la Reducción del Riesgo de Desastres (GAR15)

El Informe de Evaluación Global sobre la Reducción del Riesgo de Desastres 2015 (GAR15) contempla diversas fuentes de amenazas que pueden llegar a ocasionar desastres, entre ellas se encuentran los terremotos. Bajo este marco, se realizó un análisis probabilístico de la amenaza sísmica a nivel global, donde se obtuvieron curvas y mapas de aceleración del suelo para diversos periodos de retorno (Ordaz et al., 2014).

Para el análisis, se utilizó el catálogo sísmico de la NEIC-USGS y se complementó con otras fuentes de información reportadas por la misma agencia. Se definió un umbral de magnitud (M_0) igual a 4.5 y mediante un análisis de completéz, siguiendo la metodología propuesta por Tinti & Mulargia (1985), se determinó que el catálogo se podía considerar completo a partir del año 1973 (ver *Figura 2.2*). Finalmente, se obtuvo un catálogo sísmico de 151,520 registros a nivel global, comprendidos desde 1973 hasta 2012.

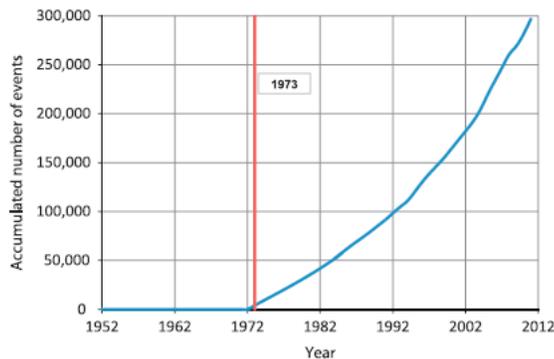


Figura 2.2. Análisis de completéz para el catálogo sísmico GAR15 (Ordaz et al., 2014)

2.1.3. Consolidación de los Catálogos Sísmicos ISC-GEM y GAR15

A partir de los catálogos sísmicos mencionados en las secciones 2.1.1 y 2.1.2, se elaboró un catálogo sísmico para la zona del Sub-Sahara Africano. Se seleccionaron los registros de los catálogos ISC-GEM y GAR15 localizados dentro de la zona de estudio, y se obtuvo un total de 111 y 955 datos, respectivamente. Sin embargo, hay un periodo de tiempo en el cual se traslapan ambos catálogos (1973-2011). Dada la amplitud del catálogo GAR15, se optó por conservar éste y descartar los registros correspondientes al catálogo ISC-GEM para ese periodo de tiempo. Es decir, del año 1900 a 1972 se utilizaron los registros del catálogo ISC-GEM, mientras que de 1973 a 2011 los registros del GAR15 (ver *Figura 2.3*). En resumen, el catálogo sísmico consolidado consta de 999 registros, comprende un periodo de tiempo desde 1900 hasta 2011 y presenta magnitudes (M_w) desde 4.50 hasta 7.50 (ver *Figura 2.4* y *Figura 2.5*).

Adicionalmente, fue posible identificar tres (3) subcatálogos o periodos de completéz, cada uno con su respectiva magnitud umbral (M_0):

- Subcatálogo 1: 1900-1917 ($M_0=7.50$)
- Subcatálogo 2: 1918-1972 ($M_0=6.25$)
- Subcatálogo 3: 1973-2011 ($M_0=4.60$)

En la *Figura 2.3* se presentan los periodos de completéz de cada subcatálogo.

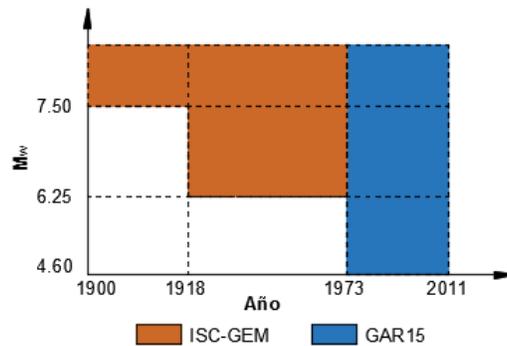


Figura 2.3. Periodos de completéz para el catálogo sísmico

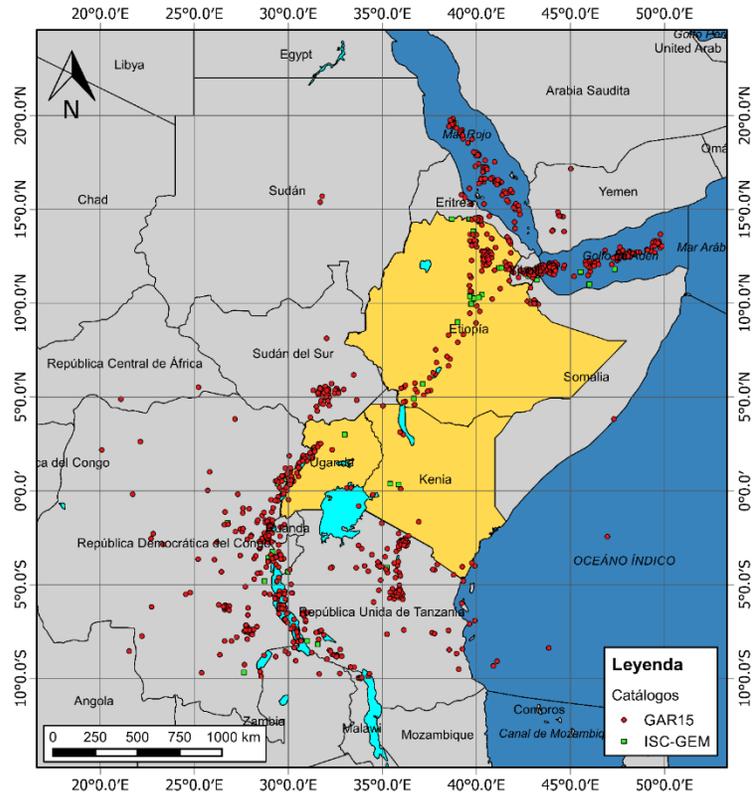


Figura 2.4. Localización epicentral de los registros sísmicos

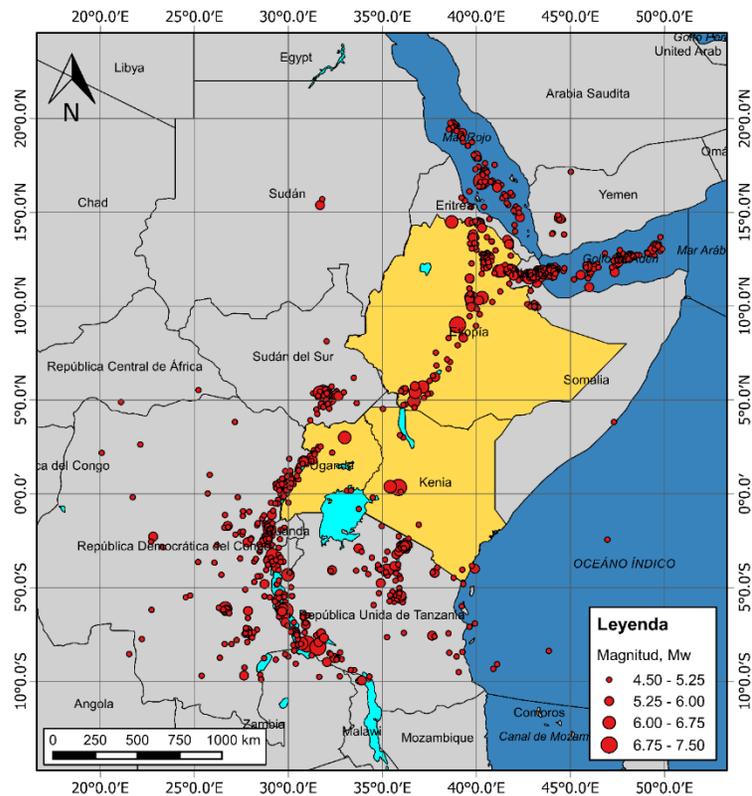


Figura 2.5. Distribución de magnitudes de los registros sísmicos

Por otro lado, se elaboraron los histogramas correspondientes a la magnitud y profundidad, los cuales se presentan en la *Figura 2.6*. Se puede observar que la mayoría de los registros se encuentran localizados a una profundidad de 11 km; los registros cuya profundidad es igual a 33 km significan que no fue posible determinar su profundidad focal. El hecho de que todos los registros estén concentrados alrededor de un mismo valor de profundidad evidencia la falta de información en la zona de estudio y la baja resolución para determinar las profundidades focales de los eventos sísmicos. Sin embargo, más adelante se verá que la profundidad focal no es relevante en la elaboración del modelo de amenaza sísmica.

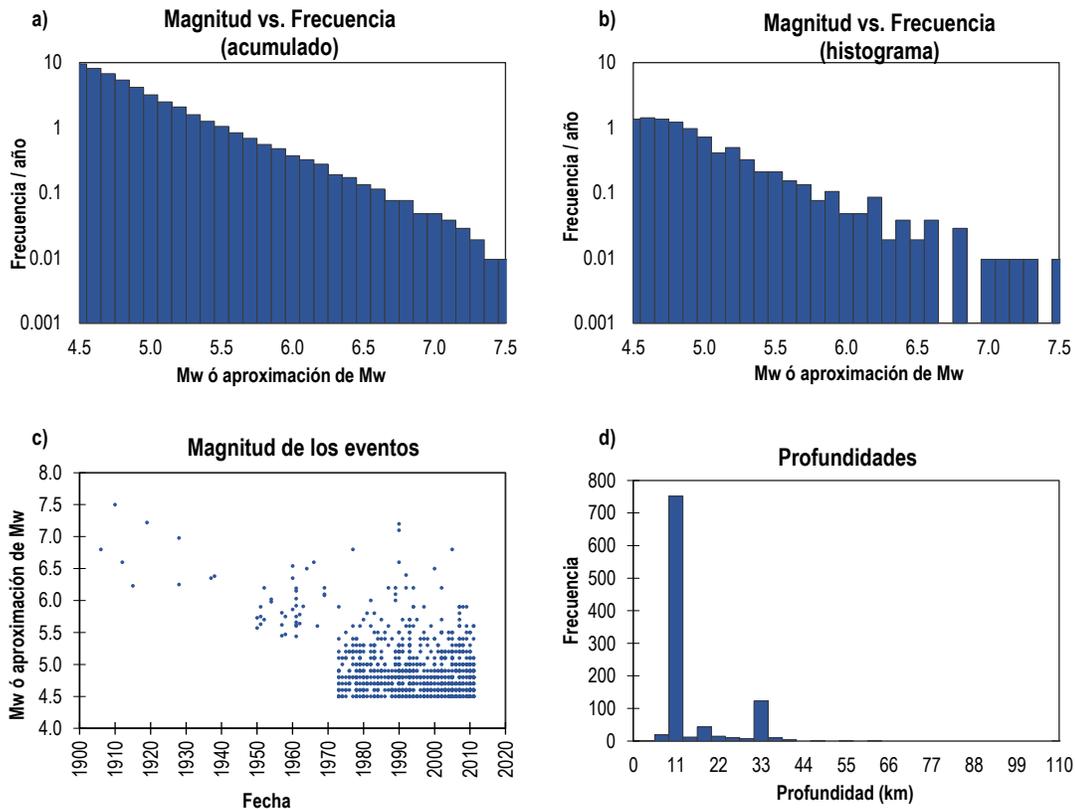


Figura 2.6. Histogramas de magnitud y profundidad del catálogo sísmico

2.2. ZONAS SISMOGÉNICAS

La caracterización de las zonas sismogénicas, o también llamadas sismo-fuentes, tiene en cuenta su geometría, la distribución de los sismos dentro de sí misma, la distribución de las magnitudes de los sismos y su ocurrencia con respecto al tiempo. Cuando la sismo-fuente es capaz de generar solamente sismos de baja magnitud se puede aproximar a un punto, mientras que los planos de falla, en los cuales los sismos pueden ocurrir en diferentes lugares, se pueden aproximar a planos bidimensionales o tridimensionales (Cornell, 1968).

Usualmente, se asume que los sismos dentro de una zona sismogénica se encuentran uniformemente distribuidos, esto significa que existe la misma probabilidad de que ocurra un sismo en cualquier lugar de la sismo-fuente. Sin embargo, una distribución uniforme dentro de la zona sismogénica no significa que la distancia de la fuente al sitio de estudio obedezca a la misma distribución. La incertidumbre de dicha distancia se puede describir por medio de una función de densidad de probabilidad $f_R(r)$, que depende de la geometría de la sismo-fuente, la localización del sitio de estudio y eventualmente, la

magnitud del evento considerado. En la *Figura 2.7* se presenta la función $f_R(r)$ para cada tipo de fuente, punto, línea y área.

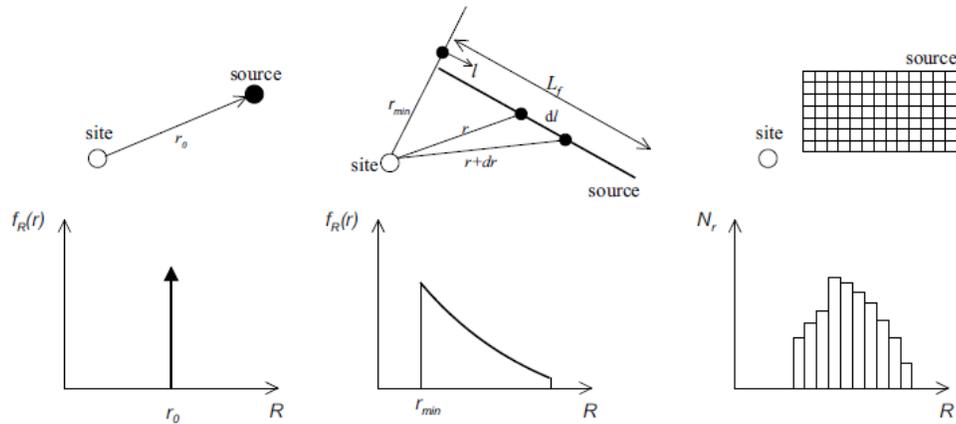


Figura 2.7. Variaciones de la distancia entre fuente y sitio de estudio para diferentes tipos de sismo-fuentes (Kramer, 1996)

De acuerdo con McGuire (2004), los límites de las sismo-fuentes se pueden determinar basados en criterios como:

- Sismicidad de la zona de estudio a escala macro y micro
- Geología regional
- Régimen tectónico
- Deformación y estado de esfuerzos de la corteza terrestre
- Sistemas de fallas expuestas
- Mecanismos focales
- Fotos aéreas e imágenes satelitales
- Estudios previos y opinión de expertos

Con el propósito de caracterizar la zona de estudio, en la *Figura 2.8* y *Figura 2.9* se muestran la distribución de profundidades y los mecanismos focales de los sismos, respectivamente. Se puede observar que un gran número de eventos se presentan a una profundidad menor a 25 km, coincidiendo con lo que se presenta en el histograma de profundidad (ver *Figura 2.6*). También se puede apreciar que la mayor sismicidad de la zona se concentra a lo largo de los contactos entre placas, dando indicios de que el movimiento interplaca es el mayor generador de sismos en la zona. Por otro lado, los mecanismos focales demuestran que la mayoría de los sismos son del tipo normal, comportamiento esperado en una zona de régimen extensional tal como el sistema EARS.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se definieron 12 zonas sismogénicas dentro de las cuales se clasificaron los registros sísmicos de la zona. Se definió una sismicidad de fondo (Zona z) en la cual se agruparon todos los registros que no fue posible clasificar dentro de las demás zonas. Dicha zona no tiene régimen tectónico asociado debido a su heterogeneidad; mientras que a las demás zonas se les asignó un régimen extensional. En la *Figura 2.10* se presenta el mapa con la distribución de las zonas sismogénicas junto con los registros sísmicos del catálogo.

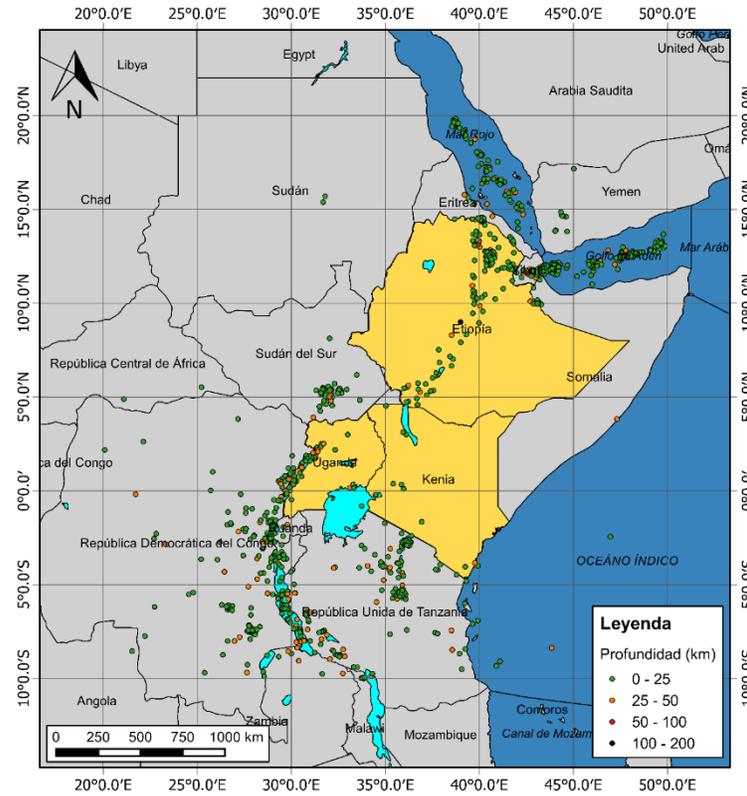


Figura 2.8. Distribución de profundidades dentro del catálogo sísmico

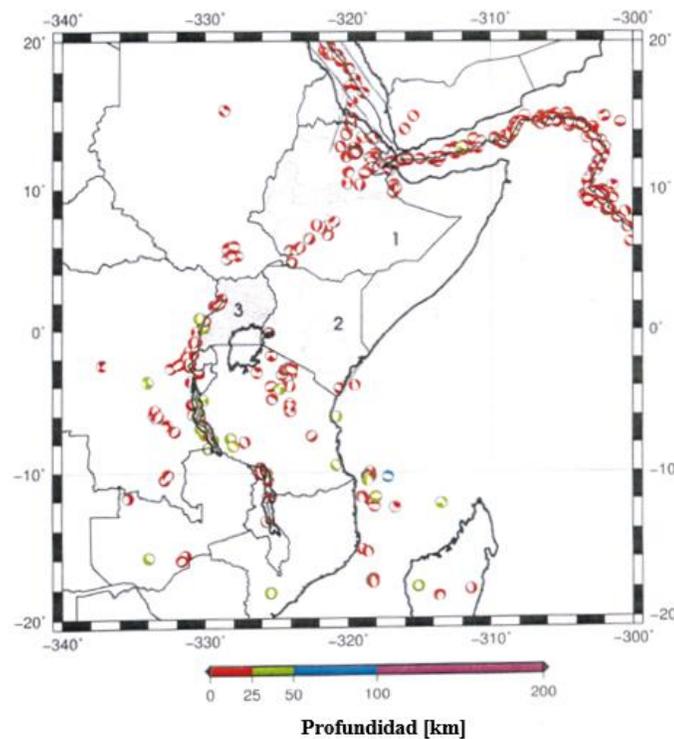


Figura 2.9. Mecanismos focales de los eventos sísmicos
 (Etiopía, Kenia y Uganda están representados por los números 1, 2 y 3, respectivamente)
 (Dziewonski, Chou, & Woodhouse, 1981; Ekström, Nettles, & Dziewonski, 2012)

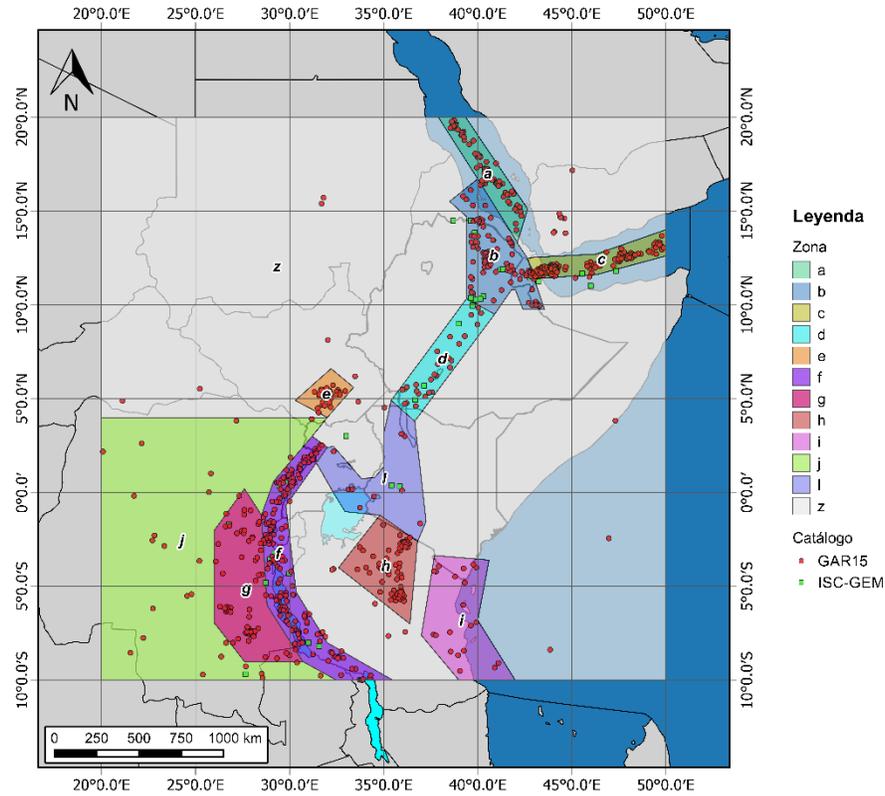


Figura 2.10. Zonas sismogénicas

En la *Tabla 2.1* se presenta un resumen de las zonas sismogénicas con algunas características de magnitud y profundidad.

Tabla 2.1. Características principales de las zonas sismogénicas

Zona	No de registros	M_{min} [M _w]	M_{max} [M _w]	Prof. Min [km]	Prof. Max [km]
a	101	4.50	6.80	9	34
b	165	4.50	6.38	1	62
c	186	4.50	6.19	4	33
d	31	4.50	6.80	10	110
e	48	4.50	7.20	10	33
f	219	4.50	7.50	4	36
g	66	4.50	6.40	10	35
h	86	4.50	6.50	5	34
i	20	4.50	5.60	6	33
j	28	4.50	5.80	7	45
l	11	4.50	6.98	10	33
z	38	4.50	6.60	5	38
Total	999				

2.3. PARÁMETROS SÍSMICOS

Por sismicidad local se entiende el grado de actividad sísmica en un volumen de la corteza terrestre, y su cuantificación está dada por la magnitud máxima que puede alcanzar un temblor, el número de temblores que ocurran en un intervalo de tiempo, la energía liberada u otra medida similar (Arboleda & Ordaz, 1993).

Una medida para cuantificar la sismicidad local es la tasa de excedencia de magnitudes $\lambda(m)$, la cual se define como el número medio de temblores de magnitud mayor o igual a un valor m que ocurren en una zona sismogénica por unidad de tiempo y por unidad de volumen. De acuerdo con Cornell & Vanmarcke (1969), la tasa de excedencia de magnitudes está definida como:

$$\lambda(m) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta m} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}} \quad M_0 \leq m \leq M_u \quad (2.1)$$

Donde,

- λ_0 es la tasa de excedencia para la magnitud umbral M_0 ,
- β es la pendiente de la parte recta, dentro de la curva de tasa de excedencia,
- m es la magnitud a evaluar,
- M_0 es la magnitud umbral, y
- M_u es la magnitud máxima.

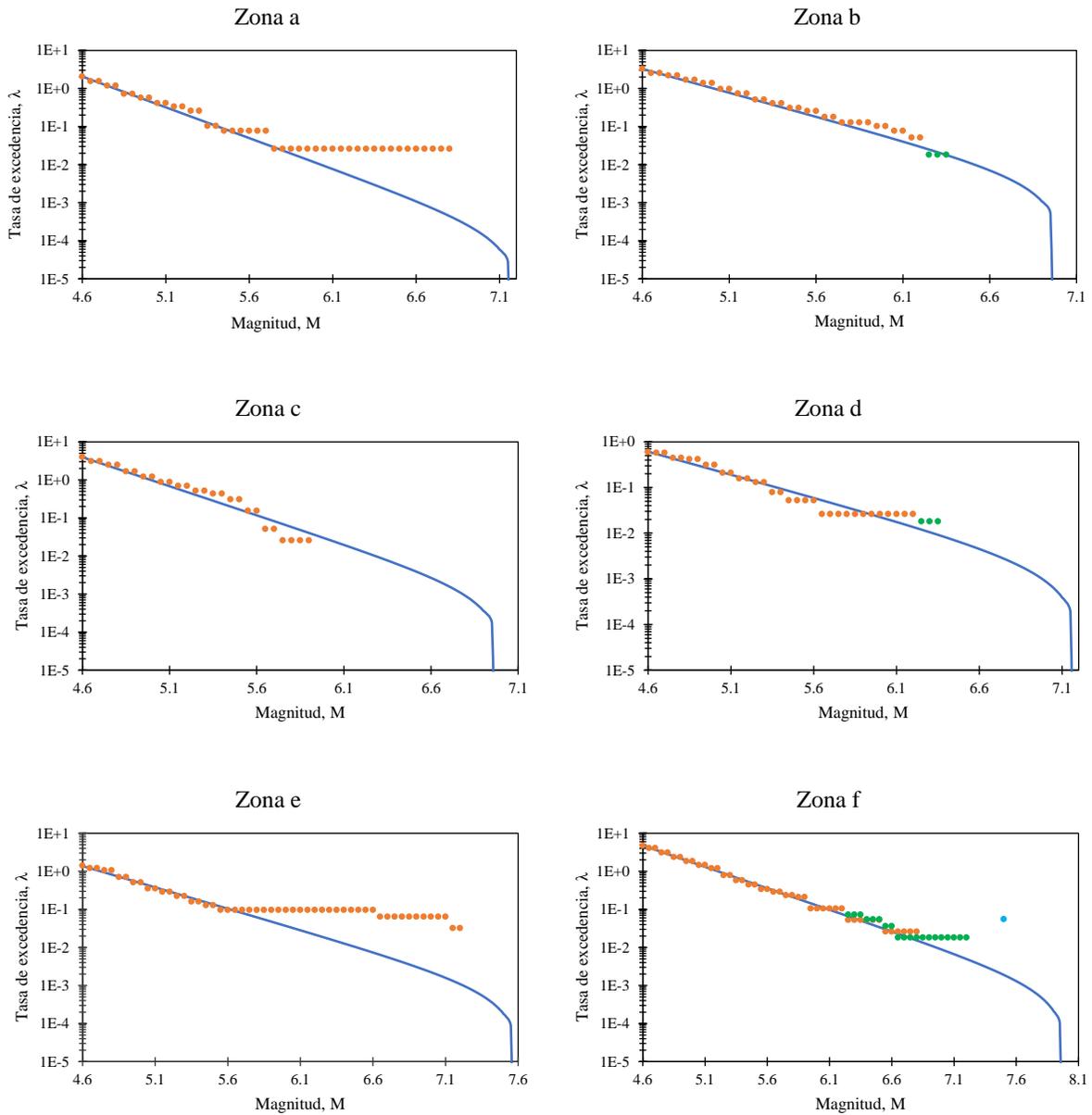
Existen diversas metodologías y softwares para determinar los parámetros que involucra la relación de recurrencia (Eq. (2.1)). Para este caso, se desarrolló un procedimiento a partir de la propuesta de Arboleda & Ordaz (1993) en el que se busca maximizar la función de verosimilitud conjunta de los parámetros sísmicos β y λ_0 (ver Anexo 1). La magnitud umbral (M_0), o magnitud de completéz (M_C), se definió a partir del nivel de completéz del catálogo sísmico consolidado (ver sección 2.1.3), $M_w=4.60$. Por otro lado, la magnitud máxima (M_u) se calculó, para cada zona sismogénica, como el máximo valor observado más 0.40, ó 7.00, el mayor de los dos. Para la Zona f se definió un valor de $M_u=8.00$ ya que es donde se presenta la mayor actividad sísmica. Los resultados obtenidos se presentan en la *Tabla 2.2*:

Tabla 2.2. Parámetros sísmicos

Zona	M_0	M_{MAX}	M_u	β	CV β	λ
a	4.60	6.80	7.20	3.72	11.18%	2.06
b	4.60	6.38	7.00	2.88	8.84%	3.26
c	4.60	6.19	7.00	3.51	8.06%	3.94
d	4.60	6.80	7.20	2.31	20.85%	0.61
e	4.60	7.20	7.60	2.58	15.08%	1.37
f	4.60	7.50	8.00	2.59	7.43%	4.76
g	4.60	6.40	7.00	2.95	13.48%	1.51
h	4.60	6.50	7.00	2.91	11.70%	1.89
i	4.65	5.60	7.00	2.81	23.57%	0.46
j	4.60	5.80	7.00	4.80	21.32%	0.58
l	4.60	6.98	7.38	2.17	37.80%	0.23
z	4.60	6.60	7.00	2.96	18.90%	0.75

Cabe resaltar que para la Zona i se utilizó un nivel de completéz (M_C) igual 4.65, en lugar de 4.60, con el objeto de obtener un mejor ajuste en la curva de tasa de excedencia.

En la *Figura 2.11* se presenta, para cada zona sismogénica, la curva de tasas de excedencia utilizando la Eq. (2.1) y los parámetros sísmicos contenidos en la *Tabla 2.2*.



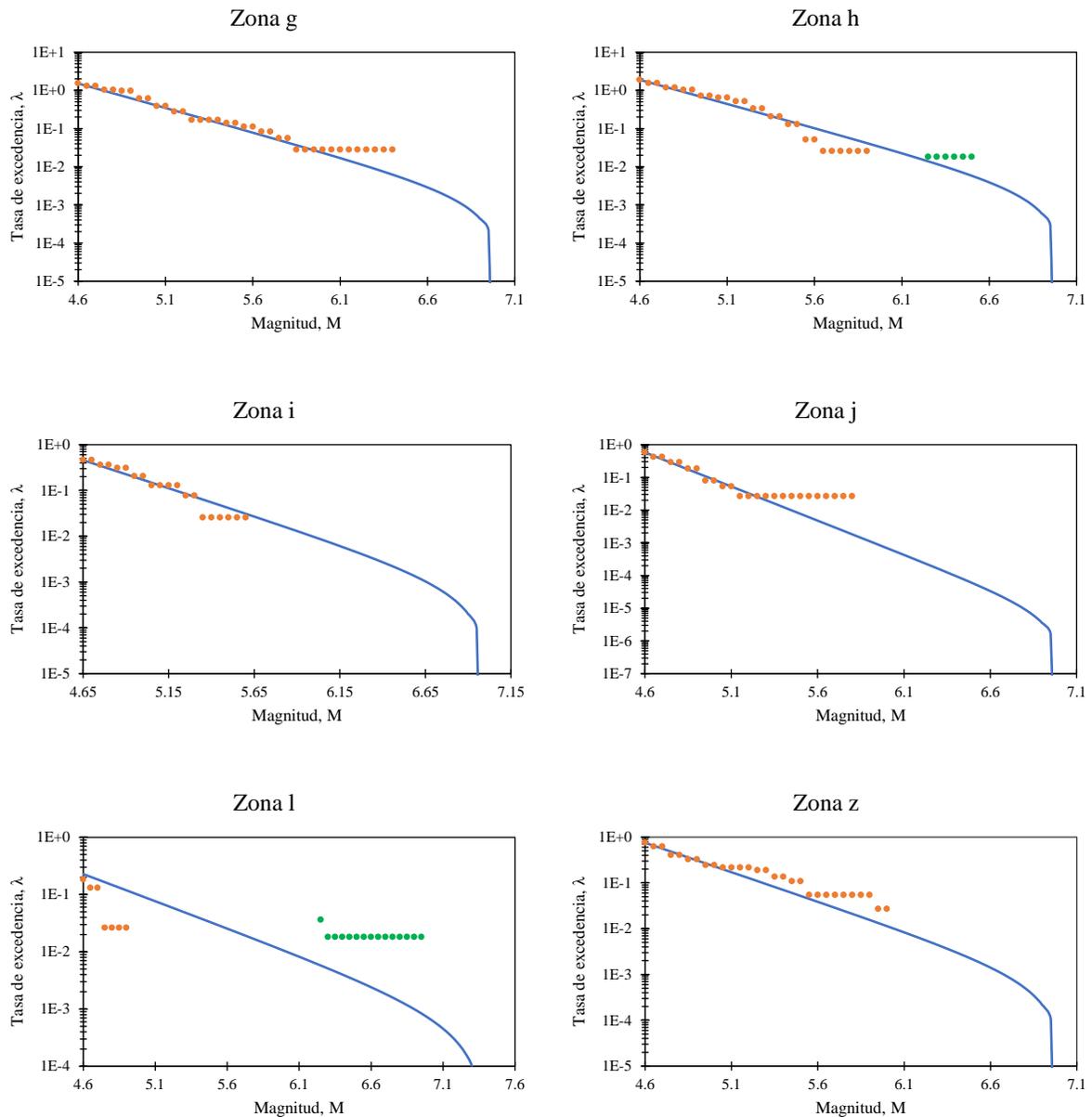


Figura 2.11. Curvas de tasas de excedencia e histogramas acumulados
(Punto naranja: Subcatálogo 1; punto verde: Subcatálogo 2; punto azul: Subcatálogo 3)

Todas las curvas, excepto la Zona l, presentan un buen ajuste con respecto a los registros del catálogo sísmico. Cabe resaltar que dentro de la Zona l solo se localizan 11 registros (ver *Tabla 2.1*), lo cual es muy bajo para determinar una buena sismicidad local. Lo anterior se ve reflejado en el coeficiente de variación de β , cerca del 38% (ver *Tabla 2.2*), el más alto de todas las fuentes.

2.4. RELACIONES DE ATENUACIÓN

Las relaciones de atenuación (GMPE por sus siglas en inglés) son expresiones por medio de las cuales se relacionan magnitud, posición relativa fuente-sitio e intensidad. Dada la ocurrencia de un evento

sísmico en un lugar determinado, se puede conocer la intensidad (aceleración, desplazamiento, velocidad, entre otras) en otro lugar ubicado a una distancia R del lugar donde se originó el temblor.

El cálculo de la intensidad sísmica no puede considerarse determinista puesto que hay cierta incertidumbre de por medio. Por esta razón, se supone que la intensidad sísmica es una variable aleatoria de distribución lognormal.

Debido a que no se han desarrollado relaciones de atenuación para la zona de interés, se debe recurrir al uso de otras relaciones que hayan sido derivadas a partir de regímenes tectónicos similares. A continuación, se presentan algunas propuestas aplicables a la región del Sub-Sahara Africano.

2.4.1. Zonas Tectónicamente Activas

Como se mencionó anteriormente, la zona del Sub-Sahara Africano presenta un régimen tectónico extensional. Por tal motivo, es válido utilizar la relación de atenuación propuesta por Spudich et al. (1999) (también conocida como SEA99), la cual se derivó a partir de registros sísmicos de la zona oeste de los Estados Unidos. Esta GMPE usa la distancia Joyner and Boore (R_{JB}), definida como la menor distancia a la proyección del área de ruptura sobre la superficie terrestre. Por otro lado, es aplicable para magnitudes entre 5.0 y 7.7, un rango de distancia de 0-100 km y periodos estructurales comprendidos entre 0 (PGA) y 2.0 s. De acuerdo con lo anterior, esta GMPE no depende de la profundidad de los registros sísmicos, ya que sin importar la fuente que los contenga, ésta será proyectada en la superficie y la influencia de la profundidad será nula.

De la *Figura 2.12* a *Figura 2.14* se presentan algunas de las características de esta GMPE.

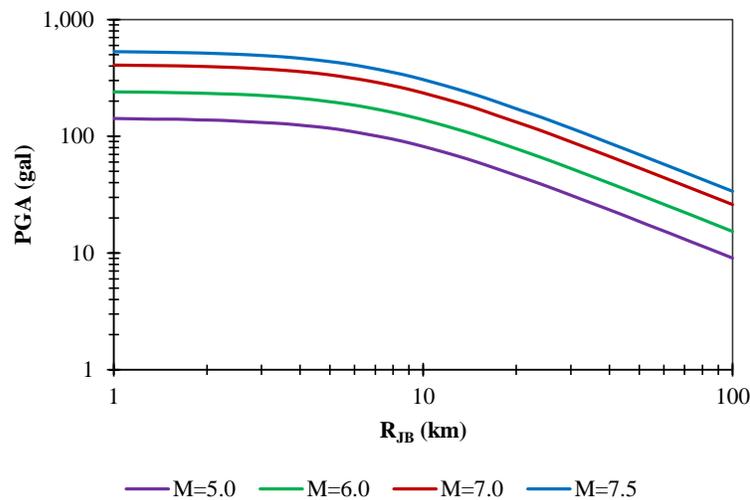


Figura 2.12. Atenuación de la aceleración pico del suelo (PGA) con respecto a la distancia, para algunos valores de magnitud, de acuerdo con la GMPE de Spudich et al. (1999) en roca

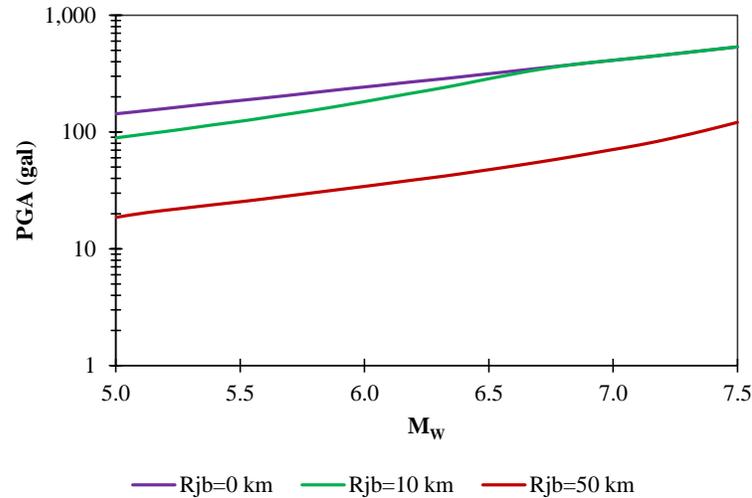


Figura 2.13. Escalamiento de la aceleración pico del suelo (PGA) con respecto a la magnitud, para algunos valores de distancia, de acuerdo con la GMPE de Spudich et al. (1999) en roca

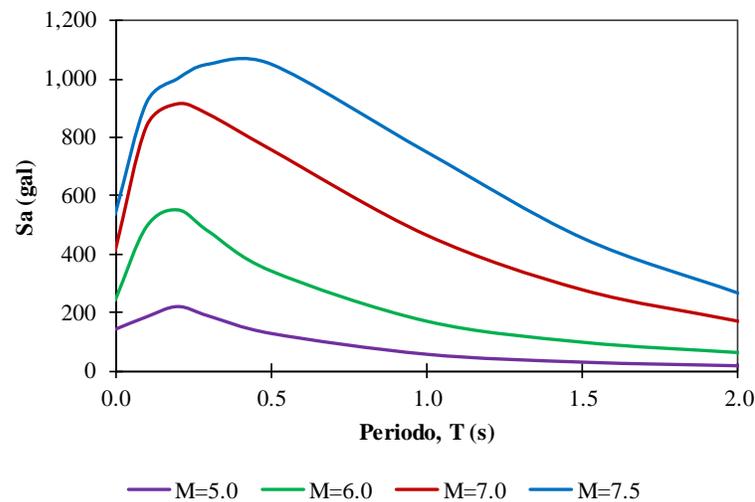


Figura 2.14. Espectro de respuesta de pseudo-aceleración (5% de amortiguamiento, S_a) para $R_{JB}=0$ km, algunos valores de magnitud y periodo estructural, de acuerdo con la GMPE de Spudich et al. (1999) en roca

2.4.2. Zonas Tectónicamente Estables

Como se puede observar en la *Figura 2.4*, hay zonas con un gran número de registros dentro (e.g. Zona f), lo cual significa un alto nivel de sismicidad. Por otro lado, hay zonas que presentan un nivel sísmico más bajo, y por consiguiente un régimen tectónico diferente. Por esta razón, es importante tener en cuenta otros tipos de relación de atenuación que describa de mejor manera un régimen tectónico de baja actividad. Este es el caso de la GMPE propuesta por Pezeshk, Zandieh, & Tavakoli (2011) la cual fue desarrollada para la región este de los Estados Unidos. Es aplicable para valores de magnitud comprendidos entre 5 y 8; un rango de distancia de 0-1000 km y periodos estructurales desde 0 s (PGA) hasta 10 s. A diferencia de SEA99, esta GMPE utiliza la distancia R_{RUP} , la cual se define como la distancia más corta al área de ruptura, por lo tanto, la profundidad de las zonas sismogénicas si condicionará el valor de la distancia entre la fuente y el sitio de estudio.

De la *Figura 2.15* a *Figura 2.17* se caracteriza la GMPE asociada a las zonas tectónicamente estables.

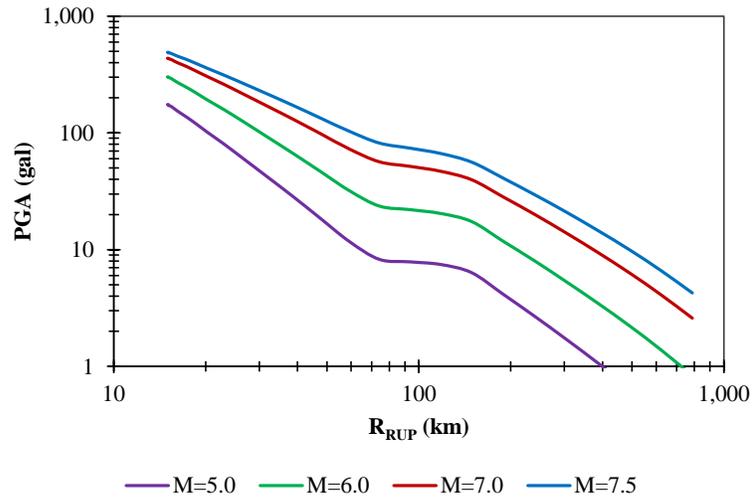


Figura 2.15. Atenuación de la aceleración pico del suelo (PGA) con respecto a la distancia, para algunos valores de magnitud, de acuerdo con la GMPE de Pezeshk et al. (2011) en roca

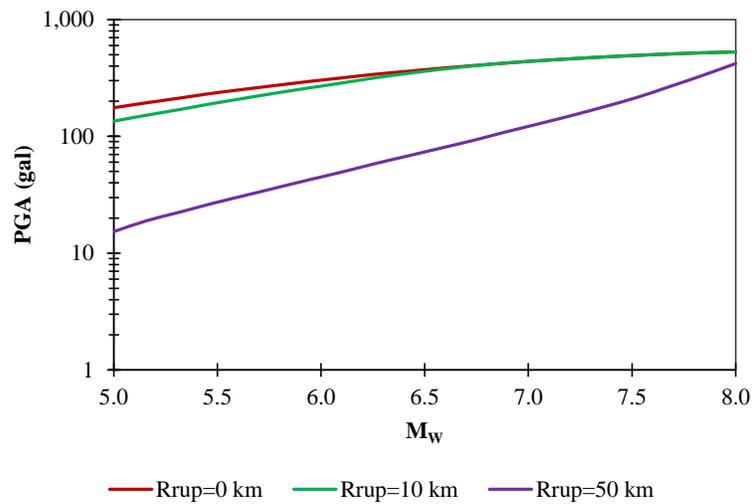


Figura 2.16. Escalamiento de la aceleración pico del suelo (PGA) con respecto a la magnitud, para algunos valores de distancia, de acuerdo con la GMPE de Pezeshk et al. (2011) en roca

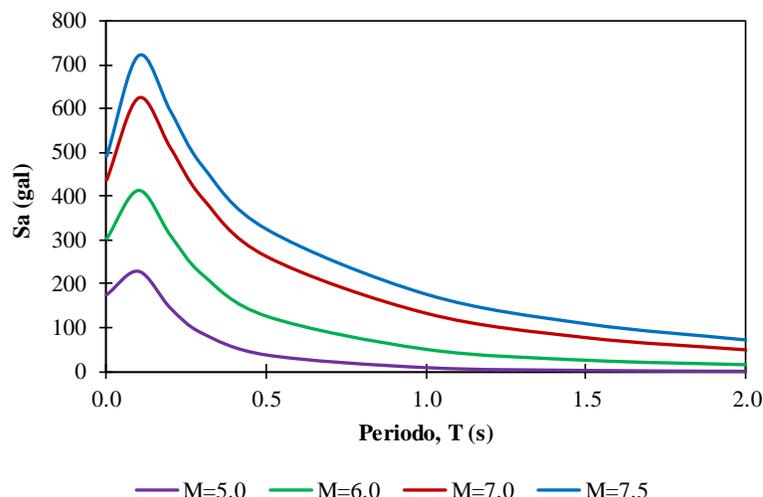


Figura 2.17. Espectro de respuesta de pseudo-aceleración (5% de amortiguamiento, S_a) para $R_{RUP}=0$ km, algunos valores de magnitud y periodo estructural, de acuerdo con la GMPE de Pezeshk et al. (2011) en roca

Finalmente, se decidió por utilizar dos relaciones de atenuación, Spudich et al. (1999) para las zonas tectónicamente activas, y Pezeshk et al. (2011) para las estables. En la *Tabla 2.3* se presenta qué GMPE se le asignó a cada zona sismogénica.

Tabla 2.3. Resumen de relaciones de atenuación

Zona	GMPE
a	Spudich et al. (1999)
b	Spudich et al. (1999)
c	Spudich et al. (1999)
d	Spudich et al. (1999)
e	Spudich et al. (1999)
f	Spudich et al. (1999)
g	Pezeshk et al. (2011)
h	Spudich et al. (1999)
i	Spudich et al. (1999)
j	Pezeshk et al. (2011)
l	Spudich et al. (1999)
z	Pezeshk et al. (2011)

2.5. EFECTOS DE SITIO

Las condiciones locales del terreno afectan las características del movimiento sísmico. Generalmente, los estudios de amenaza sísmica presentan sus resultados a nivel de roca, es decir, sin considerar los efectos del suelo presentes en la zona. Sin embargo, es de gran importancia conocer la intensidad sísmica en cualquier tipo de suelo. Esto se logra a partir del movimiento en roca, considerado como de referencia, multiplicado por un factor que considera los efectos de sitio. Este factor se puede obtener mediante modelos matemáticos o valores empíricos, pero sin importar que método se emplee, lo que se obtiene son funciones de transferencia espectrales, las cuales permiten conocer el valor de amplificación por el cual se deben modificar las aceleraciones espectrales calculadas en roca. Estas funciones de transferencia

deben construirse para diferentes valores de aceleración máxima del terreno con el fin de tener en cuenta el efecto no lineal de degradación de los suelos.

2.5.1. Generalidades

Los efectos de sitio son las alteraciones que sufren las ondas sísmicas debido a cambios en la geología local, es decir, en la geometría y composición de la superficie, incluyendo la presencia de depósitos superficiales compuestos por arcillas o arenas. Las modificaciones debido a estos factores se ven reflejadas en la duración, amplitud y contenido de frecuencia de los movimientos. La correcta cuantificación de los efectos de sitio es indispensable para la elaboración de atlas de riesgos, estimación de pérdidas y diseño de construcciones.

Existen efectos de sitio que solamente modifican las características del movimiento sísmico, como los ocasionados por la presencia de distintas topografías en una superficie plana (montañas, cañones, entre otros), o por la presencia de valles con arcillas y altos contenidos de agua, como es el caso de la ciudad de México. Pero existen otros efectos de sitio, donde hay presencia de depósitos de arena o pendientes inestables, que ocasionan la falla del suelo con asentamientos o desplazamientos súbitos y permanentes.

- **Topografía del terreno:** La superficie irregular del terreno puede provocar amplificación o deamplificación del movimiento. Esto se presenta en cañones, montañas, pendientes, cimas y simas. Los detalles de los efectos de sitio dependerán de la topografía, del tipo de onda sísmica y de su ángulo de incidencia. Existen muy pocas mediciones instrumentales de estos efectos y solo por medio de modelos matemáticos se pueden estimar.
- **Presencia de depósitos de arcillas:** En valles aluviales o lacustres, se presenta amplificación dinámica debido al contraste de la velocidad de propagación de las ondas sobre la superficie con respecto a los depósitos más profundos. Entre mayor sea el contraste, mayor será la amplificación. Dependen también de la geometría tridimensional del valle aluvial. Debido a las características dinámicas de esta amplificación, la mejor manera de caracterizarla es mediante cocientes de espectros de respuesta, es decir, cuantas veces se amplifica, con respecto a terreno firme, la aceleración para un amortiguamiento y un periodo estructural.
- **Presencia de estratos y depósitos de arenas:** En estos depósitos se puede presentar el fenómeno de licuación en el cual el suelo pierde su capacidad de carga debido al aumento de la presión de poro. Es más factible su ocurrencia en arenas sueltas que en compactas, y mucho más en arenas con granulometría uniforme. Si ocurre a profundidad causa flujo vertical de agua que se manifiesta en pequeños volcanes.
- **Deslizamientos y deslaves:** Provocados por las fuerzas sísmicas que encuentran perfiles inestables. Son los responsables de gran parte de los daños en vías de comunicación como carreteras.
- **Cambios en estructura superficial:** Se generan debido a la heterogeneidad en los materiales que forman la superficie del terreno en sitios poco distantes entre sí. Esto es particularmente relevante para estructuras largas como puentes y conductos ya que las características del movimiento sísmico afectarán de distinta manera a los diversos apoyos. Estos cambios geológicos no deben confundirse con un fenómeno cada vez más común que es la presencia de grietas en la superficie debidas a la extracción excesiva de agua de pozos, comúnmente confundidas con fallas sísmicas.

2.5.2. Cuantificación de los Efectos de Sitio

Wald, Earle, & Quitariano (2004) y Wald & Allen (2007) presentan una metodología para calcular el valor de Vs30 por medio de una correlación con la pendiente del terreno. Este proceso se lleva a cabo con una serie de coeficientes definidos para dos tipos de regiones, activas y estables. La primera de ellas hace referencia a las zonas que presentan un relieve topográfico accidentado, mientras que la segunda se refiere a las zonas donde la topografía es más suave. Estos autores compararon sus resultados con mediciones de Vs30 derivadas a partir de la geología y datos en campo, y observaron una buena correlación entre ellos.

La metodología anteriormente descrita se encuentra implementada en el portal del USGS³ y permite descargar mapas con valores de Vs30 para cualquier región del mundo. En la *Figura 2.18* se presenta el valor de Vs30 obtenido para la zona de estudio.

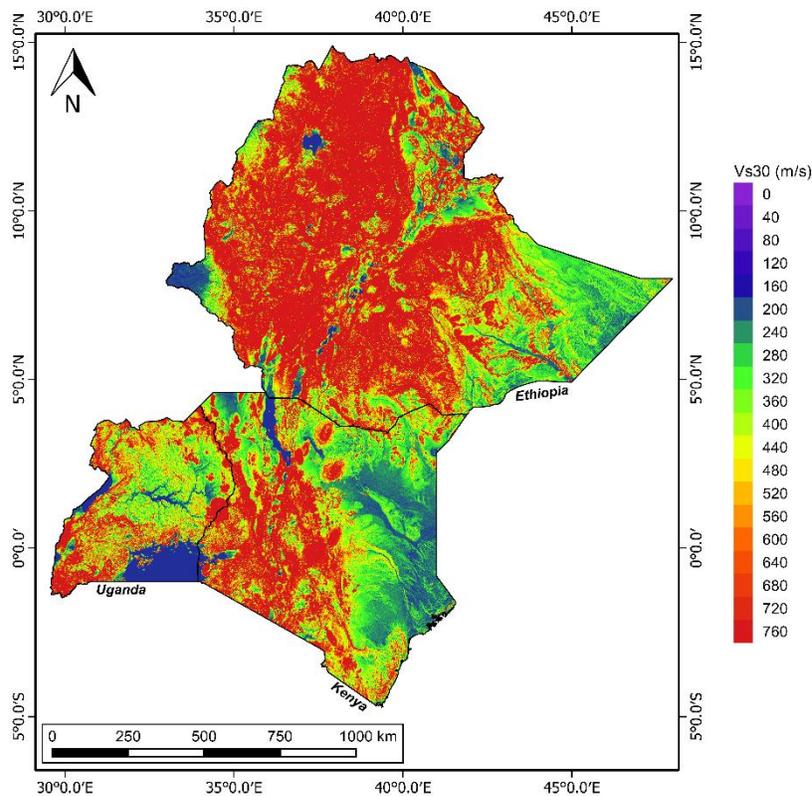


Figura 2.18. Valores de Vs30 (m/s) para la zona de estudio (USGS, 2013)

La variación lineal y no lineal inducida por el suelo se incluyó por medio del factor de amplificación (AF) propuesto por Chiou & Youngs (2014), el cual depende del valor de Vs30 y $\Delta Z_{1.0}$, sin embargo, este último hace referencia al espesor de los sedimentos presentes en el lugar por lo que no se tuvo en cuenta para el cálculo del mismo.

$$AF = \exp \left[\varphi_1 \times \min \left[\ln \left(\frac{V_{S30}}{1130} \right); 0 \right] + \varphi_2 \left[e^{\varphi_3 (\min(V_{S30}; 1130) - 360)} - e^{\varphi_3 (1130 - 360)} \right] \ln \left(\frac{y_{ref} + \varphi_4}{\varphi_4} \right) \right] \quad (2.2)$$

³ Global Vs30 Map Server: <http://earthquake.usgs.gov/hazards/apps/vs30/custom.php>

Donde,

$\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$ son coeficientes de sitio del modelo de respuesta (Tablas 3 y 4 de Chiou & Youngs, 2014),

V_{S30} es la velocidad promedio de las ondas de corte en los primeros 30 m de suelo (Figura 2.18), y

y_{ref} es la amplitud del movimiento del suelo calculado en roca (sección 2.4).

Para determinar el movimiento del suelo incluyendo los efectos de sitio (y_{ES}), se multiplicaron los resultados obtenidos en roca (y_{ref}) por el factor de amplificación calculado con la Eq. (2.2).

$$y_{ES} = y_{ref} \times AF \quad (2.3)$$

En la Tabla 2.4 y en la Figura 2.19 se presentan los factores de amplificación para algunos valores de V_{S30} y periodos estructurales.

Tabla 2.4. Factores de amplificación (FA) por efectos de sitio (Chiou & Youngs, 2014)

Periodo, T (s)	FACTOR DE AMPLIFICACIÓN, FA						
	Vs30						
	1100 m/s	760 m/s	500 m/s	300 m/s	250 m/s	200 m/s	100 m/s
0	1.01	1.21	1.35	1.20	1.06	0.88	0.44
0.01	1.01	1.21	1.35	1.20	1.06	0.88	0.44
0.02	1.01	1.20	1.35	1.20	1.06	0.87	0.42
0.03	1.01	1.17	1.28	1.10	0.96	0.77	0.35
0.04	1.01	1.14	1.20	0.98	0.85	0.68	0.31
0.05	1.01	1.12	1.14	0.91	0.78	0.63	0.30
0.075	1.01	1.11	1.11	0.86	0.74	0.60	0.32
0.1	1.01	1.14	1.15	0.91	0.79	0.65	0.36
0.12	1.01	1.16	1.20	0.96	0.84	0.69	0.38
0.15	1.01	1.19	1.27	1.04	0.91	0.75	0.41
0.17	1.02	1.22	1.32	1.11	0.98	0.81	0.44
0.2	1.02	1.26	1.42	1.24	1.10	0.92	0.51
0.25	1.02	1.32	1.58	1.46	1.31	1.11	0.61
0.3	1.02	1.36	1.70	1.64	1.49	1.27	0.70
0.4	1.03	1.42	1.87	1.94	1.79	1.54	0.84
0.5	1.03	1.46	2.01	2.20	2.07	1.81	1.03
0.75	1.03	1.51	2.18	2.67	2.61	2.40	1.51
1	1.03	1.53	2.29	3.05	3.12	3.05	2.31
1.5	1.03	1.55	2.36	3.47	3.80	4.15	4.98
2	1.03	1.53	2.34	3.76	4.41	5.35	9.91
3	1.03	1.53	2.39	4.13	5.02	6.38	13.53
4	1.03	1.52	2.36	4.05	4.91	6.22	12.95
5	1.03	1.48	2.24	3.70	4.43	5.53	10.95
7.5	1.02	1.39	1.96	3.00	3.48	4.19	7.44
10	1.02	1.32	1.78	2.55	2.90	3.39	5.53

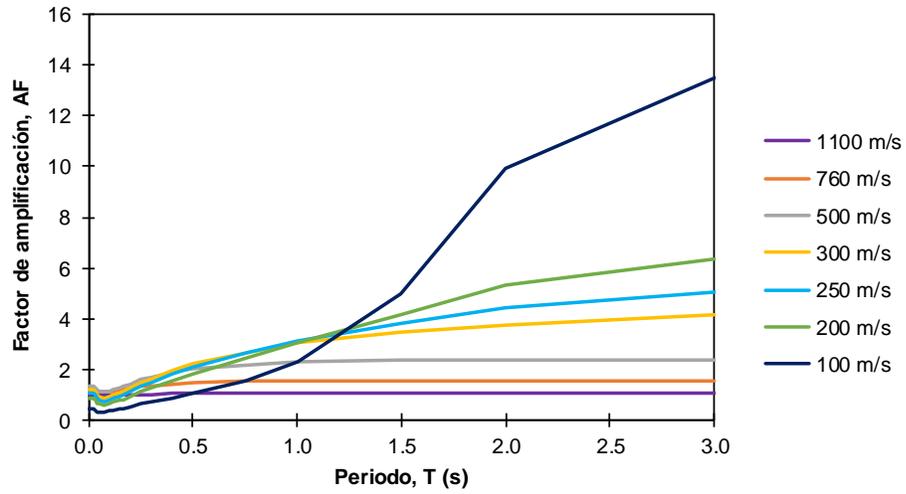


Figura 2.19. Factor de amplificación para $y_{ref} = 1g$ y algunos periodos estructurales, de acuerdo a la metodología de Chiou & Youngs (2014)

CAPÍTULO 3

ÁNÁLISIS PROBABILÍSTICO DE AMENAZA SÍSMICA

En las últimas décadas se ha desarrollado el enfoque probabilístico en los análisis de amenaza sísmica, con el fin de involucrar de manera analítica la incertidumbre asociada con las variables que intervienen en el peligro sísmico de una región. Parámetros como la frecuencia de ocurrencia de determinado sismo, la probabilidad de que ocurra en un sitio específico, probabilidades de excedencia de intensidades sísmicas, etc., son incluidos en los modelos de cálculo, para conformar un análisis probabilístico de amenaza sísmica (Probabilistic Seismic Hazard Assessment, PSHA).

El procedimiento para llevar a cabo un análisis probabilístico de amenaza sísmica se puede resumir en 6 pasos:

1. Definición y caracterización de las fuentes sismogénicas principales: a partir de la información geológica y sismotectónica se definen las fuentes generadoras de terremotos con influencia en el sitio de análisis, en términos de su geometría y distribución de probabilidad de puntos de inicio de la ruptura en el área de falla definida. A estas fuentes se les conoce comúnmente como zonas sismogénicas. Es usual asumir una distribución de probabilidad uniforme, lo cual implica que la ocurrencia de sismos se espera con igual probabilidad en cualquier lugar de la zona definida.

2. Asignación de parámetros de sismicidad a las diferentes fuentes sísmicas: la sismicidad se establece por medio de una curva de recurrencia de magnitudes, la cual es una relación específica para cada fuente, que indica cual es la tasa de excedencia de una magnitud sísmica en particular. Para ello, se definen los parámetros sísmicos (β , λ_0 , M_0 , M_U) en base al catálogo sísmico.

3. Modelo de atenuación de parámetros de movimiento del terreno: se seleccionan las leyes de atenuación que mejor representen las condiciones del movimiento entre las fuentes y los sitios donde se calcula la amenaza, ya sean leyes existentes en la literatura o creadas con información y datos locales. Según el alcance del análisis se requerirán funciones de atenuación de aceleración, velocidad, desplazamiento, componentes espectrales de los anteriores parámetros, duración, etc. Debe involucrarse la incertidumbre asociada a la estimación de los parámetros.

4. Generación de mapas de amenaza de eventos representativos: se combinan las incertidumbres asociadas a localización, tamaño y atenuación y se obtienen los mapas de distribución espacial de intensidad sísmica (valores espectrales) para cada evento. También se pueden obtener curvas de amenaza para sitios específicos, las cuales indican la probabilidad que una intensidad específica sea igualada o excedida en un periodo de tiempo determinado.

5. Amplificación de parámetros de amenaza por efectos de sitio: la respuesta dinámica de depósitos de suelo modifica las características del movimiento en amplitud, contenido de frecuencias y duración. El efecto de amplificación y deamplificación de la intensidad por efecto del suelo se cuantifica por medio de cocientes de espectros de respuesta de manera que modifican directamente los mapas calculados en el paso (4).

6 Aplicación del modelo probabilístico de amenaza sísmica: obtención de mapas de amenaza sísmica para diferentes periodos de retorno.

En el *CAPÍTULO 2* se abarcaron los puntos 1-3, quedando definidas las zonas sismogénicas, los parámetros sísmicos y las relaciones de atenuación a utilizar.

3.1. HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

Existe una diversidad de herramientas computacionales y aplicaciones en software para la evaluación de la amenaza sísmica. La mayoría de estas aplicaciones se basan en modelos de amenaza probabilística (PSHA), brindando diferentes utilidades en términos de definición de fuentes sísmicas, sismicidad y relaciones de atenuación de movimiento fuerte. La *Tabla 3.1* presenta algunos ejemplos de los principales sistemas existentes.

Tabla 3.1. Herramientas computacionales para el análisis de amenaza sísmica
(Instituto de Ingeniería UNAM, 2015)

Programa	Descripción	Método de cálculo	Referencia
EZ-FRISK	Programa de cálculo para estimar amenaza sísmica, respuesta local, manipulación de señales sísmicas, obtención de señales consistentes con espectros de respuesta determinados. Cuenta con archivos predeterminados de fuentes sísmicas, sismicidad y atenuación.	- Amenaza sísmica: PSHA - Respuesta local de suelos: Método lineal equivalente	Risk Engineering Inc. http://www.ez-frisk.com
HAZUS-MH	Programa de cálculo de riesgos por diversas amenazas naturales (Sismo, Huracán, Inundación)	PSHA	FEMA http://www.fema.gov/plan/prevent/hazus/
OpenSHA	Sistema en código Open Source para el cálculo de amenaza sísmica.	PSHA	USGS- SCEC http://www.opensha.org/
CRISIS2007	Sistema para la integración de la amenaza sísmica en una zona determinada. Permite la definición de fuentes, sismicidad, atenuación y sitios de análisis.	PSHA / DSHA	Instituto de Ingeniería. UNAM

Para este caso de estudio, se utilizó el programa CRISIS2015 versión 2.3 (Core library 15.2.3.0). En la sección 3.2 se presenta una breve reseña del marco teórico en el cual se basa dicho programa.

3.2. MARCO TEÓRICO

El programa CRISIS fue elaborado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Ordaz et al., 2015). Calcula la amenaza sísmica utilizando un modelo probabilístico, o determinístico, que considera las tasas de excedencia, las características de atenuación y la distribución geográfica de los sismos.

Algunas de las características principales de CRISIS son:

- La ocurrencia del sismo se puede modelar, ya sea como un proceso de Poisson, un proceso de sismo característico o como un proceso de ocurrencia no-poissonianos general.
- Las fuentes se pueden modelar como áreas, líneas o puntos.
- Opera con un procedimiento de integración dinámica que permite el cálculo rápido de la amenaza en áreas extendidas.
- Los modelos de atenuación proporcionados por el usuario, o los integrados en CRISIS, dan una gran flexibilidad para los cálculos.
- Contiene una interfaz gráfica que facilita la entrada de datos.

Se basa en el planteamiento original de Esteva-Cornell donde el territorio en estudio se divide en fuentes sísmicas de acuerdo a consideraciones geotectónicas; en la mayoría de los casos, se supone que dentro de una fuente sísmica se lleva a cabo un proceso independiente de la ocurrencia de sismos. Para cada

una de estas fuentes, la tasa de excedencia de magnitud, $\lambda(m)$, se estima por medio del análisis estadístico de los catálogos de sismos. Estas tasas son el número de sismos, por unidad de tiempo, en los que la magnitud m se supera.

Las fuentes sísmicas se pueden idealizar por medio de líneas, áreas o volúmenes, por lo que CRISIS lleva a cabo un proceso de integración espacial para dar cuenta de todas las posibles ubicaciones focales. Usualmente, se supone que dentro de una fuente sísmica todos los puntos tienen la misma probabilidad de ser el foco de un sismo. En este caso, las tasas de excedencia de aceleración de la i -ésima fuente se calcula con la siguiente expresión:

$$v_i(a) = \sum_j w_{ij} \int_{M_0}^{M_u} \left(-\frac{\partial}{\partial m} \lambda_i(m) \right) \Pr(A > a | m, R_{ij}) dm \quad (3.1)$$

Donde,

M_0	es la magnitud umbral,
M_u	es la magnitud máxima,
$\lambda(m)$	es la tasa de excedencia para una magnitud m , y
$\Pr(A > a m, R_{ij})$	es la probabilidad de que la aceleración exceda el valor de a en el sitio, teniendo en cuenta que un sismo de magnitud m se origina a una distancia R_{ij} , definida como la distancia entre el sitio y los sub-elementos en el que ha sido dividida la fuente.

Se asigna un peso w_{ij} a cada sub-elemento de tal forma que se cumpla $\sum w_{ij} = 1$. Finalmente, se suman las contribuciones de las N fuentes a la amenaza sísmica en el sitio mediante la siguiente expresión:

$$v(a) = \sum_{i=1}^N v_i(a) \quad (3.2)$$

Generalmente, los resultados de amenaza se expresan en términos de probabilidad de excedencia dado un valor de intensidad y varios periodos de retorno. También es posible obtener resultados en términos de probabilidad de no-excedencia, o bien, tasas de excedencia uniformes. Es posible también crear curvas de nivel y 3D de los niveles de intensidad asociados a dichas tasas.

Para una explicación más detallada se puede consultar la tesis doctoral de Villani (2010), en la cual se presenta un completo marco teórico del análisis probabilístico de amenaza sísmica.

3.3. MODELO PROBABILÍSTICO DE AMENAZA SÍSMICA

Los cálculos de amenaza sísmica se realizaron para 8 periodos estructurales (T) comprendidos entre 0 (PGA) y 2 s. Las curvas de tasa de excedencia se construyeron con 12 puntos, igualmente espaciados en escala logarítmica, para los rangos de intensidades I_{min} y I_{max} , las cuales se presentan en la *Tabla 3.3*.

Tabla 3.2. Periodos estructurales e intensidades de cálculo

Caso	Periodo estructural, T (s)	Intensidad mínima, I _{min} (gal)	Intensidad máxima, I _{max} (gal)
1	0.0	1.0	1500
2	0.1	2.5	3750
3	0.2	2.5	3750
4	0.3	2.5	3750
5	0.5	1.8	2630
6	1.0	1.0	1500
7	1.5	1.0	1200
8	2.0	1.0	1050

A continuación, se listan otras consideraciones que se tuvieron en cuenta al momento de realizar el modelo de amenaza:

- Intervalo de la malla de cálculo: 0.125° (longitud y latitud)
- Máxima distancia de integración: 500 km
- Tamaño mínimo de triángulo: 1 km
- Mínima relación Distancia/Tamaño del triángulo: 7

3.4. RESULTADOS DE AMENAZA SÍSMICA

Se obtuvieron resultados de intensidad sísmica, en términos de aceleración, para periodos de retorno (T_r) de 10, 25, 50, 100, 250, 475, 500 y 1000 años, y para cada uno de los periodos estructurales definidos anteriormente. Adicionalmente, se definió un periodo de exposición (T_{exp}) de 50 años. En la *Tabla 3.3* se presentan las probabilidades de excedencia asociadas a cada caso.

Tabla 3.3. Periodos de retorno y probabilidades de excedencia para 50 años de exposición

Periodo de retorno, T_r (años)	Probabilidad de excedencia, P_e (%)
10	99.3%
25	86.5%
50	63.2%
100	39.3%
250	18.1%
475	10.0%
500	9.5%
1000	4.9%

En la *Figura 3.1* se presentan los valores de PGA (gal) asociados a un periodo de retorno de 475 años y sin tener en cuenta los efectos de sitio, es decir, en roca. Por otro lado, en la *Figura 3.2* se presentan los valores de PGA (gal) para el mismo periodo de retorno, pero considerando los efectos de sitio, es decir, en suelo. Esto se hace con el objeto de poder visualizar la variación de los resultados debido a la influencia de los efectos de sitio.

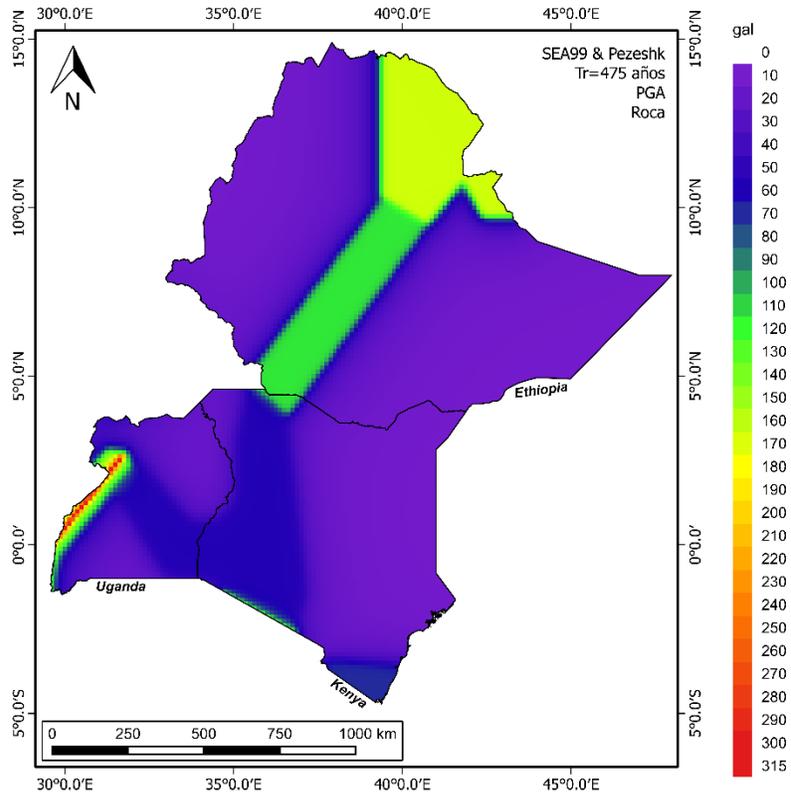


Figura 3.1. Valores de PGA (gal), en roca, asociados a $Tr=475$ años

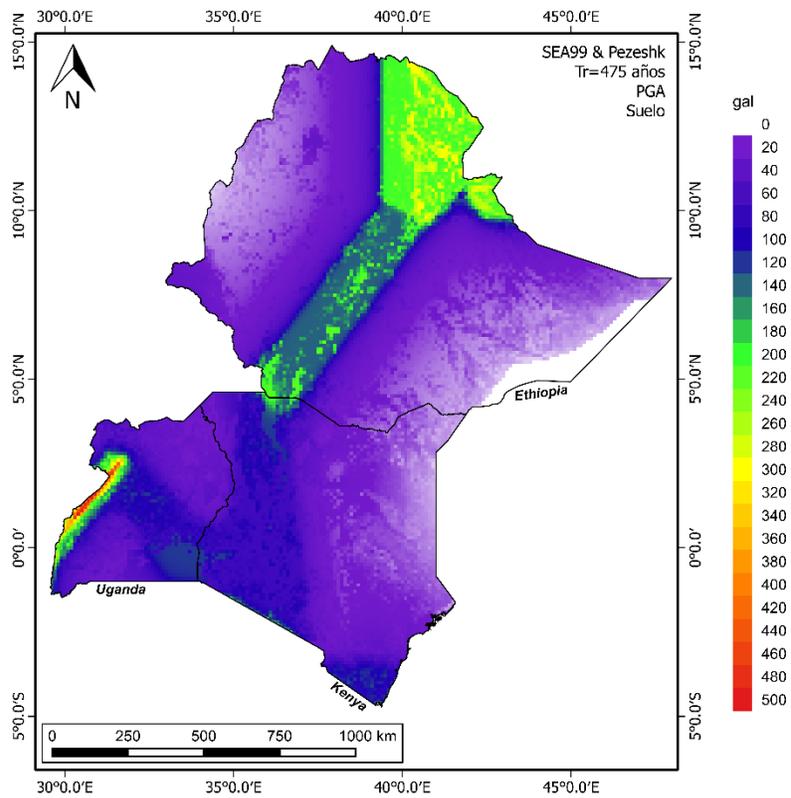


Figura 3.2. Valores de PGA (gal), en suelo, asociados a $Tr=475$ años

Efectivamente, se puede observar un aumento considerable en las aceleraciones debido a la influencia del suelo. También se aprecian cambios al interior de las zonas, como es el caso de b y d, donde ya no se presenta una distribución uniforme de la aceleración, producto de incluir los efectos de sitio.

Como se pudo observar, la influencia del suelo puede generar aumentos importantes en los valores de aceleración. Por lo tanto, para no subestimar la amenaza, todos los resultados que se presentan de aquí en adelante tendrán en cuenta los efectos de sitio.

De la *Figura 3.3* a la *Figura 3.9* se presentan los valores de aceleración (gal) asociados a un periodo de retorno de 475 años y para cada uno de los periodos estructurales. Los resultados correspondientes a los demás periodos de retorno se presentan en el *Anexo 2*.

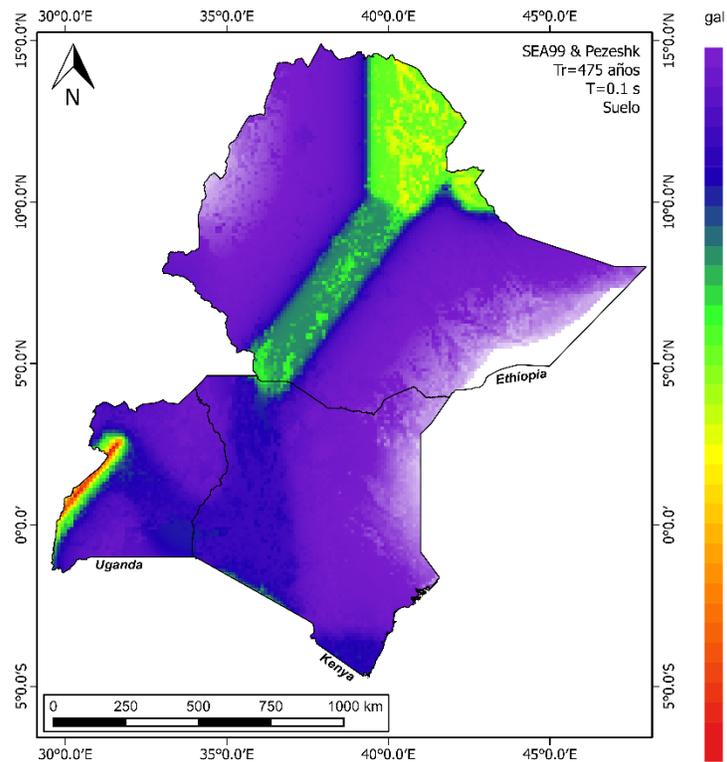


Figura 3.3. Aceleraciones espectrales para $T=0.1$ s (gal), en suelo, para $Tr=475$ años

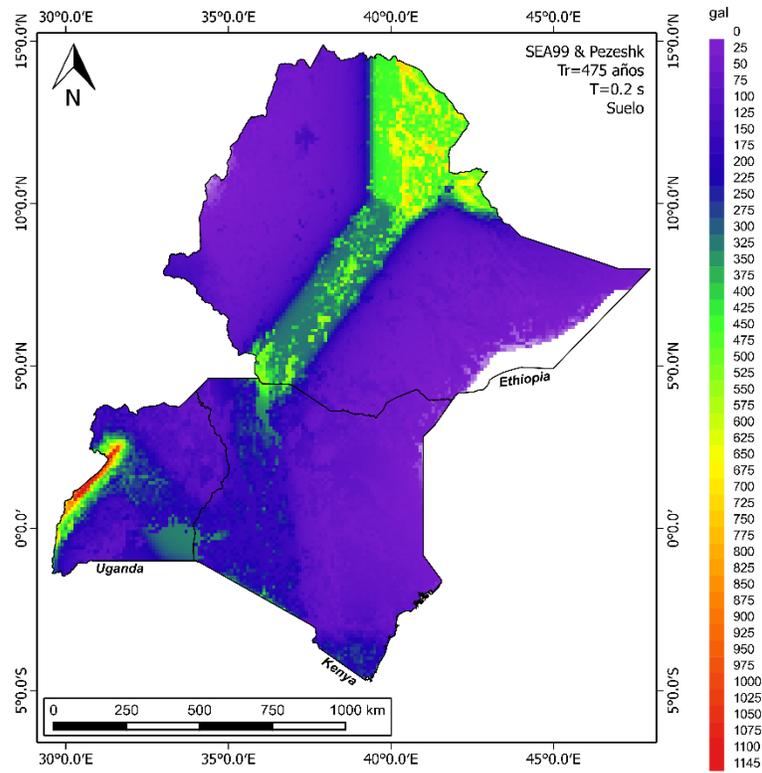


Figura 3.4. Aceleraciones espectrales para $T=0.2$ s (gal), en suelo, para $Tr=475$ años

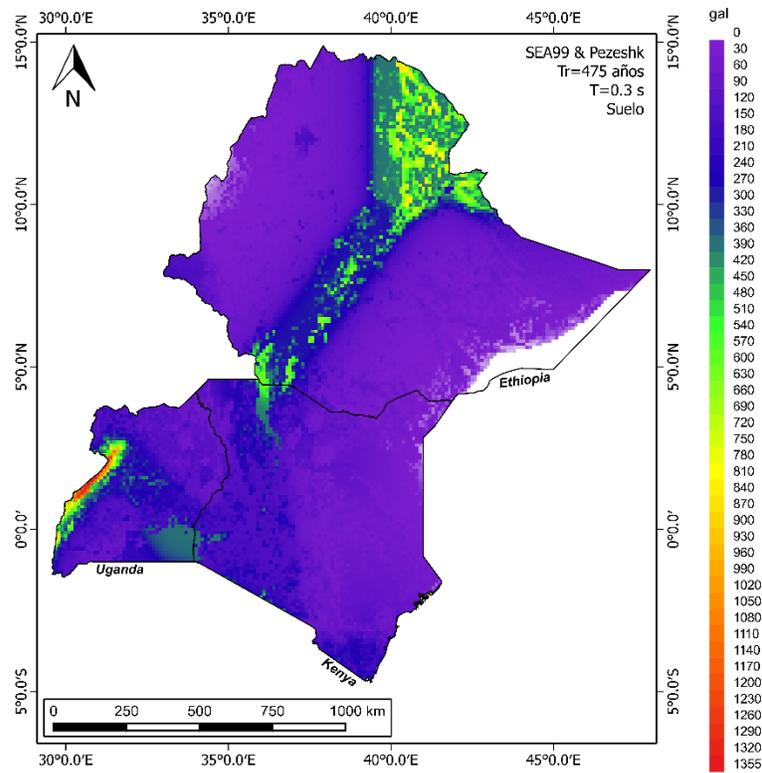


Figura 3.5. Aceleraciones espectrales para $T=0.3$ s (gal), en suelo, para $Tr=475$ años

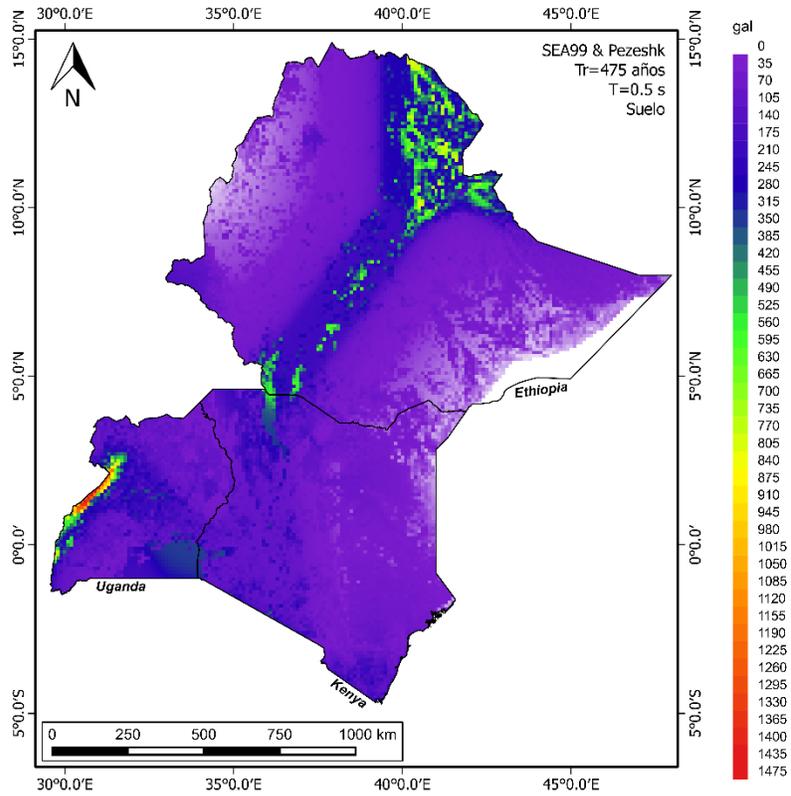


Figura 3.6. Aceleraciones espectrales para $T=0.5$ s (gal), en suelo, para $Tr=475$ años

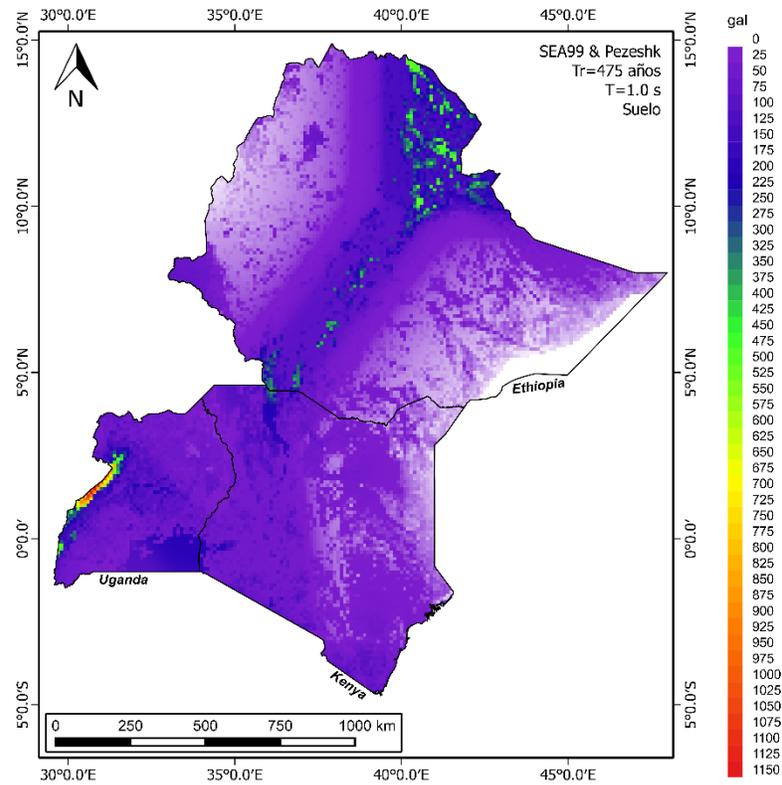


Figura 3.7. Aceleraciones espectrales para $T=1.0$ s (gal), en suelo, para $Tr=475$ años

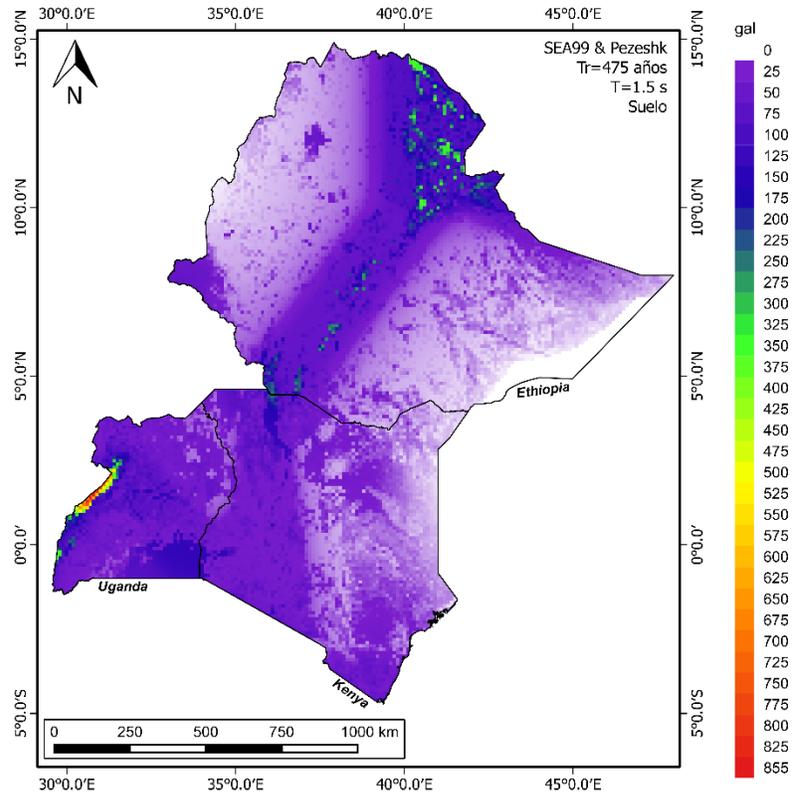


Figura 3.8. Aceleraciones espectrales para $T=1.5$ s (gal), en suelo, para $Tr=475$ años

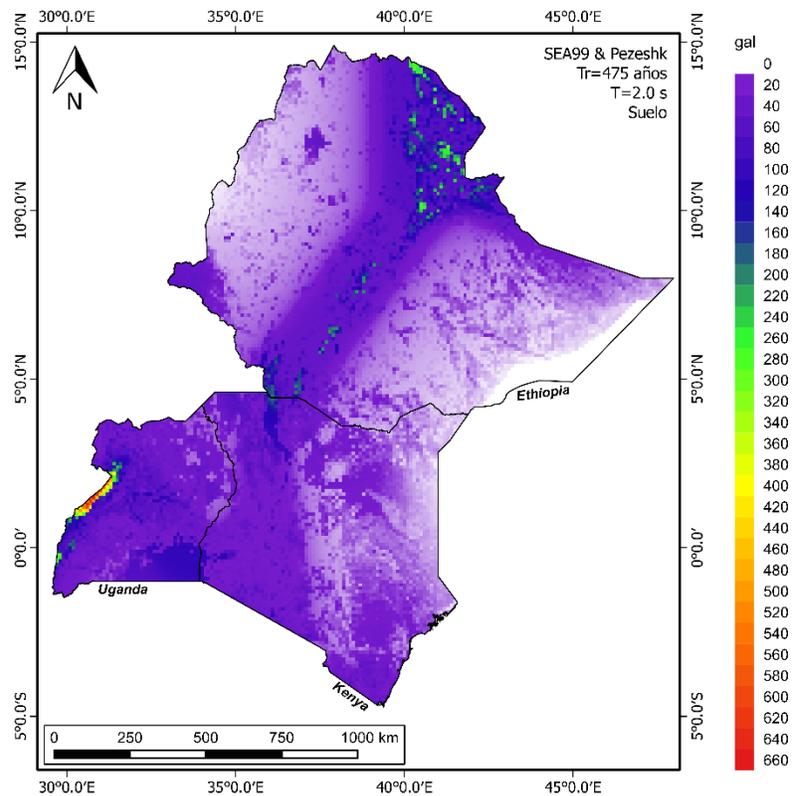


Figura 3.9. Aceleraciones espectrales para $T=2.0$ s (gal), en suelo, para $Tr=475$ años

De las figuras anteriores se puede observar que la máxima aceleración se presenta en la zona f para un periodo estructural de 0.5 s, 1475 gal, mucho mayor si se compara con el valor de PGA del mismo periodo, 500 gal. También es importante resaltar las aceleraciones que se presentan dentro de la zona b, particularmente para $T=0.3$ s, cuyo máximo es aproximadamente de 870 gal. Cabe notar que, independientemente del periodo estructural, la mayor intensidad sísmica se presenta en las zonas b, d y f, lo cual era de esperarse, debido a que se encuentran localizadas en regiones caracterizadas por ser tectónicamente activas, la Depresión de Afar, el Rift de Etiopía y la rama oeste del sistema EARS, respectivamente.

A partir de los resultados obtenidos, se pudo comprobar que las máximas aceleraciones de cada zona no se presentan de manera simultánea para un mismo periodo estructural. Por otro lado, los resultados obtenidos son congruentes con el espectro de respuesta propuesto por Spudich et al. (1999), donde las máximas aceleraciones se presentan en los periodos cercanos a 0.3 y 0.5 s (ver *Figura 2.14*)

En las figuras anteriores se presentaron los resultados de amenaza a una escala local. Sin embargo, para una mejor visualización de como varían los valores de aceleración acorde va aumentando el periodo estructural, en la *Figura 3.10* se presentan los resultados a una misma escala, la cual se definió a partir del máximo valor de aceleración (1475 gal para la Zona f).

Como se mencionó anteriormente, las mayores aceleraciones se reportan para los periodos estructurales de 0.3 y 0.5 s, específicamente en las zonas b y f. Por otro lado, en los periodos superiores, 1.5 y 2.0 s, se observan los valores más bajos de aceleración, menores a 150 gal. Como era de esperarse, la zona correspondiente a la sismicidad de fondo, la Zona z, presenta menores intensidades sísmicas que las demás zonas, independientemente del periodo estructural que se analice.

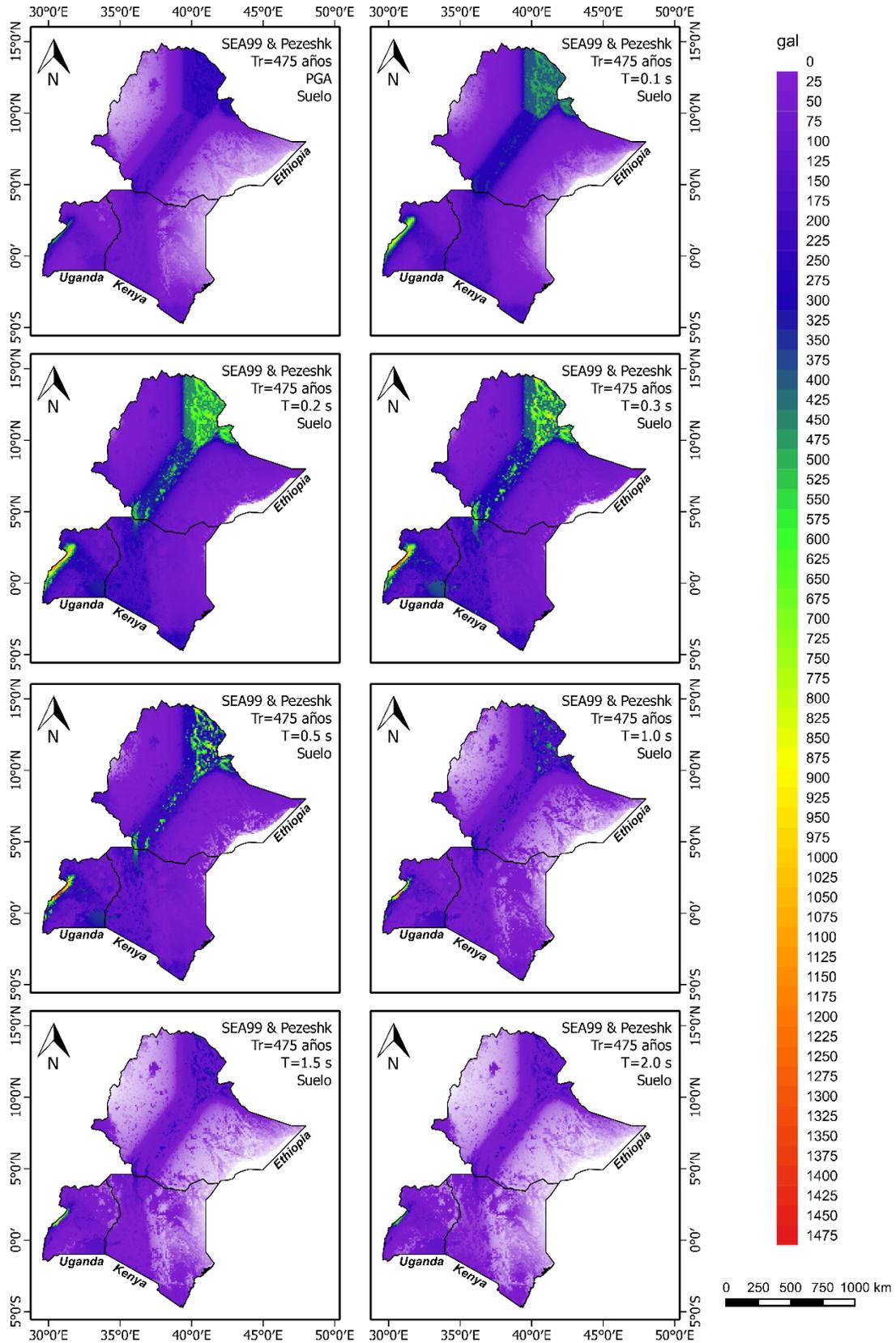


Figura 3.10. Valores de aceleración (gal), en suelo, para Tr=475 años

3.5. RESULTADOS DE AMENAZA CON OTRAS PROPUESTAS DE GMPE

Debido a la escasa información que se tiene respecto a las posibles relaciones de atenuación y a los pocos estudios que se han adelantado en la zona de estudio, el modelo de amenaza descrito anteriormente, el cual se basa en las GMPEs propuestas por Spudich et al. (1999) y Pezeshk et al. (2011), puede no ser la única alternativa. La mayor incertidumbre se encuentra en qué relación de atenuación usar para las zonas tectónicamente activas, ya que las zonas tectónicamente estables aportan poco a los resultados de amenaza. Como primera opción se ha tomado la propuesta de Spudich et al. (1999), sin embargo, hay otras posibles opciones como lo son las GMPEs desarrolladas por Chiou & Youngs (2014) y Boore, Stewart, Seyhan, & Atkinson (2014), ambas aplicables al régimen extensional.

Con el objeto de explorar nuevas opciones de GMPE y poder observar que tanto varían los resultados de amenaza, se optó por construir un árbol lógico con las tres opciones anteriormente descritas.

Los árboles lógicos son ampliamente utilizados en los análisis probabilísticos de amenaza sísmica como una herramienta para capturar las incertidumbres asociadas a cada uno de los elementos que conforman un análisis de este tipo. Dichas incertidumbres pueden estar asociadas al poco conocimiento que se tiene del fenómeno, a la sismicidad de la zona de estudio, a las características de ruptura y la delimitación de las fuentes sísmicas, la desviación estándar de las leyes de atenuación, la definición de los parámetros sísmicos, la magnitud máxima, etc.

Kulkarni, Youngs, & Coppersmith (1984) fueron los primeros en introducir los árboles lógicos en un análisis probabilístico de amenaza sísmica y desde entonces se ha venido utilizando en otros estudios de la misma índole (Coppersmith & Youngs, 1986; Reiter, 1990). A pesar de que esta metodología se usa ampliamente a nivel mundial, no hay mucha literatura ni procedimientos que describan detalladamente el proceso a seguir para conformar los árboles lógicos, ni para asignar los pesos a cada una de sus ramas que lo conforman.

Un árbol lógico se construye de tal forma que en cada paso del proceso que se tenga incertidumbre se adicionan ramas separadas para cada una de las alternativas que el analista considere factible. A cada una de ellas se le asigna un peso normalizado (que sumados dan igual a 1.0) el cual refleja la confianza que el analista tiene en que ese caso en particular es el correcto. Sin embargo, por cada rama que se adiciona al árbol lógico, se castiga el tiempo de ejecución del modelo ya que se torna más pesado y esto se traduce en demanda computacional; por ello, se recomienda no adicionar ramas con pequeñas diferencias entre los parámetros que las definen. Por otro lado, se debe dejar claro que a pesar de que el árbol lógico ayuda a acarrear las incertidumbres que se tienen en el modelo no deja de ser responsabilidad del analista estructurarlo bien. No se debe caer en el error de adicionar gran cantidad de ramas, con pesos pequeños, donde quizás se puedan dar casos físicamente improbables.

Asumamos que la probabilidad de excedencia de un nivel a en una escala de intensidad A para un sitio en particular y un marco de tiempo i -th, es $P_{ij}(A > a)$, donde j es la rama j -th del árbol lógico. Asumamos también que a cada una de las ramas j -th se le asigna un peso normalizado w_j , donde $j=1, 2, \dots, N$. Es importante tener en cuenta que la suma de los todos los valores de w_j debe ser igual a 1.0.

Por lo tanto, el valor esperado de $P_{ij}(A > a)$ una vez se hayan evaluado todas las ramas, $P_i(A > a)$, está dado por:

$$P_i(A > a) = \sum_{j=1}^N P_{ij}(A > a) w_j \quad (3.3)$$

3.5.1. Resultados en Roca

Se elaboraron modelos de amenaza utilizando las GMPEs propuestas por Chiou & Youngs (2014) y Boore et al. (2014) en lugar de Spudich et al. (1999). Las zonas sismogénicas, los parámetros sísmicos y los demás parámetros del modelo no se modificaron para poder observar las variaciones debidas solo al cambio de las relaciones de atenuación. Finalmente, se construyó un árbol lógico con los modelos asociados a las GMPEs de Spudich et al. (1999), Chiou & Youngs (2014) y Boore et al. (2014), asignándoles un peso igual a 0.6, 0.2 y 0.2, respectivamente.

Cabe resaltar que solamente se construyeron los modelos correspondientes al periodo de retorno de 475 años y periodo estructural igual a 0 s (PGA). Los efectos de sitio no se tomaron en cuenta ya que la influencia de éstos se discutirá más adelante. Los resultados se presentan en la *Figura 3.11*.

Se puede observar que el máximo de las intensidades sísmicas se presenta en el modelo donde se utilizó la relación de atenuación desarrollada por Boore et al. (2014). Sin embargo, los valores de aceleración presentan cambios bruscos a lo largo del territorio, lo cual resulta poco probable. De igual forma, el modelo correspondiente a Chiou & Youngs (2014) presenta cambios bruscos en los valores de aceleración. Por otro lado, el modelo que se construyó por medio del árbol lógico presenta resultados más coherentes que los dos anteriores ya que no se observan variaciones súbitas a lo largo de su extensión. Finalmente, se debe resaltar que no se aprecian muchas diferencias entre los resultados del modelo de árbol lógico y Spudich et al. (1999). Lo anterior significa que los resultados presentados en la sección 3.4 son representativos y que no habría necesidad de considerar múltiples modelos con diferentes GMPEs en cada uno de ellos.

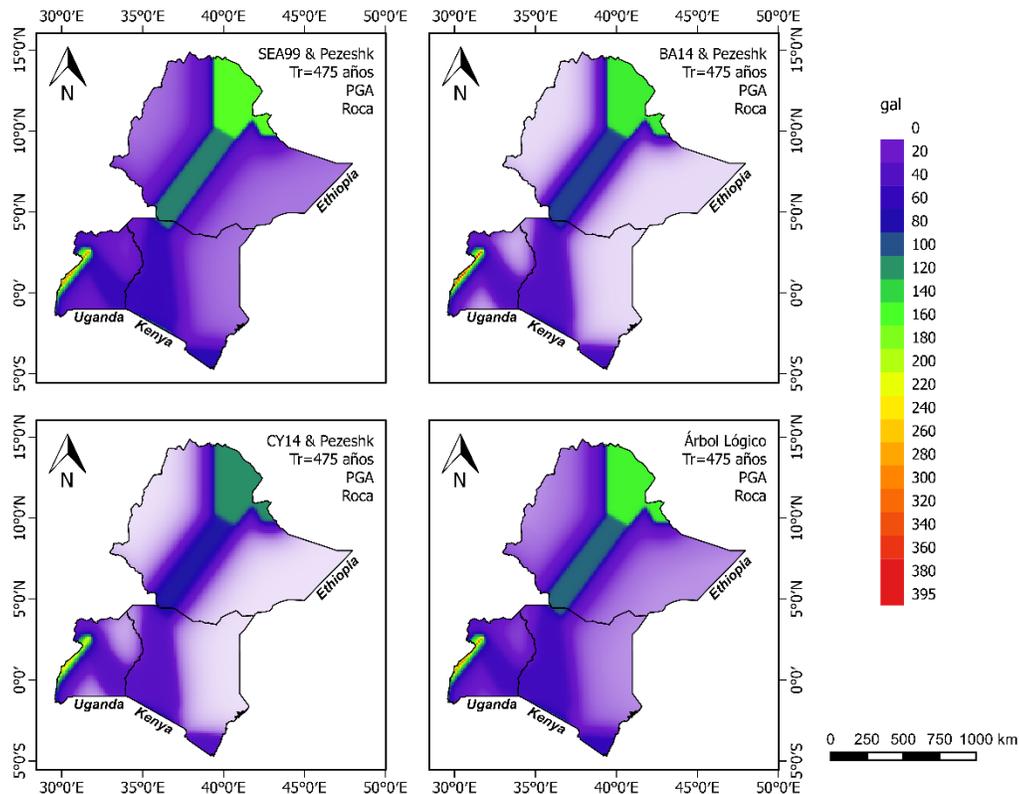


Figura 3.11. Valores de aceleración (gal), en roca, para $Tr=475$ años, diferentes alternativas de GMPEs y árbol lógico

3.5.2. Resultados en Suelo

De manera similar a como se analizaron los distintos resultados en roca, en suelo también se construyeron 3 modelos de amenaza, cada uno con una relación de atenuación diferente, Spudich et al. (1999), Boore et al. (2014) y Chiou & Youngs (2014). Se fijó el mismo periodo de retorno, 475 años, y el mismo periodo estructural, 0 s (PGA). Los parámetros sísmicos no se modificaron, ni tampoco los pesos de cada modelo para la construcción del árbol lógico. Los resultados se presentan en la *Figura 3.12*.

Tal como se discutió en la sección 3.4, las intensidades sísmicas pueden sufrir variaciones debido a los efectos de sitio en la región. Lo anterior se evidencia en el aumento de las aceleraciones y en los cambios de las mismas al interior de las zonas. Independientemente si las aceleraciones sufren o no amplificaciones por los efectos del suelo, en los resultados se puede observar un parecido con respecto a los obtenidos en roca, es decir, en los modelos de Boore et al. (2014) y Chiou & Youngs (2014) se reportan cambios bruscos entre las aceleraciones, mientras que en los modelos de Spudich et al. (1999) y el árbol lógico se aprecia una variación más suave entre los mínimos y los máximos. Nuevamente, la semejanza entre los resultados del modelo Spudich et al. (1999) y el árbol lógico es evidente, confirmando lo que se mencionó anteriormente, el modelo de Spudich et al. (1999) presenta resultados aceptables de la amenaza en la zona de estudio.

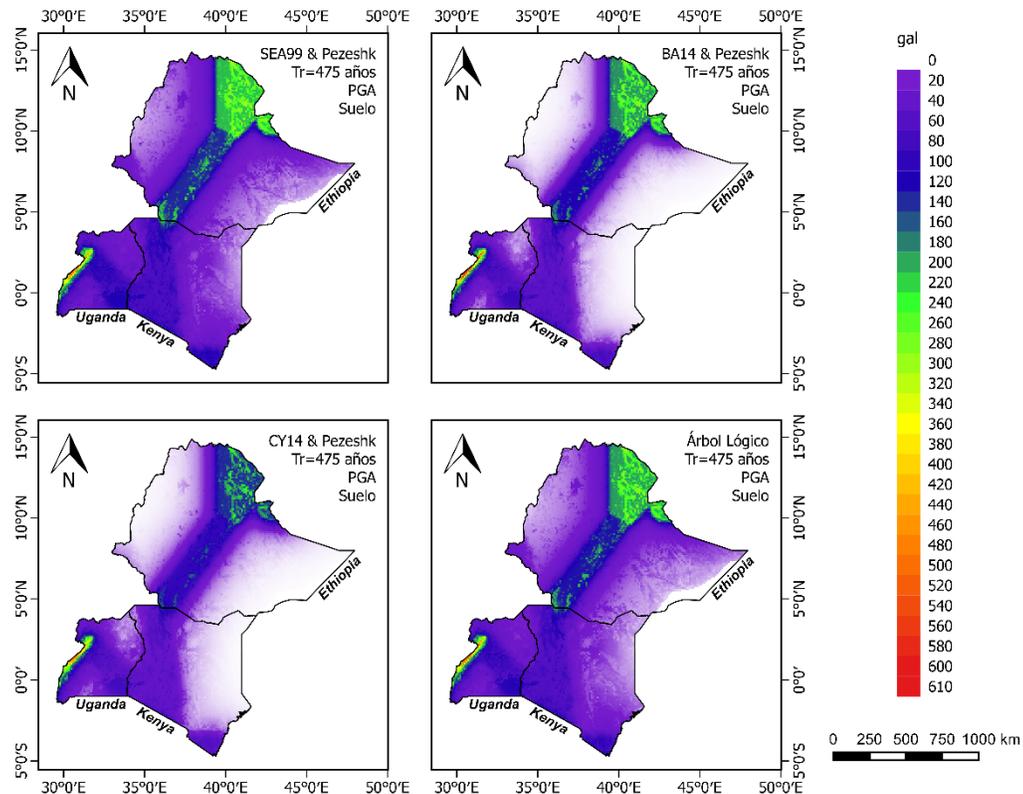


Figura 3.12. Valores de aceleración (gal), en suelo, para $Tr=475$ años, diferentes alternativas de GMPEs y árbol lógico

CAPÍTULO 4

BASES DE DATOS DE EXPOSICIÓN

El análisis de riesgo involucra la evaluación de los elementos expuestos que son susceptibles a sufrir daño o afectación por las amenazas consideradas. Dichos elementos expuestos pueden ser componentes de obras de infraestructura, sus contenidos, los ocupantes de la infraestructura expuesta o los habitantes de las poblaciones consideradas. En general, puede incluirse en la base de datos cualquier elemento geográficamente referenciado susceptible de sufrir algún tipo de efecto por causa de cualquier parámetro de intensidad de amenaza que se defina. Las bases de datos de exposición son un componente fundamental en el análisis o evaluación de riesgo y de su resolución y detalle depende el grado de precisión de los resultados. El modelo puede evaluarse con diferentes niveles de resolución y cuando no se cuenta con información al detalle es necesario realizar estimaciones aproximadas que representen o den cuenta de dicho inventario de activos expuestos en forma aproximada. Una vez caracterizado cada uno de los componentes expuestos se hace necesario asignarles, como mínimo, las siguientes propiedades:

- Ubicación en términos de un sistema de coordenadas.
- Caracterización geométrica en planta del bien mediante un archivo en formato Shape (puntos, polilíneas, polígonos). Esta información se utiliza principalmente para visualización de datos y resultados y para definición de la intensidad del fenómeno amenazante.
- Valoración económica del bien.
- Ocupación humana.
- Parámetros que caracterizan la vulnerabilidad del bien, o directamente la asignación de una función de vulnerabilidad establecida. La vulnerabilidad debe especificarse en términos del daño físico y/o en términos de la afectación humana (normalmente el número esperado de víctimas), como función de la intensidad seleccionada para el fenómeno amenazante.

Como se mencionó anteriormente (*ALCANCES Y LIMITACIONES*), las bases de datos de exposición para inmuebles, centros de salud e instituciones educativas se obtuvieron de otros estudios (The World Bank & ImageCat, 2015; The World Bank, RED, & ERN, 2016). Lo que se buscó en este trabajo fue obtener indicadores de riesgo, los cuales son pieza clave al momento de evaluar los impactos generados por la ocurrencia de un fenómeno natural. Por tal motivo, fue necesario integrar los resultados amenaza junto con bases de datos de exposición y funciones de vulnerabilidad, las cuales se describen *más adelante*, para obtener estimadores puntuales del riesgo (ver sección 6.1.4). Estas bases de datos se construyeron a partir de imágenes satelitales, estudios y bases de datos previos, y censos realizados al interior de cada región. Cada una de ellas se definió para dos estados en el tiempo, el primero corresponde al año 2015, mientras que el segundo consiste en una proyección lineal para el año 2050 basada en el crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB) de cada país. Cabe resaltar que para el análisis proyectado al 2050 no se modificó la ubicación geográfica ni la cantidad de los activos que constituyen las bases de datos, simplemente se aumentó su valor físico debido al crecimiento que el PIB pudo tener en ese lapso de tiempo; tampoco se tuvo en cuenta la depreciación a lo largo del tiempo transcurrido.

4.1. PRODUCTO INTERNO BRUTO

El Producto Interno Bruto (PIB) es una magnitud macroeconómica que expresa la suma del valor agregado bruto de todos los productores residentes en la economía más todo impuesto a los productos, menos todo subsidio no incluido en el valor de los productos. Se calcula sin hacer deducciones por depreciación de bienes manufacturados o por agotamiento y degradación de recursos naturales. Las macromagnitudes se utilizan para medir las operaciones y flujos que tienen lugar en la economía de un

país o una región determinada, lo que permite tener una visión en conjunto de la economía de ese país (The World Bank, 2016).

De acuerdo con Jerven (2013), el continente africano presenta vacíos en las bases de datos económicas debido a la baja capacidad de las oficinas nacionales de estadística y a la disponibilidad de las fuentes de información, por lo tanto, existen inconsistencias y baja precisión en el cálculo del PIB de las naciones africanas. Sin embargo, el Banco Mundial ha calculado este indicador para una extensa lista de países, incluyendo Etiopía, Kenia y Uganda, y adicionalmente, se le ha asignado una clasificación a cada uno de ellos de acuerdo a su nivel de ingresos. Para el caso de los países en los cuales se centra el presente trabajo, Etiopía, Kenia y Uganda, éstos han sido clasificados como países de ingreso bajo, mediano-bajo y bajo, respectivamente. En la *Figura 4.1* se presentan los valores del PIB obtenidos por el Banco Mundial para Etiopía, Kenia y Uganda a lo largo de los últimos 55 años.

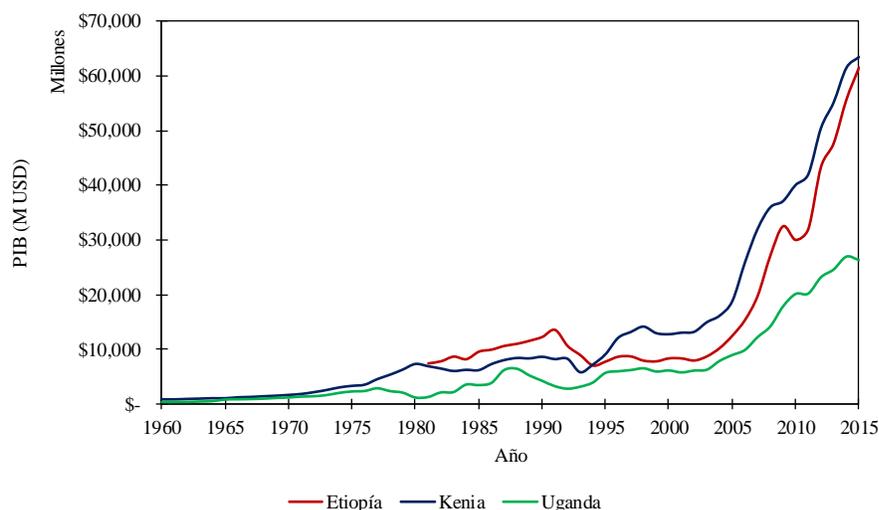


Figura 4.1. Producto interno bruto (PIB) anual de Etiopía, Kenia y Uganda

Se puede observar que la curva de variación del PIB para Etiopía no está disponible para los años anteriores a 1981, lo cual confirma los vacíos de información a los que hace referencia Jerven (2013). De acuerdo con el mismo autor, el evidente crecimiento del PIB a partir del año 2002 puede ser consecuencia del crecimiento de la economía de cada país, sin embargo, existe la posibilidad de que dicho crecimiento sea producto de la inclusión de nueva información económica que se había ignorado en años anteriores o que no había sido reportada por las respectivas entidades.

A pesar de la desinformación económica, el Banco Mundial reporta los siguientes valores del PIB para el 2015 y una proyección al año 2050.

Tabla 4.1. Producto interno bruto (PIB) para Etiopía, Kenia y Uganda

País	PIB (M USD)	
	2015	2050
Etiopía	61,537.14	895,405.34
Kenia	63,398.04	509,967.86
Uganda	26,369.24	554,923.82

4.2. INMUEBLES

El inventario de inmuebles está conformado por casas, edificios, bodegas, oficinas, entre otras, y de cada uno de ellos se recopiló información de la localización (longitud y latitud), tipo de construcción, número de viviendas por construcción, área total, valor total y nivel de ocupación (The World Bank & ImageCat, 2015).

Cada uno de los inmuebles fue clasificado según su sistema estructural con el objeto de asociarle, más adelante, una función de vulnerabilidad. En la *Tabla 4.2* y en la *Tabla 4.3* se presenta el número total de inmuebles y el porcentaje que representa cada clase con respecto a este último, respectivamente; mientras que de la *Figura 4.2* a la *Figura 4.4* se presentan los porcentajes en forma gráfica.

Tabla 4.2. Número de inmuebles
(The World Bank et al., 2016)

País	Número de inmuebles
Etiopía	12,918,226
Kenia	6,404,215
Uganda	5,300,835

Tabla 4.3. Clases de inmuebles
(The World Bank et al., 2016)

Clase	Descripción	Etiopía	Kenia	Uganda
RC_L	Marcos de concreto reforzado con muros de mampostería no reforzados, baja altura (1-3 niveles)	16.80%	9.88%	15.28%
RC_M	Marcos de concreto reforzado con muros de mampostería no reforzados, mediana altura (4-6 niveles)	0.15%	0.41%	0.03%
RC_H	Marcos de concreto reforzado con muros de mampostería no reforzados, gran altura (≥ 7 niveles)	0.06%	0.02%	-
ADB	Mampostería con adobe no reforzada	3.94%	10.43%	10.42%
BRK	Mampostería con ladrillo no reforzada	7.22%	7.07%	41.97%
STN	Mampostería con piedra no reforzada	7.97%	5.19%	2.46%
CB	Mampostería con bloque de concreto no reforzada	-	4.39%	5.50%
ERTH	Construcción de arcilla/barro	3.70%	7.58%	-
WWD	Construcción de madera y barro	37.49%	35.55%	14.62%
WLI	Construcción liviana de madera	0.99%	-	-
WS	Construcción pesada de madera	12.78%	-	-
INF	Construcción informal	8.90%	0.15%	3.05%
RM_L	Mampostería con bloque de concreto reforzada, baja altura (1-3 niveles)	-	16.95%	-
RM_M	Mampostería con bloque de concreto reforzada, mediana altura (4-7 niveles)	-	0.03%	-
MCF	Mampostería confinada	-	2.35%	6.66%
BTLR	Armaduras de acero	-	-	0.01%

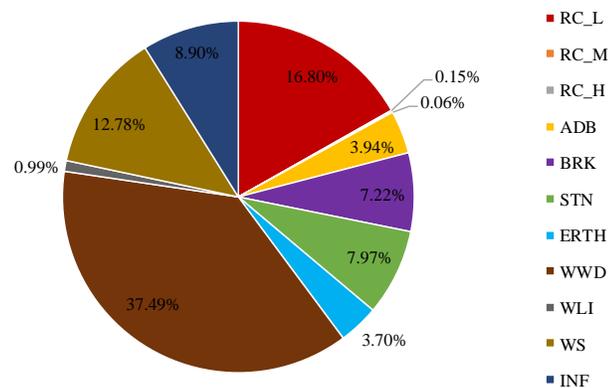


Figura 4.2. Distribución de las clases de inmuebles en Etiopía

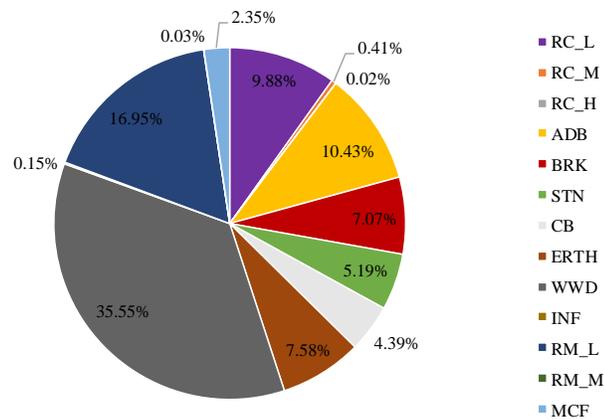


Figura 4.3. Distribución de las clases de inmuebles en Kenia

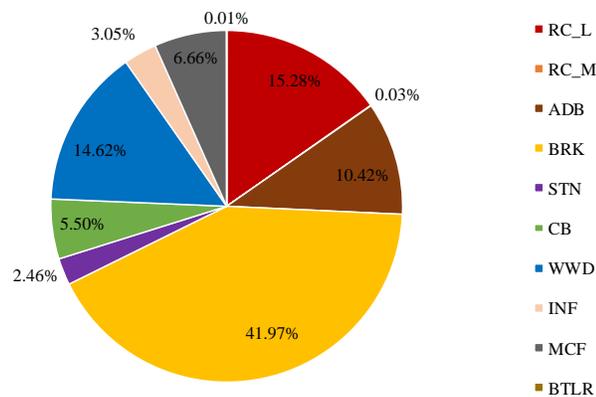


Figura 4.4. Distribución de las clases de inmuebles en Uganda

En Etiopía y Kenia la mayor parte de inmuebles son del tipo WWD (construcción de madera y barro) con proporciones del 37.49% y 35.55%, respectivamente, mientras que en Uganda la mayoría de construcciones son del tipo BRK (mampostería con bloque no reforzada) con un 41.97%. En Etiopía y Kenia, las construcciones con marcos de concreto reforzado de mediana y gran altura (RC_M y RC_H) representan una minoría con respecto a los demás sistemas estructurales, así como las armaduras de acero

(BTLR) y los marcos de concreto reforzado de mediana altura (RC_M) en Uganda. Probablemente, lo anterior sea producto del bajo poder económico de la región lo cual obliga a las poblaciones a utilizar materiales de construcción de bajo costo, los cuales pueden presentar un comportamiento deficiente ante sollicitaciones sísmicas.

Inicialmente, la base de datos estaba definida, al igual que ahora, por una malla con una resolución de 15'' (~0.0042°) en ambas direcciones (longitud y latitud). Dicho nivel de detalle no es el indicado para un estudio a nivel nacional, como lo es éste, ya que las bases de datos resultarían muy densas y presentarían problemas de cómputo al momento de evaluar el riesgo. Adicionalmente, se encontró otro inconveniente en la base de datos, la mayoría de los puntos contenidos en la malla no representaban a un único inmueble, es decir, un punto de la malla podía representar a un grupo de bienes expuestos los cuales podían ser de diferentes tipos constructivos con áreas y costos de reposición variables entre ellos. Por lo tanto, fue necesario realizar una distribución del área construida y el costo de reposición de los inmuebles entre las diferentes clases. Para ello, se utilizó un esquema de pesos ponderados basado en el trabajo realizado por Amo-Oduro, Yepes, & Silva (2015), el cual proporciona información del número promedio de viviendas por edificio, el área promedio por vivienda y el costo de reposición por unidad de área (ver *Tabla 4.4*).

Tabla 4.4. Valores promedio de vivienda y costo de reposición para inmuebles
(Amo-Oduro et al., 2015)

Clase	Número promedio de viviendas por edificio	Área promedio por vivienda	Costo de reposición por unidad de área
RC_L	1.25	50	340
RC_M	3.25	50	340
RC_H	6.00	50	340
ADB	1.25	50	200
BRK	1.25	50	200
STN	1.25	50	200
CB	1.25	50	200
ERTH	1.00	35	140
WWD	1.00	35	140
WLI	1.00	35	140
WS	1.25	35	140
INF	1.00	35	140
RM_L	1.25	50	340
RM_M	3.25	50	340
MCF	1.25	50	340
BTLR	1.00	100	200

A partir de la información anterior, se calculó el área promedio por edificio y el costo de reposición promedio por edificio, así como los pesos ponderados de área y costo de reposición (ver *Eq. (4.1)* y *Tabla 4.5*).

$$\begin{aligned}
 APE &= VPE \times APV & PPA &= \frac{APE(\text{clase})}{\text{Min}(APE)} \\
 CPE &= APE \times CUA & PPC &= \frac{CPE(\text{clase})}{\text{Min}(CPE)}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Donde,

<i>APE</i>	es el área promedio por edificio,
<i>CPE</i>	es el costo de reposición promedio por edificio,
<i>VPE</i>	es el número promedio de viviendas por edificio,
<i>APV</i>	es el área promedio por vivienda,
<i>CUA</i>	es el costo de reposición por unidad de área,
<i>PPA</i>	es el peso ponderado de área, y
<i>PPC</i>	es el peso ponderado de costo de reposición.

Finalmente, se obtuvo una base de datos en la que el área construida y el costo de reposición de los inmuebles estaban distribuidos entre las diferentes clases. Sin embargo, se optó por definir un nuevo nivel de resolución, 0.1° en ambas direcciones (longitud y latitud), con el objeto de condensar la base de datos y evitar problemas en el cálculo del riesgo. En la *Figura 4.5* se presenta la base de datos correspondiente a los inmuebles en los países de Etiopía, Kenia y Uganda para un nivel de resolución de 0.1° en longitud y latitud.

Tabla 4.5. Esquema de pesos ponderados para la distribución de área y costo de reposición de los inmuebles (The World Bank et al., 2016)

Clase	APE	CPE	PPA	PPC
RC_L	62.5	21,250	1.79	4.34
RC_M	162.5	55,250	4.64	11.28
RC_H	300.0	102,000	8.57	20.82
ADB	62.5	12,500	1.79	2.55
BRK	62.5	12,500	1.79	2.55
STN	62.5	12,500	1.79	2.55
CB	62.5	12,500	1.79	2.55
ERTH	35.0	4,900	1.00	1.00
WWD	35.0	4,900	1.00	1.00
WLI	35.0	4,900	1.00	1.00
WS	43.8	6,125	1.25	1.25
INF	35.0	4,900	1.00	1.00
RM_L	62.5	21,250	1.79	4.34
RM_M	162.5	55,250	4.64	11.28
MCF	62.5	21,250	1.79	4.34
BTLR	100.0	20,000	2.86	4.08

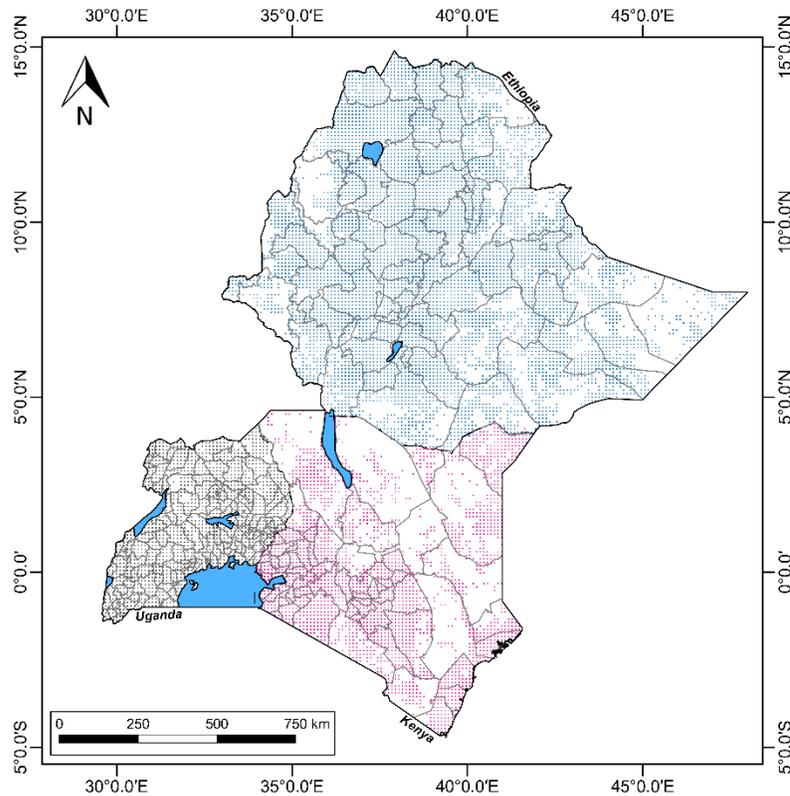


Figura 4.5. Base de datos de inmuebles
(The World Bank et al., 2016)

El costo de reposición y el nivel de ocupación correspondiente al año 2050 se obtuvo a partir de un modelo lineal basado en el crecimiento del PIB de cada país (The World Bank & ImageCat, 2015; The World Bank et al., 2016). Adicionalmente, se tuvieron en cuenta otras bases de datos desarrolladas por O'Neill et al. (2012) y Gridded Population of the World (GPW), las cuales sirvieron para calibrar los resultados obtenidos del modelo. La resolución de la malla y el área construida de los inmuebles se conservaron tal como estaban definidas para el estado actual. En la *Tabla 4.6* se presenta la proyección del costo de reposición para el año 2050.

Tabla 4.6. Proyección al año 2050 del costo total de reposición de los inmuebles
(The World Bank et al., 2016)

País	Costo total de reposición (M USD)	
	2015	2050
Etiopía	311,882	4'808,838
Kenia	538,271	5'874,324
Uganda	563,546	8'759,981

4.3. CENTROS DE SALUD E INSTITUCIONES EDUCATIVAS

La base de datos de centros de salud e instituciones educativas (escuelas y universidades) no se construyó por medio de una malla tal como se procedió con la base de datos de inmuebles. Para este caso, la información recopilada se condensó en los centroides de los polígonos correspondientes al nivel administrativo 2 de cada país (ver *Figura 4.9*). Para cada registro se obtuvo información de tipo de institución (e.g. salud, escuela primaria, universidad), ubicación geográfica, área construida, costo total, costo unitario de reposición y nivel de ocupación (The World Bank & ImageCat, 2015).

Al igual que los inmuebles, los centros de salud y las instituciones educativas se clasificaron de acuerdo a su sistema estructural, sin embargo, se definieron nuevas clases las cuales se presentan de la *Figura 4.6* a la *Figura 4.8*. En la *Tabla 4.7* se presenta el total de activos dentro de la base de datos de centros de salud e instituciones educativas; y en la *Tabla 4.8* se muestra el porcentaje de cada clase respecto al total de cada una de ellas.

Tabla 4.7. Número de centros de salud e instituciones educativas
(The World Bank et al., 2016)

País	Número de activos	
	Centros de salud	Instituciones educativas
Etiopía	15,785	32,930
Kenia	3,443	3,885
Uganda	3,251	18,000

Tabla 4.8. Clases de centros de salud e instituciones educativas
(The World Bank et al., 2016)

Clase	Descripción	Escuelas	Universidades	Hospitales y clínicas
<u>ETIOPÍA</u>				
RC_1	Marcos de concreto reforzado con muros de mampostería, 1 nivel	15%	-	30%
RC_2	Marcos de concreto reforzado con muros de mampostería, 2-3 niveles	10%	30%	10%
RC_4	Marcos de concreto reforzado con muros de mampostería, 4 o más niveles	-	70%	10%
URM	Mampostería no reforzada, 1 nivel	75%	-	50%
<u>KENIA</u>				
RC_1	Marcos de concreto reforzado con muros de mampostería, 1 nivel	20%	-	5%
RC_2	Marcos de concreto reforzado con muros de mampostería, 2-3 niveles	30%	10%	35%
RC_4	Marcos de concreto reforzado con muros de mampostería, 4 o más niveles	-	90%	30%
URM	Mampostería no reforzada, 1 nivel	50%	-	30%
<u>UGANDA</u>				
RC_1	Marcos de concreto reforzado con muros de mampostería, 1 nivel	10%	-	15%
RC_2	Marcos de concreto reforzado con muros de mampostería, 2-3 niveles	5%	40%	10%
RC_4	Marcos de concreto reforzado con muros de mampostería, 4 o más niveles	-	60%	10%
URM	Mampostería no reforzada, 1 nivel	85%	-	65%

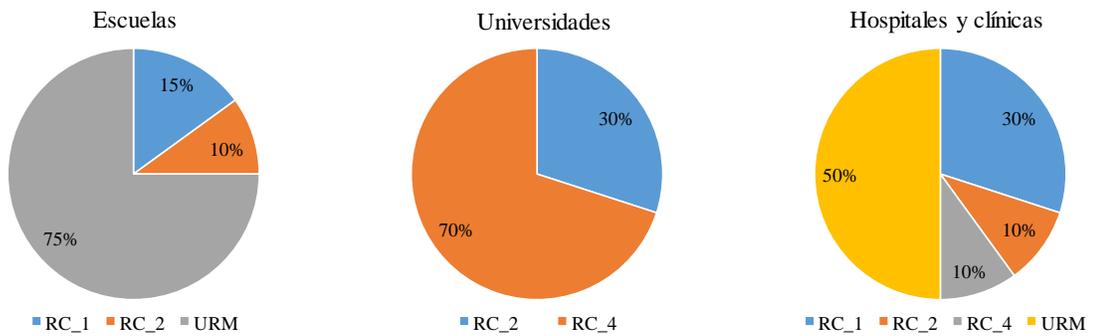


Figura 4.6. Distribución de las clases de centros de salud e instituciones educativas en Etiopía

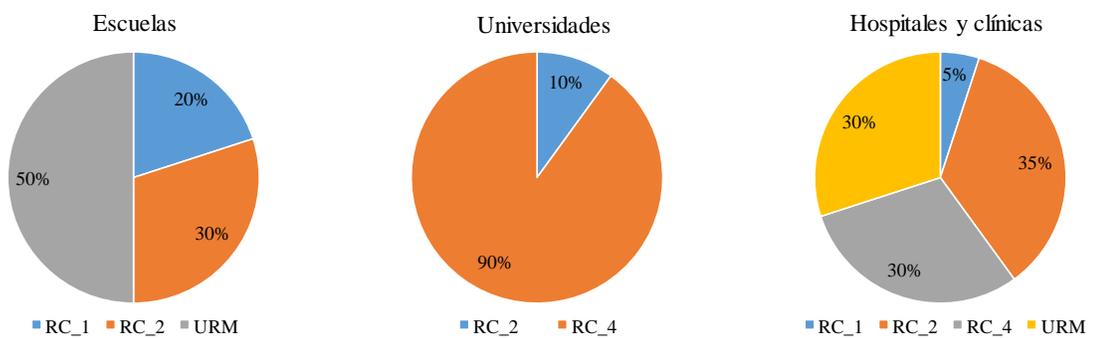


Figura 4.7. Distribución de las clases de centros de salud e instituciones educativas en Kenia

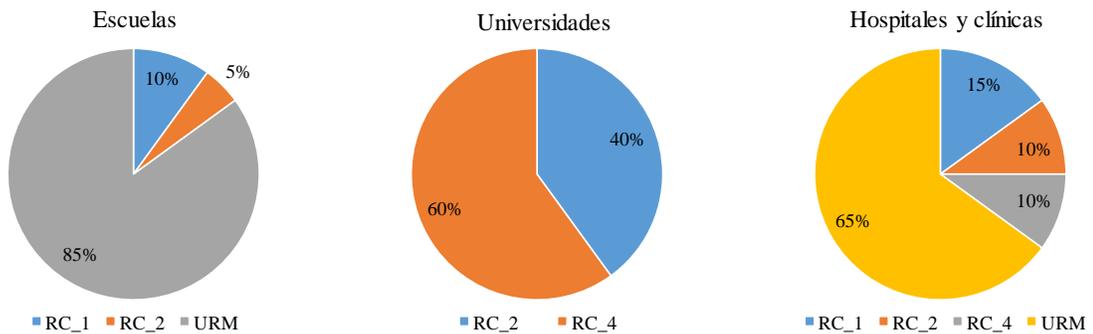


Figura 4.8. Distribución de las clases de centros de salud e instituciones educativas en Uganda

En los tres países se encontró que la mayoría de las escuelas son del tipo URM (mampostería no reforzada), las demás se distribuyen entre edificios de marcos de concreto reforzado con mampostería de 1 a 3 niveles (RC_1 y RC_2). A nivel de universidades, éstas se encuentran distribuidas entre las construcciones de marcos de concreto reforzado con mampostería de 2 niveles o más (RC_2 y RC_4), siendo las más frecuentes aquellas con 4 niveles en adelante (RC_4). Finalmente, las clínicas y hospitales presentan construcciones de todo tipo, lo cual no se observó en las instituciones educativas.

El costo de reposición y el nivel de ocupación para el año 2050 se determinaron siguiendo el mismo procedimiento que se utilizó en la sección 4.2. Los resultados se presentan en la *Tabla 4.9*.

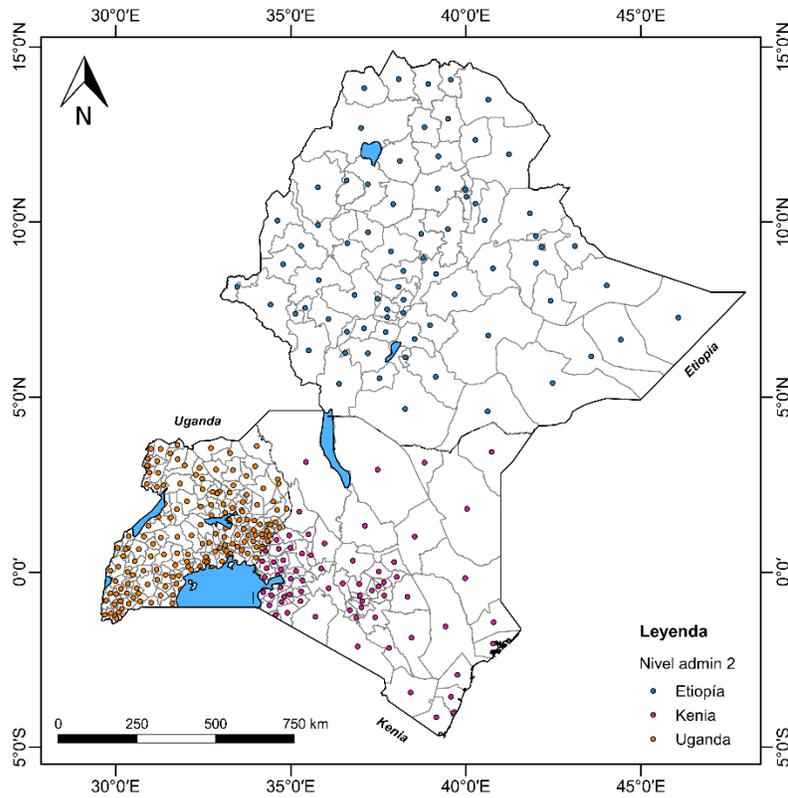


Figura 4.9. Base de datos de centros de salud e instituciones educativas
(The World Bank et al., 2016)

Tabla 4.9. Proyección al año 2050 del costo total de reposición de las instituciones educativas y centros de salud
(The World Bank et al., 2016)

País	Costo total de reposición (M USD)			
	Instituciones educativas		Centros de salud	
	2015	2050	2015	2050
Etiopía	31,676	486,587	9,690	149,111
Kenia	5,731	72,726	2,240	31,367
Uganda	17,393	272,406	2,414	37,036

CAPÍTULO 5

FUNCIONES DE VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad se define como la predisposición de un sistema, elemento, componente, grupo humano o cualquier tipo de elemento, a sufrir afectación ante la acción de una situación de amenaza específica. Como tal, la vulnerabilidad debe evaluarse y asignarse a cada uno de los componentes expuestos y para cada uno de los tipos de amenazas considerados.

La vulnerabilidad estructural se refiere al daño o afectación que sufrirá un activo determinado ante una amenaza dada. Usualmente se mide en términos de un porcentaje medio de daño o valor económico requerido para reparar el bien afectado y llevarlo a un estado equivalente al que tenía antes de la ocurrencia del evento y la incertidumbre asociada. Por otro lado, la vulnerabilidad humana hace referencia al nivel de afectación a los ocupantes de una edificación en términos de número esperado de víctimas, heridos o en general cualquier nivel de afectación que se defina, en función de la intensidad del fenómeno amenazante.

La función de vulnerabilidad define la distribución de probabilidad de las pérdidas como función de la intensidad producida durante un escenario específico. Se define mediante curvas que relacionan el valor esperado del daño y la desviación estándar del daño con la intensidad del fenómeno amenazante.

Las funciones de vulnerabilidad pueden evaluarse mediante diferentes técnicas incluyendo:

- Observaciones del comportamiento de diferentes tipos estructurales ante fenómenos que producen desastres.
- Estudios experimentales de componentes estructurales particulares sometidos a acciones externas que modelan los efectos de las amenazas a considerar.
- Estudios analíticos de componentes estructurales o de estructuras completas particulares sometidos a acciones externas que modelan los efectos de las amenazas a considerar.
- Experiencia acumulada de expertos.

A pesar de que existen algunas propuestas de funciones de vulnerabilidad aplicables a la zona de estudio, se desarrollaron nuevos modelos de fragilidad/vulnerabilidad por diversas razones, dentro de las cuales cabe rescatar:

- Algunos de los modelos existentes son muy simples.
- Se subestima la variabilidad entre los registros, incertidumbre en la capacidad y la variabilidad en el criterio del daño.
- Falta de uniformidad entre las diferentes clases de estructuras.
- No son específicamente desarrolladas para las estructuras presentes en el Sub-Sahara Africano.
- No son aplicables para el tipo de movimiento del suelo de la zona.

Sin embargo, el material existente sirvió para validar y calibrar los resultados obtenidos de los nuevos modelos. Debido a la poca información que se tiene del nivel de daño en las estructuras, se recomendó utilizar modelos analíticos en lugar de modelos empíricos. Por lo general, luego de un terremoto se tiende a estudiar sólo las estructuras que presentan daños, dejando por fuera a las estructuras con daños leves, o cero. Esta situación parcializa los estudios del comportamiento real de las estructuras ante un terremoto y por lo tanto no son aptos para desarrollar modelos de vulnerabilidad.

Inicialmente, se definieron curvas medias de capacidad y coeficientes de variación para cada tipo de estructura. Luego, se creó un portafolio de 100 curvas de capacidad para cada grupo estructural, el cual sirvió como semilla para construir modelos analíticos y analizar su comportamiento bajo la acción de 300 registros de movimiento fuerte del suelo los cuales fueron obtenidos del modelo de amenaza. Tales modelos analíticos consistieron en simplificar cada tipo de estructura a un oscilador de un grado de libertad y obtener su respuesta en términos de desplazamiento espectral, S_d . A partir de estos análisis se derivaron funciones de fragilidad las cuales, posteriormente, se convirtieron en funciones de vulnerabilidad por medio del modelo de daños y pérdidas. Esta metodología considera las más importantes fuentes de incertidumbre, así como la uniformidad a través de las diferentes clases de estructuras. Adicionalmente, utiliza registros del movimiento del suelo extraídos directamente del modelo de amenaza sísmica y acarrea las incertidumbres en cada paso del proceso de cálculo.

De lo anterior, es importante resaltar que las funciones de vulnerabilidad fueron obtenidas por un grupo de trabajo diferente al del presente estudio (The World Bank et al., 2016), lo que se presenta a continuación es una breve descripción de la metodología que llevaron a cabo para llegar a ellas.

5.1. DEFINICIÓN DE LA CURVA DE CAPACIDAD MEDIA

Para cada clase de estructura definida en el *CAPÍTULO 4*, se recolectó información relacionada con el periodo de vibración elástico y de fluencia, la altura de entrepiso, el factor de participación modal, el número de niveles de la edificación y la deriva de entrepiso para los estados de daño de fluencia y colapso total. Con dicha información, se determinó una curva de capacidad media (en términos de aceleración espectral, S_a , versus desplazamiento espectral, S_d) basados en los conceptos de desplazamiento y pérdidas por sismo de Crowley, Pinho, & Bommer (2004).

Para la mayoría de las clases estructurales, la curva de capacidad se calculó asumiendo un comportamiento perfectamente elasto-plástico. Sin embargo, para los marcos de concreto con muros de mampostería, comúnmente conocido como sistema dual, se asumió un modelo trilineal recomendado por Bal, Crowley, & Pinho (2010) con el fin de tener en cuenta la interacción entre los elementos de concreto y la mampostería de los muros. Este modelo trilineal considera la disminución de la resistencia y la rigidez del sistema debido a la falla de los paneles de mampostería confinados entre los elementos viga-columna de los marcos de concreto. En la *Figura 5.1* se muestra un ejemplo del modelo trilineal en el cual se identifican 3 puntos importantes: el primero, ubicado en el pico más alto, corresponde al momento en que los muros de mampostería fluyen; el segundo, a partir del cual la curva de capacidad es constante, está asociado a la fluencia de los marcos de concreto sin la aportación de los muros de mampostería; y finalmente, el tercer punto corresponde al desplazamiento último de la estructura, es decir, el colapso.

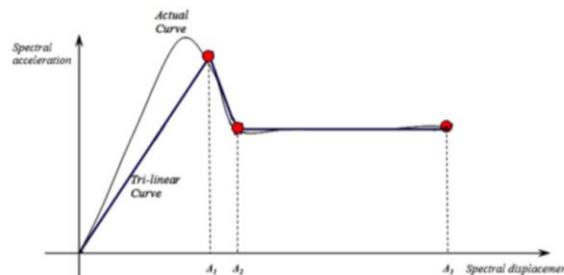


Figura 5.1. Modelo trilineal de curva de capacidad (adaptada de Bal, Crowley, & Pinho, 2010)

A continuación, se presentan las ecuaciones que conforman el modelo trilineal anteriormente expuesto:

$$S_{dy} = \frac{N_s \times h_s \times \theta_s}{\Gamma} \quad (5.1)$$

$$S_{du} = \frac{N_s \times h_s \times \theta_u}{\Gamma} \quad (5.2)$$

$$S_{ay} = \frac{S_{dy}}{g} \times \left(\frac{2\pi}{T_y} \right)^2 = S_{au} \quad (5.3)$$

Donde,

- S_{dy} es el desplazamiento espectral de fluencia,
- S_{du} es el desplazamiento espectral último,
- N_s es el número de niveles de la estructura,
- h_s es la altura de entrepiso,
- θ_y es la distorsión de entrepiso de fluencia,
- θ_u es la distorsión de entrepiso última,
- Γ es el factor de participación modal,
- S_{ay} es la aceleración espectral de fluencia,
- S_{au} es la aceleración espectral última,
- g es la aceleración de la gravedad, y
- T_y es el período de vibración de fluencia.

Debido a la poca información con que se contaba de la región, las curvas de capacidad se definieron a partir de datos recopilados de otros países tales como Pakistán, Perú y Turquía, los cuales presentan similitud en términos de prácticas constructivas y comportamiento estructural. La *Tabla 5.1* presenta las ecuaciones que se utilizaron para calcular periodo y la distorsión de piso de fluencia de cada una de las clases estructurales.

Tabla 5.1. Periodo y distorsión de piso de fluencia

Clase	Periodo de fluencia (s)	Similar a	Referencia
ADB	$0.09(N_s h_s)^{0.75}$	ERTH	Tarque (2008)
BRK	$0.062(N_s h_s)^{0.87}$	URM / CB / RM / MCF	Bal, Crowley, Pinho, & Gulay (2008) - Borzi, Crowley, & Pinho (2008)
STN	$0.0724(N_s h_s)^{0.75}$	-	Ahmad, Crowley, Pinho, & Ali (2011) - Borzi et al. (2008)
WLI	$0.123(N_s h_s)^{0.55}$	TIMB / INF	Camelo (2003) - Goda (2014)
WS	$0.147(N_s h_s)^{0.57}$	-	Ajustado a la información de Uchida et al.
WWD	$0.140(N_s h_s)^{0.55}$	-	Adaptado de WLI
RC	$0.055(N_s h_s)$	-	Muros de mampostería: Bal et al. (2008) - Crowley & Pinho (2006)
	$0.1(N_s h_s)$	-	Marcos de concreto: Bal et al. (2008) - Crowley & Pinho (2006)

Para la clase RC (marcos de concreto con muros de mampostería) se presentan dos ecuaciones de periodo de fluencia, producto de que el modelo trilineal se basa en la interacción de dos modelos independientes,

muros de mampostería y marcos de concreto. Por otro lado, la curva de capacidad para la clase BTLR no se calculó siguiendo esta metodología, se extrajo directamente del programa HAZUS⁴.

En la *Tabla 5.2* se presentan los diferentes parámetros para cada una de las clases estructurales. Para los centros de salud e instituciones educativas a base de concreto reforzado (RC) se tomaron los mismos valores que se definieron para los inmuebles del mismo tipo, con la diferencia que para estos últimos no se hace una distinción del número de pisos (RC-1, RC-2 y RC-4).

Tabla 5.2. Parámetros principales para la definición de curvas de capacidad

Clase	N _s	h _s (m)	T _y (s)	Γ	θ _y	θ _u
ADB / EARTH	1	2.6	0.18	1.3	0.13 %	0.80 %
BRK / CB / URM	1	2.6	0.14	1.3	0.13 %	0.80 %
STN	1	2.6	0.17	1.3	0.16 %	0.88 %
WWD	1	2.4	0.22	1.3	0.26 %	1.20 %
WLI / TMB	1	2.4	0.20	1.0	0.71 %	2.50 %
WS	1	2.4	0.24	1.0	0.50 %	2.00 %
INF	1	2.4	0.20	1.0	0.50 %	1.00 %
RM_L / MCF	1 - 3	2.6	0.14 - 0.37	1.3	0.20 %	0.80 %
RM_M	4 - 6	2.6	0.48 - 0.94	1.3	0.20 %	0.80 %
RC_L (simple ¹)	1 - 3	2.8	0.28 - 0.84	1.0 - 1.3	0.60 %	1.80 %
RC_L (dual ²)			0.17 - 0.50		0.40 %	1.20 %
RC_M (simple ¹)	4 - 6	2.8	1.12 - 1.68	1.33 - 1.36	0.51 %	1.54 %
RC_M (dual ²)			0.67 - 1.01		0.40 %	1.20 %
RC_H (simple ¹)	7 - 8	2.8	1.96 - 2.24	1.37 - 1.38	0.45 %	1.35 %
RC_H (dual ²)			1.18 - 1.34		0.40 %	1.20 %

¹ *Marco simple*: corresponde a marcos de concreto sin muros de mampostería

² *Marco dual*: corresponde a marcos de concreto con muros de mampostería confinada

Con el objeto de definir las curvas de capacidad trilineales para los marcos de concreto con muros de mampostería, primero se debió determinar, de forma independiente, los modelos bilineales de los marcos de concreto con y sin la acción de los muros. Una vez obtenidos dichos modelos, se usaron factores de reducción ($\beta_1 = 0.48$ y $\beta_2 = 0.72$) los cuales representan la disminución de la capacidad de desplazamiento de los marcos de concreto en presencia de elementos más rígidos, en este caso, los muros de mampostería. La *Figura 5.2* muestra un ejemplo de dos modelos bilineales y el resultado de combinar ambos, un modelo trilineal. La forma de combinar los modelos bilineales se presenta en las siguientes ecuaciones (Bal et al., 2010):

$$S_{dy,1} = \beta_1 \times S_{dy, \text{marco simple}} \quad (5.4) \quad S_{dy,2} = S_{dy, \text{marco simple}} \quad (5.5)$$

$$S_{du} = \beta_2 \times S_{du, \text{marco simple}} \quad (5.6) \quad S_{ay,1} = S_{ay, \text{marco dual}} \quad (5.7)$$

$$S_{ay,2} = S_{au} = S_{ay, \text{marco simple}} \quad (5.8)$$

⁴ *Hazus-MH* es una metodología estandarizada y aplicable a nivel nacional, que permite estimar las pérdidas potenciales a raíz de terremotos, huracanes, acción del viento e inundaciones. Permite calcular el impacto de dichas amenazas sobre la infraestructura y la población. Tomado de <https://www.fema.gov/hazus>

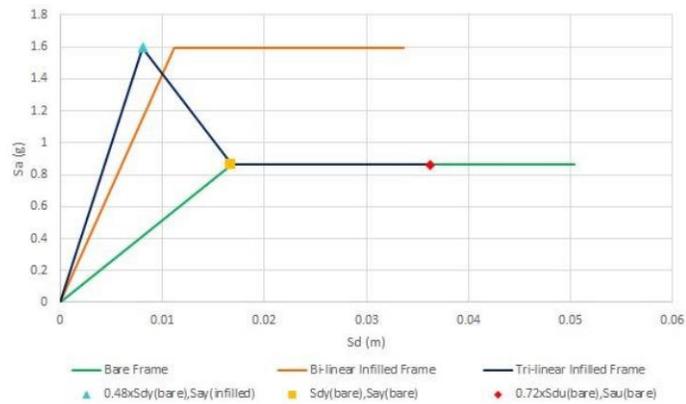


Figura 5.2. Ejemplo de curva de capacidad trilineal (tomada de The World Bank et al., 2016)

En la *Tabla 5.3* y *Tabla 5.4* se presentan los puntos que definen las diferentes curvas de capacidad para cada clase estructural. Adicionalmente, en la *Figura 5.3* y *Figura 5.4* se presentan las curvas de capacidad media correspondientes a cada clase estructural.

Tabla 5.3. Puntos para curva de capacidad de marcos de concreto

Clase	$S_{dy,1}$ (m)	$S_{ay,1}$ (g)	$S_{dy,2}$ (m)	$S_{ay,2}$ (g)	S_{du} (m)	S_{au} (g)
RC - $N_s=1$	0.008	1.597	0.017	0.861	0.036	0.861
RC - $N_s=2$	0.013	0.665	0.028	0.359	0.060	0.359
RC - $N_s=3$	0.019	0.410	0.039	0.221	0.084	0.221
RC - $N_s=4$	0.021	0.301	0.043	0.139	0.094	0.139
RC - $N_s=5$	0.026	0.237	0.053	0.109	0.115	0.109
RC - $N_s=6$	0.031	0.196	0.063	0.091	0.137	0.091
RC - $N_s=7$	0.031	0.167	0.064	0.067	0.139	0.067
RC - $N_s=8$	0.035	0.145	0.073	0.059	0.158	0.059

* N_s : número de niveles

Tabla 5.4. Puntos para curva de capacidad de estructuras distintas a marcos de concreto

Clase	$S_{dy,1}$ (m)	$S_{ay,1}$ (g)	S_{du} (m)	S_{au} (g)
WWD	0.005	0.383	0.022	0.383
WS	0.012	0.825	0.048	0.825
WLI / TIMB	0.017	1.730	0.060	1.730
INF	0.012	1.218	0.024	1.218
ADO / EARTH	0.003	0.308	0.016	0.308
BRK / CB / URM	0.003	0.516	0.016	0.516
STN	0.003	0.445	0.018	0.445
RM / MCF - $N_s=1$	0.004	0.794	0.016	0.794
RM / MCF - $N_s=2$	0.008	0.476	0.032	0.476
RM / MCF - $N_s=3$	0.012	0.352	0.048	0.352
RM - $N_s=4$	0.016	0.285	0.064	0.285
RM - $N_s=5$	0.020	0.241	0.080	0.241
RM - $N_s=6$	0.024	0.110	0.096	0.110
BTLR	0.018	0.450	0.191	0.450

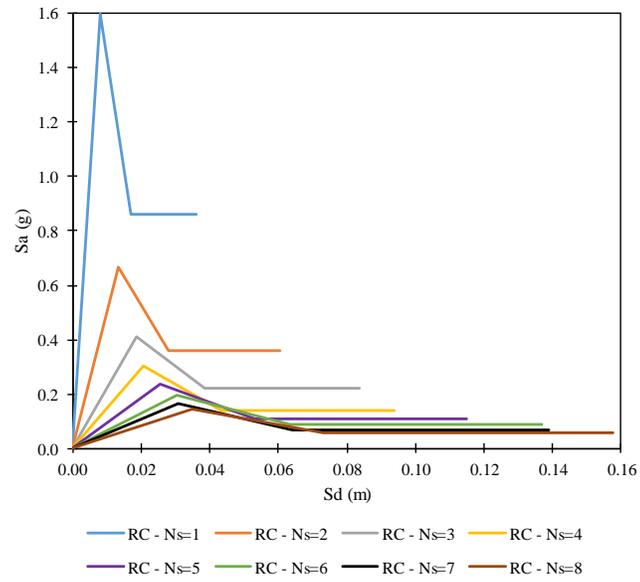
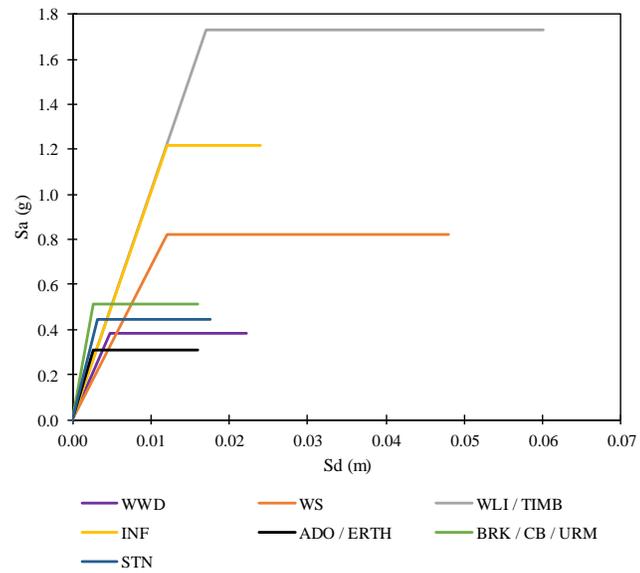
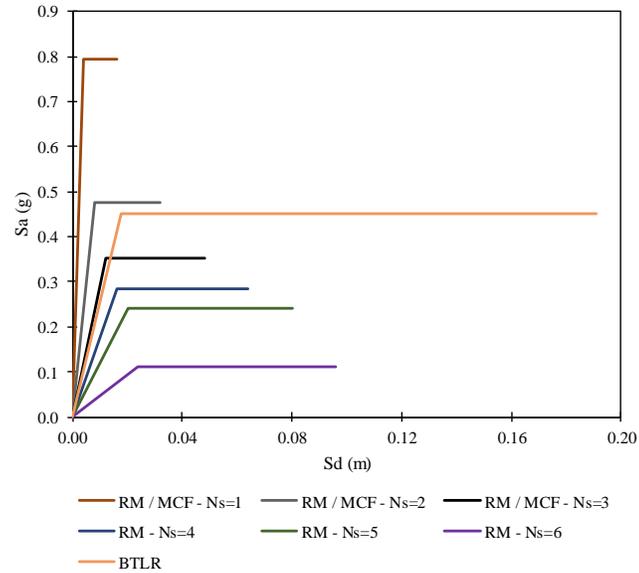


Figura 5.3. Curvas de capacidad media para marcos de concreto (RC)



(a)



(b)

Figura 5.4. Curvas de capacidad media para estructuras distintas a marcos de concreto (RC)

Como bien se ha ido mencionando, las curvas de capacidad desarrolladas hasta ahora se consideran como el valor medio de las mismas. Sin embargo, con el objeto de considerar la variabilidad de estructura a estructura, es necesario introducir una medida de la dispersión de los datos. Para ello, se tomaron los coeficientes de variación propuestos por Borzi et al. (2008) y Silva, Crowley, Varum, Pinho, & Sousa (2014), con los que se realizaron simulaciones de Monte Carlo para constituir, por cada clase estructural, un portafolio de curvas de capacidad que garantizara la propagación de la variabilidad presente. Para cada una de estas clases, se generaron 100 curvas de capacidad basadas en las recomendaciones de Silva et al. (2014) las cuales apuntan a que se logre una convergencia estadística dentro de un 5% de tolerancia. La *Figura 5.5* presenta un ejemplo de portafolio para una estructura a base de marcos de concreto con muros de mampostería de 3 niveles.

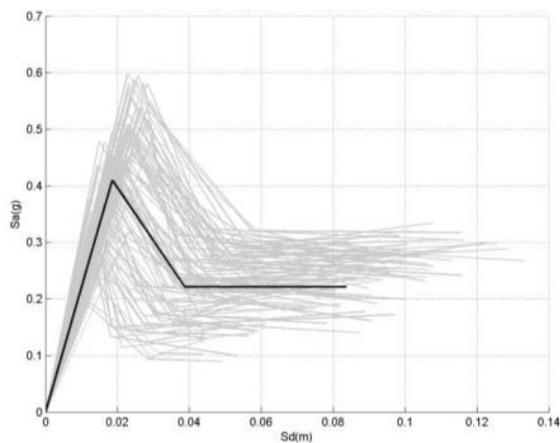


Figura 5.5. Portafolio de curvas de capacidad para una estructura a base de marcos de concreto con muros de mampostería y 3 niveles

5.2. CRITERIOS DE DAÑO

Para relacionar un nivel de daño a una estructura, la cual fue sometida a un movimiento, se debe seleccionar una unidad de respuesta estructural que esté directamente relacionada con la medida de intensidad seleccionada, que en este caso es aceleración espectral, S_a (ver sección 3.4). Basado en lo anterior y en la metodología seleccionada para encontrar la respuesta no lineal de cada estructura (ver sección 5.3), se seleccionó el desplazamiento espectral, S_d , de un oscilador de un grado de libertad (el cual es la simplificación de cada estructura) como parámetro para ubicar cada una de las mismas en los diferentes niveles de daño.

Se definieron 5 estados de daño: cero, leve, moderado, alto y colapso. Por lo tanto, es necesario establecer 4 valores de desplazamiento espectral para definir los límites entre los estados de daños consecutivos.

Con excepción de los marcos de concreto con muros de mampostería, las demás estructuras poseen curvas de capacidad media definidas por dos puntos, la fluencia y el colapso. Respecto a los marcos de concreto, éstos presentan dos puntos de fluencia, el primero corresponde a la fluencia de los muros de mampostería, mientras que el segundo representa la fluencia de los marcos de concreto sin considerar el aporte de los muros. El límite entre el daño cero y el daño leve se definió como el 75% del desplazamiento de fluencia - para los marcos de concreto corresponde al primer punto de fluencia - (Lagomarsino & Giovinazzi, 2006). El desplazamiento de fluencia se estableció como el límite entre el daño leve y moderado (Özcebe, 2011). El comienzo del daño alto se determinó como $0.75S_{dy} + 0.25S_{du}$ (Akkar, Sucuoglu, & Yakut, 2005; Borzi et al., 2008; Silva, Crowley, Varum, Pinho, & Sousa, 2015) y el colapso se asumió igual al desplazamiento último.

En la *Figura 5.6* y *Figura 5.7* se presenta un ejemplo de niveles de daño para construcción pesada de madera y marcos de concreto con muros de mampostería de 3 niveles de entrepiso, respectivamente.

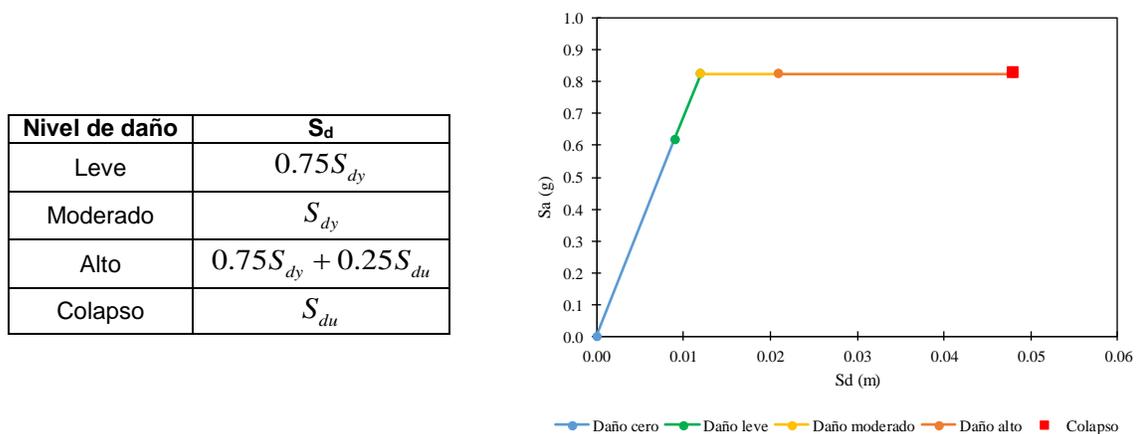


Figura 5.6. Niveles de daño para construcción pesada de madera

Nivel de daño	S_d
Leve	$0.75S_{dy}$
Moderado	S_{dy}
Alto	$0.75S_{dy} + 0.25S_{du}$
Colapso	S_{du}

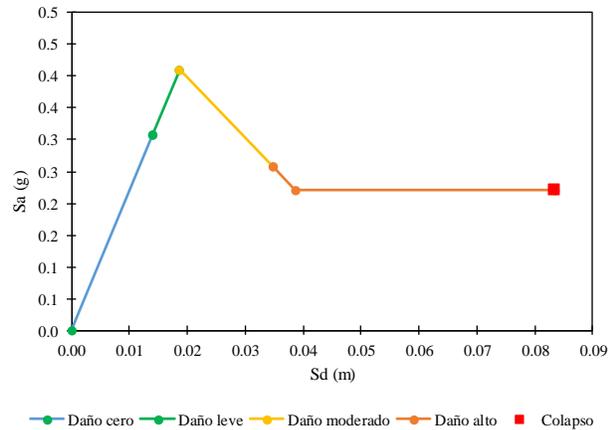


Figura 5.7. Niveles de daño para marcos de concreto con muros de mampostería y 3 niveles de entrepiso

5.3. EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL

La respuesta estructural de cada clase se determinó a través del análisis dinámico no lineal de 100 sistemas estructurales (ver Figura 5.5), cada uno representado por un oscilador de un grado de libertad. La masa y la rigidez de cada uno de estos osciladores se definieron de acuerdo al material y a las propiedades geométricas y dinámicas que han sido mencionadas en las secciones anteriores.

Por otro lado, para desarrollar el modelo de histéresis se basó en la curva de capacidad de cada tipo de estructura. Luego, se desarrollaron análisis tiempo-historia no lineales considerando los 300 registros de movimiento fuerte del suelo obtenidos del modelo de amenaza. El análisis dinámico se llevó a cabo en el programa OpenSees (McKenna, Fenves, & Scott, 2000). En la Figura 5.8 se presentan las curvas de capacidad, así como los resultados de desplazamiento vs aceleración de un análisis tiempo-historia de dos diferentes estructuras de marcos de concreto con muros de mampostería, ambos sometidos al mismo registro de movimiento del suelo. La estructura representada por la figura de la izquierda sólo se deformó dentro del rango elástico, mientras que la estructura de la figura derecha alcanzó altos niveles de daño ya que sobrepasó el punto de fluencia, dejando deformaciones permanentes en ella misma.

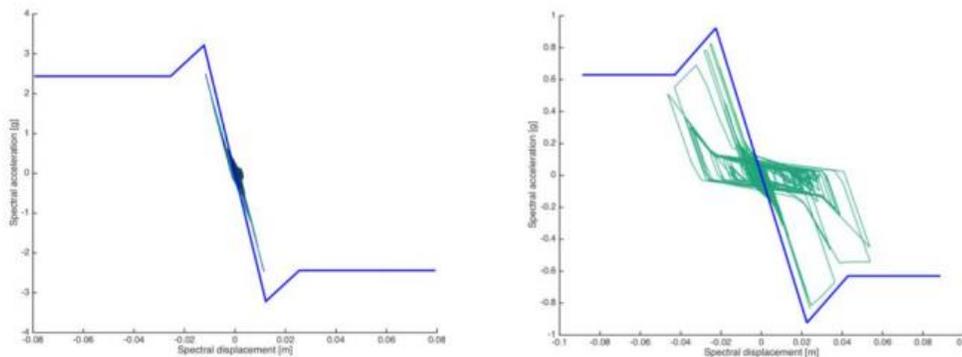


Figura 5.8. Curvas de capacidad y resultado de desplazamiento vs aceleración de un análisis tiempo-historia de dos estructuras de marcos de concreto con muros de mampostería sometidos al mismo registro de movimiento

Después de realizar todos los análisis para cada una de las clases estructurales, se construyó una matriz de probabilidad de daño, la cual establece la probabilidad de que, dado que se presentó una demanda sísmica, o movimiento del suelo, la estructura se encuentre exactamente en un nivel de daño. Una matriz de probabilidad de daño, suponiendo que se tienen N estados de daño y 4 niveles de demanda, tiene la siguiente estructura:

Tabla 5.5. Estructura de matriz de probabilidad de daño para N estados de daño y 4 niveles de demanda

		Demanda			
		S1	S2	S3	S4
Estado de daño	0	Pr (ED=0) S1	Pr (ED=0) S2	Pr (ED=0) S3	Pr (ED=0) S4
	1	Pr (ED=1) S1	Pr (ED=1) S2	Pr (ED=1) S3	Pr (ED=1) S4
	2	Pr (ED=2) S1	Pr (ED=2) S2	Pr (ED=2) S3	Pr (ED=2) S4
	3	Pr (ED=3) S1	Pr (ED=3) S2	Pr (ED=3) S3	Pr (ED=3) S4

	N	Pr (ED=N) S1	Pr (ED=N) S2	Pr (ED=N) S3	Pr (ED=N) S4

Adicionalmente, a cada uno de los registros de movimiento del suelo se le asignó una medida y un nivel de intensidad, los cuales se seleccionaron basados en las propiedades dinámicas de cada estructura. La medida de intensidad seleccionada fue la aceleración espectral, S_a , y se definieron 4 niveles: S_a (T=0.2 s), S_a (T=0.3 s), S_a (T=0.5 s) y S_a (T=1.0 s).

5.4. FUNCIONES DE FRAGILIDAD

En términos generales, las curvas de fragilidad estipulan cuánto vale la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño como función de cierto parámetro de la demanda sísmica, en este caso, la aceleración espectral, S_a .

Suponiendo que existen N estados de daño, identificados como ED_i donde $i=0,1,2,\dots,N$, las curvas de fragilidad que estipulan la probabilidad de que se alcance o exceda el i -ésimo estado de daño, dado que se presentó una demanda sísmica, s , puede ser calculada con la ayuda de una función de fragilidad:

$$\Pr(\text{alcanzar o exceder el } ED_i | s) = f_i(s; \theta_i) \quad (5.9)$$

donde θ_i es un vector de parámetros de la función de fragilidad $f_i(\cdot)$.

Puesto que se trata de estados de daño discretos, es posible calcular la probabilidad de estar exactamente en el estado de daño i con la siguiente expresión:

$$\Pr(\text{estar exactamente en el estado de daño } i | s) = f_{i+1}(s; \theta_{i+1}) - f_i(s; \theta_i) \quad (5.10)$$

Por convención se admite que el estado de daño cero corresponde a la total ausencia de daños y que la probabilidad de alcanzarlo o excederlo, dado cualquier valor de intensidad, es igual a 1. Se admite también que el N -ésimo estado de daño corresponde al colapso y que la probabilidad de estar en un estado de daño superior es nula.

A partir de la matriz de probabilidad definida en la sección 5.3, se pudieron encontrar parámetros estadísticos (mediana y desviación estándar lognormal) para construir las funciones lognormales de probabilidad acumulada asociadas a cada clase estructural. Dado un nivel de demanda S , se puede determinar la probabilidad de excedencia de un estado de daño i :

$$\Pr(ED \geq i | S) = \Phi\left(\frac{1}{\beta_i} \ln \frac{S}{m_i}\right) \tag{5.11}$$

Donde,

- m_i es la mediana del estado de daño i ,
- β_i es la desviación estándar lognormal del estado de daño i , y
- $\Phi(\cdot)$ es la distribución normal estándar con media cero y desviación estándar uno.

En la *Figura 5.9* se presentan las curvas de fragilidad para las estructuras de mampostería con piedra no reforzada (STN). Además, en la *Tabla 5.6* y *Tabla 5.7* se presentan los parámetros estadísticos que definen las curvas de fragilidad de todas las clases estructurales.

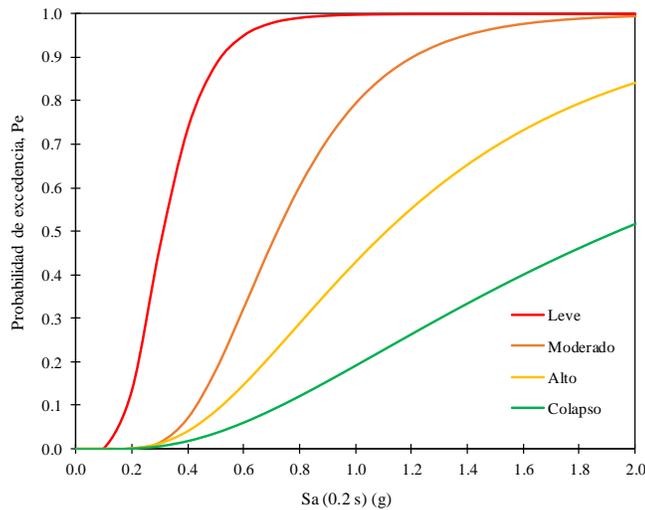


Figura 5.9. Curvas de fragilidad para mampostería con piedra no reforzada (STN)

Tabla 5.6. Parámetros estadísticos para curvas de fragilidad asociadas a estructuras con múltiples niveles: mediana (m) y desviación estándar lognormal (β)

Tipo de estructura	Medida de intensidad, IM	Estado de daño							
		Leve		Moderado		Alto		Colapso	
		m	β	m	β	m	β	m	β
RC (Ns=1)	Sa (T=0.3 s)	1.02	0.71	2.83	0.57	3.02	0.47	3.31	0.40
RC (Ns=2)		0.53	0.29	1.26	0.38	1.58	0.43	2.23	0.51
RC (Ns=3)		0.48	0.42	1.14	0.52	1.44	0.56	2.02	0.59
RM (Ns=1)		0.45	0.66	1.10	0.64	1.51	0.61	2.00	0.50
RM (Ns=2)		0.34	0.34	0.88	0.35	1.18	0.39	1.80	0.49
RM (Ns=3)		0.34	0.33	0.84	0.45	1.11	0.50	1.62	0.58
RC (Ns=4)	Sa (T=0.5 s)	0.28	0.31	0.63	0.37	0.80	0.41	1.15	0.46
RC (Ns=5)		0.26	0.42	0.60	0.43	0.78	0.48	1.14	0.55
RC (Ns=6)		0.27	0.44	0.62	0.45	0.80	0.50	1.13	0.54
RM (Ns=4)		0.22	0.29	0.56	0.31	0.79	0.40	1.17	0.49
RM (Ns=5)		0.23	0.36	0.55	0.38	0.74	0.41	1.08	0.47
RM (Ns=6)		0.19	0.46	0.46	0.48	0.64	0.55	0.94	0.59
RC (Ns=7)	Sa (T=1.0 s)	0.11	0.38	0.29	0.36	0.39	0.43	0.61	0.54
RC (Ns=8)		0.11	0.39	0.28	0.47	0.38	0.53	0.61	0.68

Tabla 5.7. Parámetros estadísticos para curvas de fragilidad asociadas a estructuras de un nivel: mediana (m) y desviación estándar lognormal (β)

Tipo de estructura	Medida de intensidad, IM	Estado de daño							
		Leve		Moderado		Alto		Colapso	
		m	β	m	β	m	β	m	β
WWD	Sa (T=0.2 s)	0.28	0.39	0.70	0.53	1.07	0.66	1.84	0.79
WS	Sa (T=0.2 s)	0.60	0.46	2.77	0.81	4.80	0.91	8.80	1.02
WLI	Sa (T=0.2 s)	1.31	0.38	4.09	0.42	11.42	0.60	16.20	0.16
INF	Sa (T=0.2 s)	0.84	0.32	1.73	0.43	2.44	0.55	3.80	0.67
ADB / EARTH	Sa (T=0.2 s)	0.21	0.30	0.54	0.41	0.77	0.57	1.26	0.73
BRK / CB	Sa (T=0.2 s)	0.36	0.43	0.81	0.35	1.21	0.51	2.14	0.68
STN	Sa (T=0.2 s)	0.31	0.40	0.72	0.40	1.11	0.59	1.94	0.76
BTLR	Sa (T=0.5 s)	0.27	0.41	1.02	0.42	1.41	0.40	1.96	0.37

5.5. MODELO DE DAÑOS Y PÉRDIDAS

Hasta ahora, las curvas de fragilidad y las matrices de probabilidad de daño no permiten calcular pérdidas económicas. En efecto, aunque se sabe cuál es la probabilidad de alcanzar cierto estado de daño dado que la demanda tuvo un valor conocido, no se sabe cuál será el costo monetario de haber alcanzado tal estado de daño.

Sin embargo, se puede asociar un valor monetario (o un rango de valores monetarios) a un estado de daño, calculando, por ejemplo, cuánto costaría restituir a la estructura a sus condiciones originales después de que alcanzó cierto estado de daño. Para ello, se utilizó un modelo de daños y pérdidas que convierte cada grupo de funciones de fragilidad en funciones de vulnerabilidad. Dicho modelo proporciona el índice de pérdida en función del estado de daño de cada estructura, el cual representa la relación entre el costo de reparación y el costo total del inmueble. Sin embargo, tales modelos no se encuentran disponibles para la zona de interés, por lo que fue necesario combinar modelos existentes de otras regiones para definir un modelo aplicable a las construcciones en estudio.

Como aproximaciones iniciales se tomaron modelos desarrollados para Grecia (Kappos, Panagopoulos, Panagiotopoulos, & Penelis, 2006), Turquía (Bal et al., 2008), Italia (Di Pasquale & Goretti, 2001) y Estados Unidos (FEMA-443, 2003), los cuales se presentan en la *Figura 5.10*. El modelo de Turquía, particularmente, no puede ser aplicado a la región africana ya que dicho país, por ley, obliga a los propietarios a demoler sus inmuebles si presentan un alto daño, descartando así la posibilidad de entrar a repararlo. Por otro lado, la gran diferencia en las prácticas constructivas entre los Estados Unidos (y en particular California, lugar en el cual se desarrolló el modelo previamente mencionado) y el Sub-Sahara Africano es suficiente para descartar la posible aplicación de dicho modelo en la región. Sin embargo, los modelos de Grecia e Italia sí presentan similitudes con las construcciones en Etiopía, Kenia y Uganda, por lo tanto, se realizó una combinación de ambas propuestas obteniendo de esta manera un modelo de daños y pérdidas aplicable a las construcciones en estudio. En la *Figura 5.11* se presenta el resumen del modelo final:

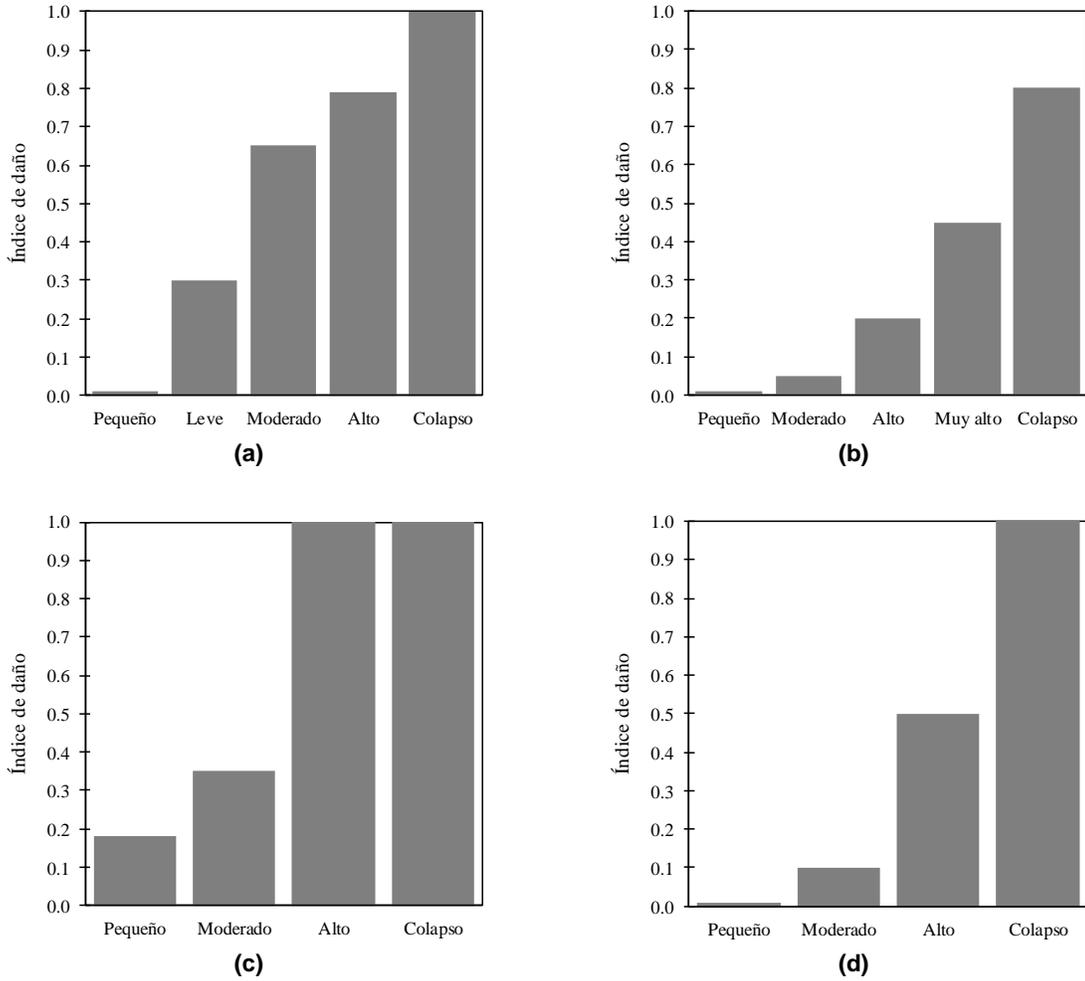


Figura 5.10. Modelos de daños y pérdidas: a) Italia (Di Pasquale & Goretti, 2001); b) Grecia (Kappos et al., 2006); c) Turquía (Bal et al., 2008); d) California - Estados Unidos - (FEMA-443, 2003)

Estado de daño	Índice de daño (medio)
Leve	0.05
Moderado	0.25
Alto	0.60
Colapso	1.00

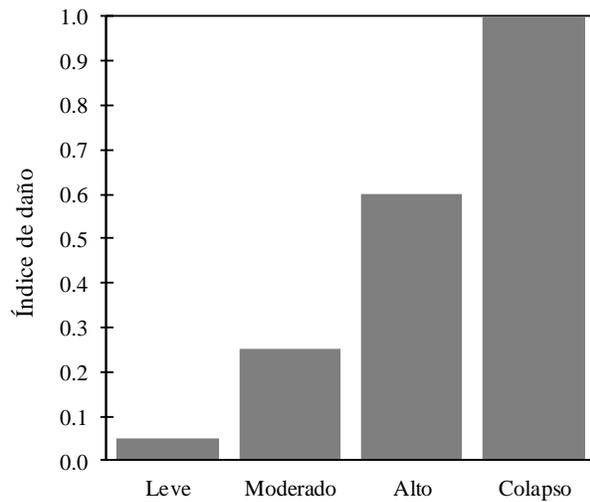


Figura 5.11. Modelo de daños y pérdidas económicas

5.6. CONSTRUCCIÓN DE LAS FUNCIONES DE VULNERABILIDAD

Para construir una función de vulnerabilidad se debe contar con lo necesario para asociar un valor monetario, que en este caso se denominará pérdida, L_i , a un estado de daño ED_i . En otras palabras, cada vez que la estructura entre al estado de daño i , su dueño tendrá que pagar la cantidad L_i . Teniendo en cuenta que en las secciones anteriores ya se definieron las funciones de fragilidad y el modelo de daños y pérdidas, es posible calcular momentos estadísticos de la pérdida para valores de demanda conocidos. Por medio de la ecuación (5.12), se pueden calcular los dos primeros momentos estadísticos, $k=1$ y $k=2$, los cuales representan el valor esperado y la desviación estándar de la pérdida, respectivamente. Adicionalmente, en la *Figura 5.12* se presenta un ejemplo gráfico de cómo se combinan las funciones de fragilidad junto con el modelo de daños y pérdidas para obtener las funciones de vulnerabilidad.

$$E(L^k | S) = \sum_{i=0}^N L_i^k \Pr(ED = i | S) \tag{5.12}$$

Donde,

- L_i es la pérdida monetaria asociada al estado de daño i ,
- S es la demanda sísmica,
- N es el número de estados de daño, y
- k es el valor esperado ($k=1$) o la desviación estándar ($k=2$) de la pérdida.

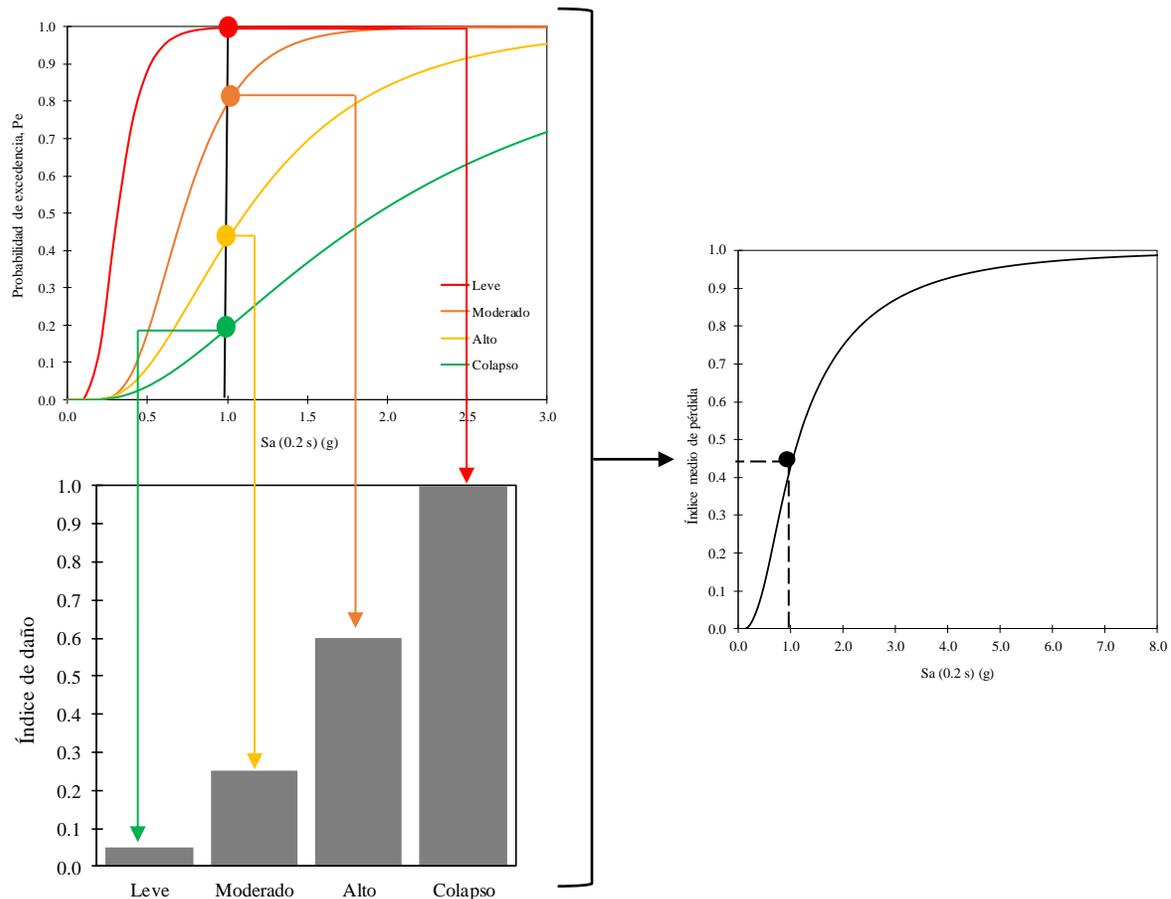
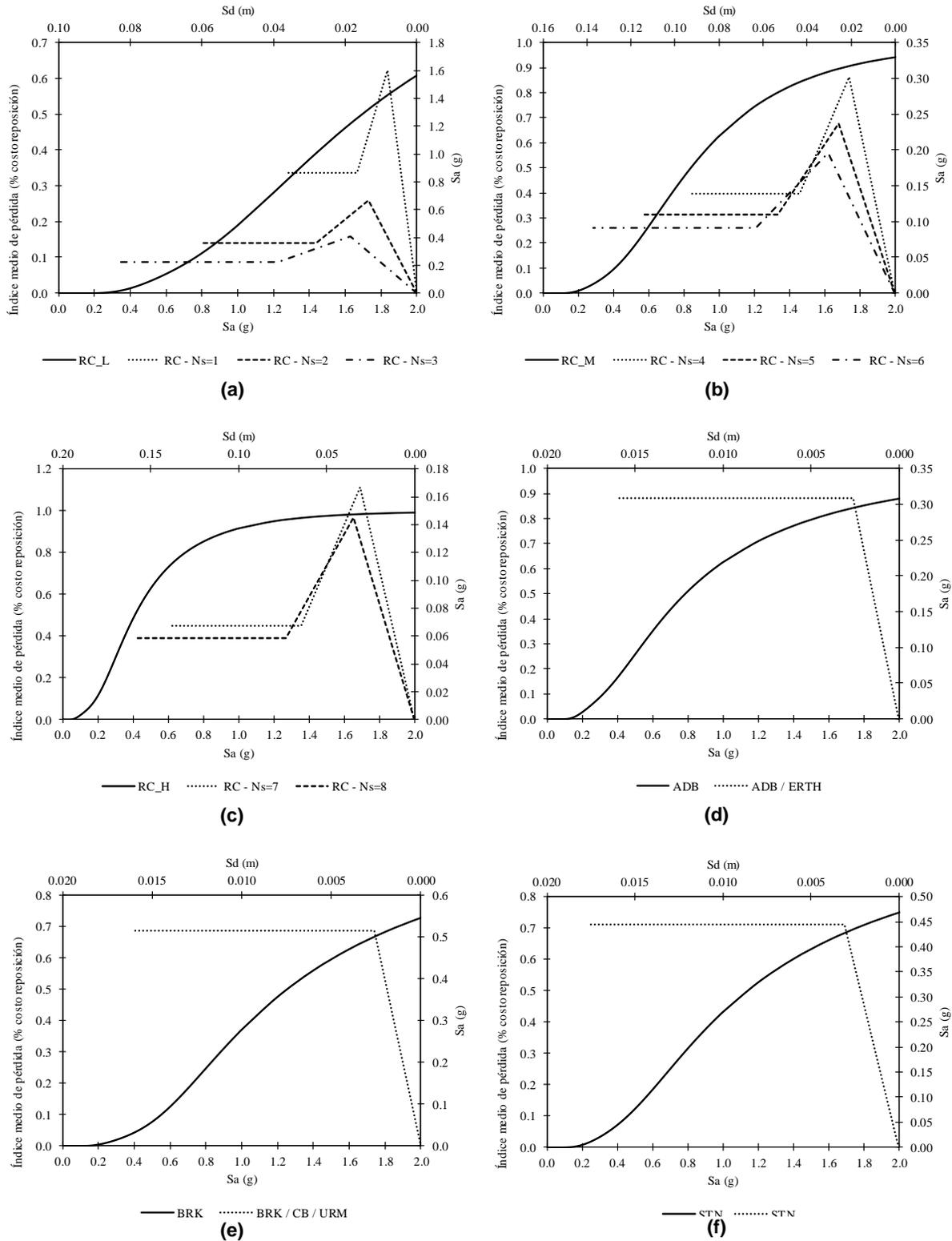
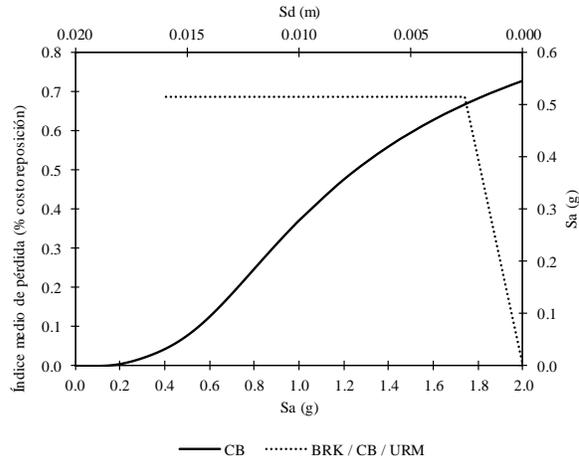


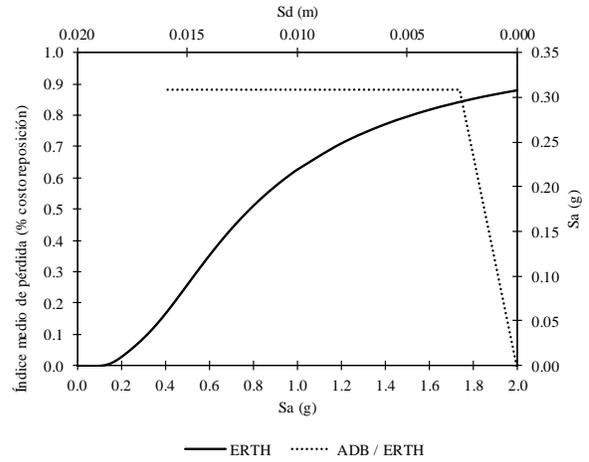
Figura 5.12. Función de vulnerabilidad para STN a partir de función de fragilidad y modelo de daños y pérdidas

Siguiendo la misma metodología, se obtuvieron las funciones de vulnerabilidad (valor esperado de la pérdida en términos de % del costo de reposición) para cada una de las clases estructurales y éstas se presentan en la *Figura 5.13* y en la *Figura 5.14*. También se incluyeron las curvas de capacidad media.

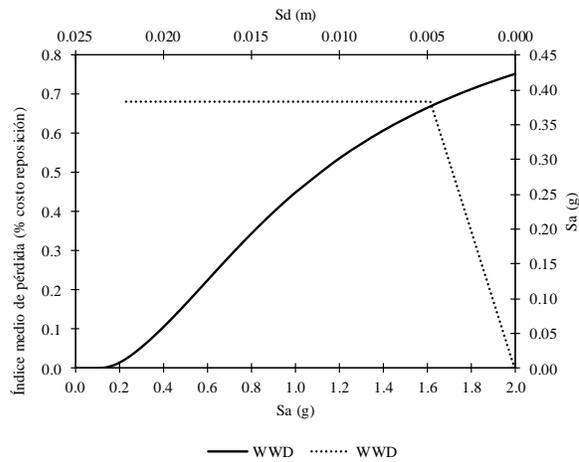




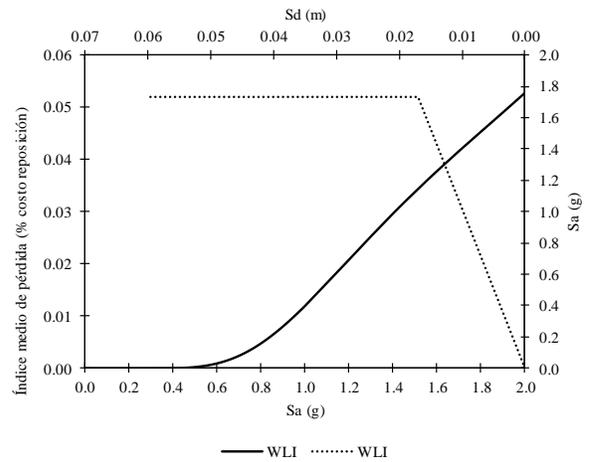
(g)



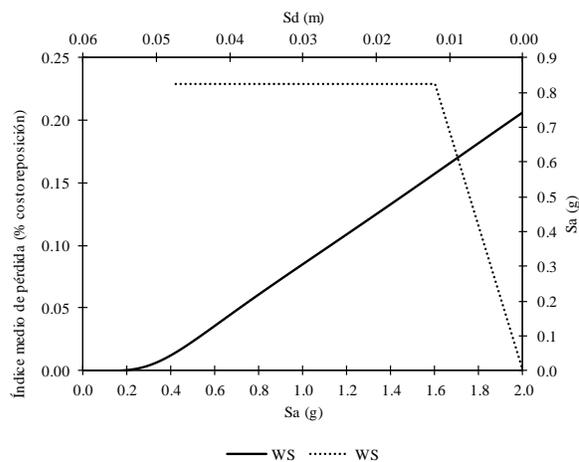
(h)



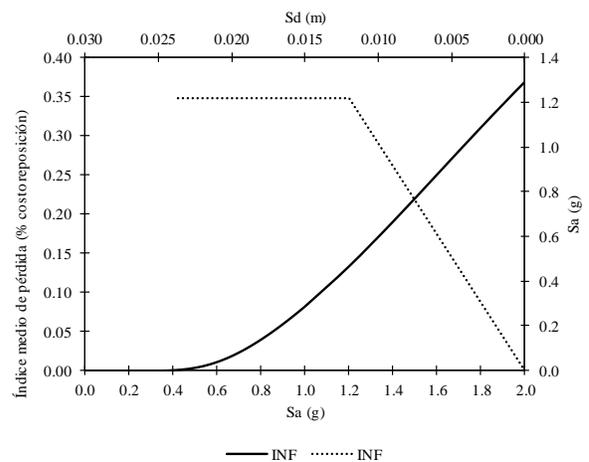
(i)



(j)



(k)



(l)

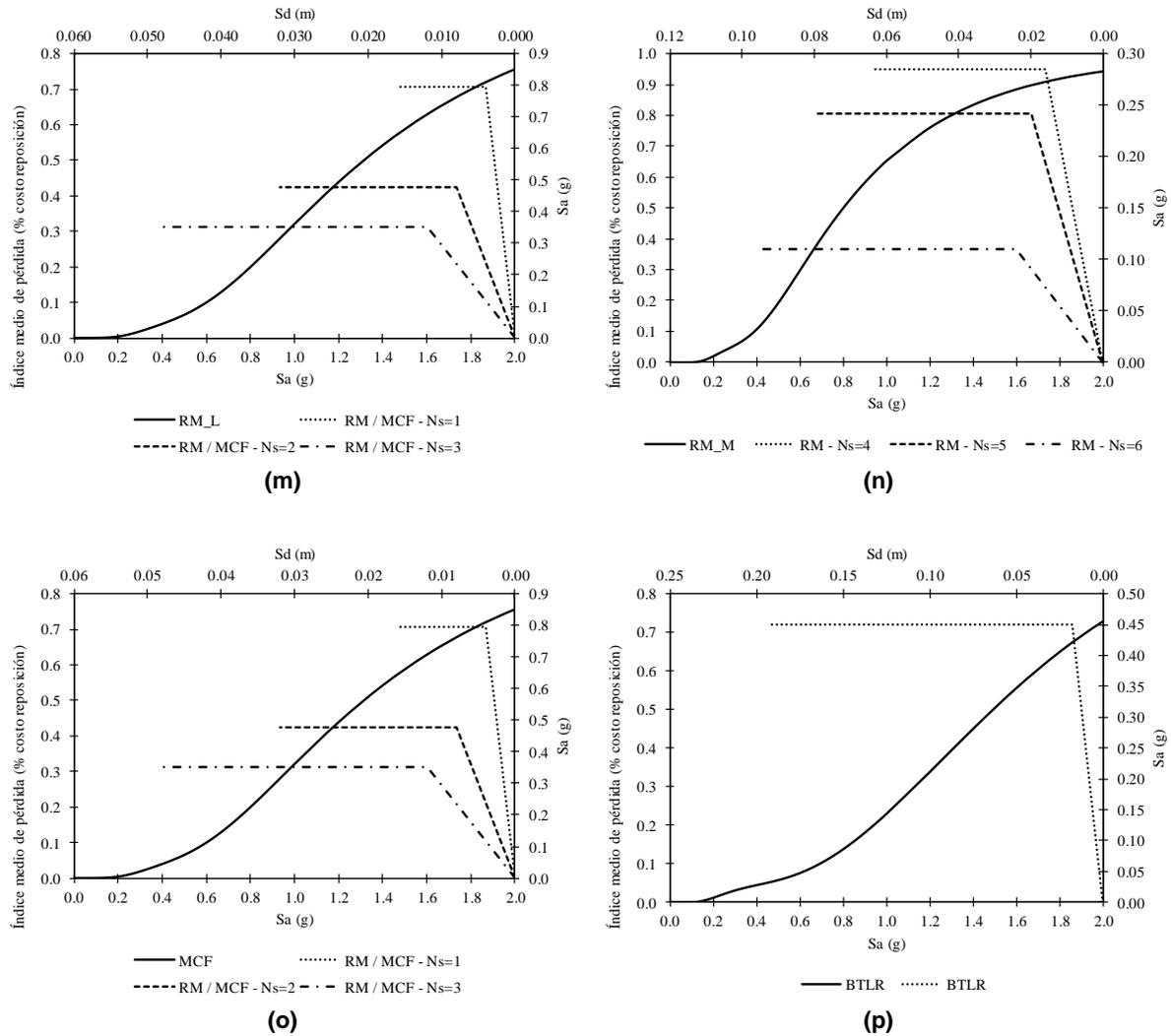


Figura 5.13. Funciones de vulnerabilidad para inmuebles (valor esperado de la pérdida en términos de porcentaje del costo de reposición)

Línea continua: vulnerabilidad; y línea(s) punteada(s): capacidad

a) RC-L; b) RC-M; c) RC-H; d) ADB; e) BRK; f) STN; g) CB; h) EARTH; i) WWD; j) WLI; k) WS; l) INF; m) RM_L; n) RM_M; o) MCF; p) BTLR

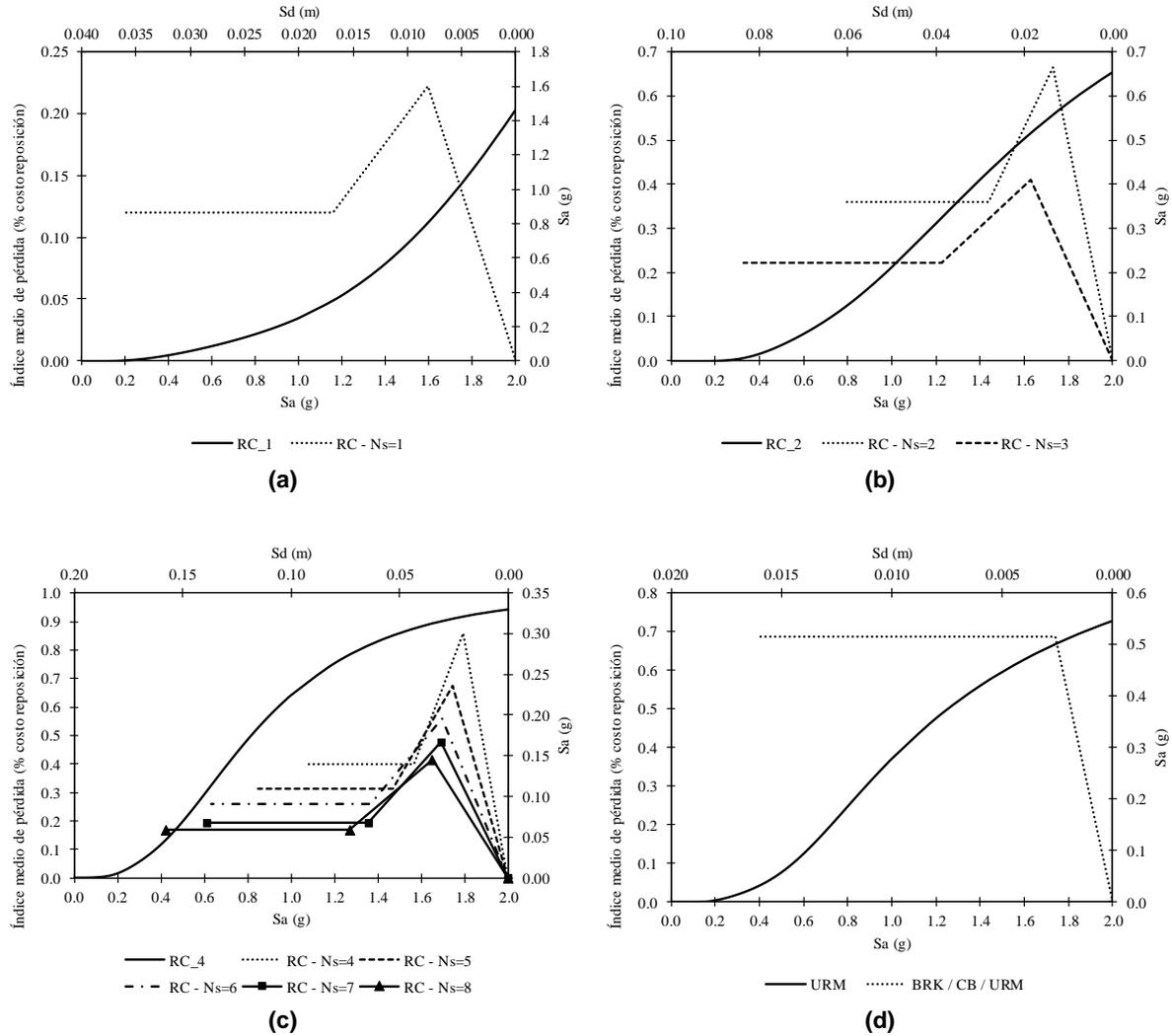


Figura 5.14. Funciones de vulnerabilidad para centros de salud e instituciones educativas (valor esperado de la pérdida en términos de porcentaje del costo de reposición)
 Línea continua: vulnerabilidad; y línea(s) punteada(s): capacidad
 a) RC_1; b) RC_2; c) RC_3; d) URM

De igual forma, se obtuvieron las funciones asociadas a la desviación estándar de la pérdida (ver *Figura 5.16*).

De los resultados obtenidos, vale la pena resaltar la función de vulnerabilidad (valor esperado de la pérdida) asociada a las estructuras del tipo WLI (construcción liviana de madera) y WS (construcción pesada de madera). Mientras que las demás estructuras ya presentan altos índices de pérdida ante una demanda sísmica de 8.0 g, las construcciones de madera WLI y WS apenas llegan a 0.6, lo cual significa que la aceleración espectral, para la que se presenta la pérdida total del inmueble (índice de pérdida igual a 1.0), es mucho mayor a 8.0 g. Esto también se ve reflejado en la función correspondiente a su desviación estándar, donde la incertidumbre, para el nivel de demanda 8.0 g, es bastante alto, mientras que las demás estructuras presentan un valor muy cercano a cero. Lo anterior, es producto de que la mayor incertidumbre se presenta en los valores medios del índice de pérdida, mientras que, para los valores bajos (cerca de cero) y los valores altos (cerca de 1.0) se tiene la certeza que la estructura no ha

presentado daños y ha llegado al colapso, respectivamente. En la *Figura 5.15* se presenta una esquematización de lo expuesto.

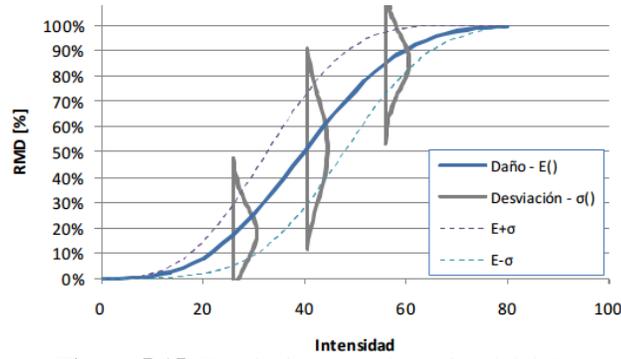


Figura 5.15. Desviación estándar típica del daño (tomada de ERN Latinoamérica, 2005d)

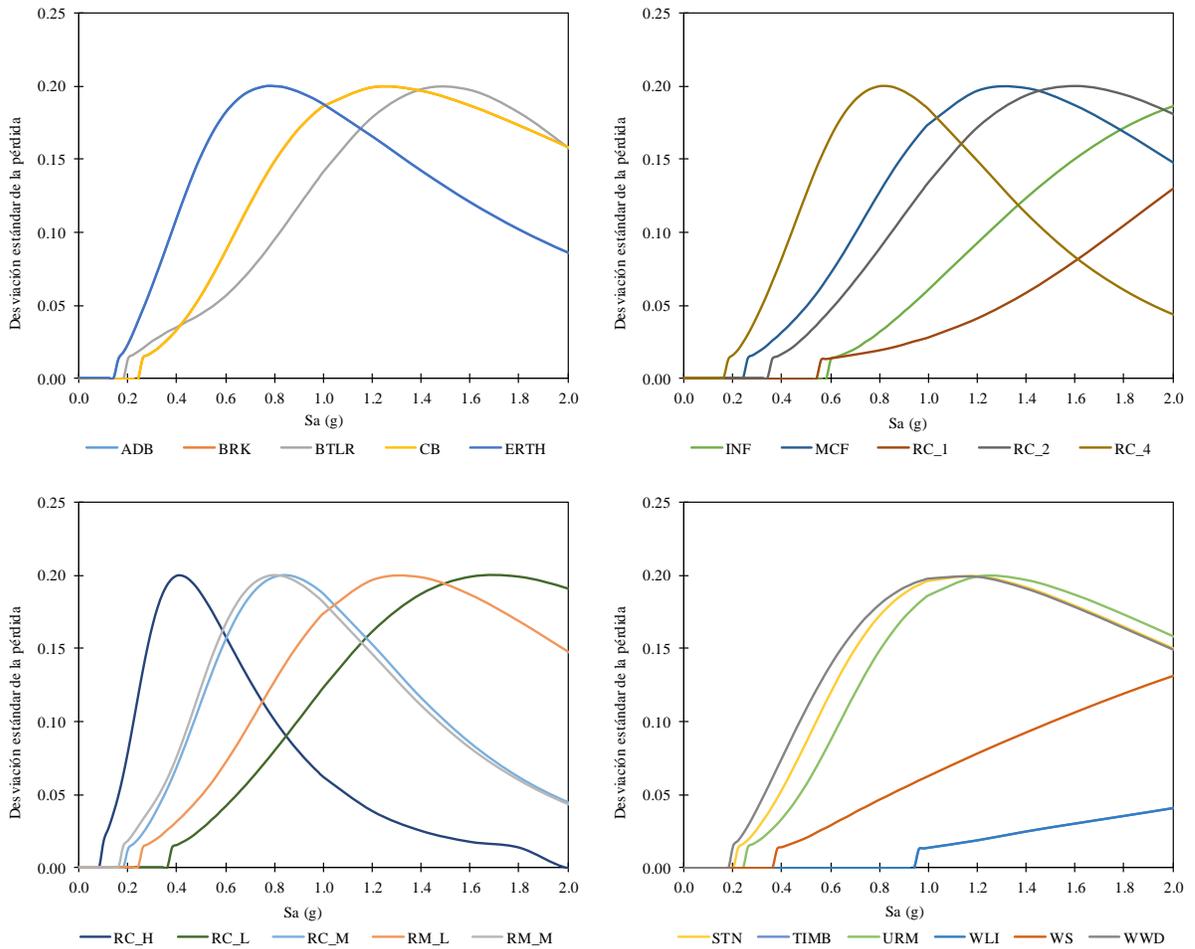


Figura 5.16. Funciones de vulnerabilidad (desviación estándar de la pérdida)

CAPÍTULO 6

EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL RIESGO

El análisis probabilista del riesgo tiene como objetivo fundamental determinar las distribuciones de probabilidad de las pérdidas que pueden sufrir, en lapsos dados, los activos expuestos, como consecuencia de la ocurrencia de amenazas naturales, integrando de manera racional las incertidumbres que existen en las diferentes partes del proceso. La pregunta básica que el análisis probabilista de riesgos debe contestar es: *dado que se tiene un conjunto de activos expuestos a los efectos de una o varias amenazas naturales, ¿con qué frecuencia se presentarán pérdidas que superen un valor dado?*

Puesto que la frecuencia de los eventos catastróficos es particularmente baja, queda descartada la posibilidad de contestar la pregunta anterior formulando modelos puramente empíricos del proceso de ocurrencia de estos eventos. Por lo tanto, esto obliga a la construcción de modelos probabilistas.

El procedimiento de cálculo probabilista consiste entonces, en forma resumida, en evaluar las pérdidas en el grupo de activos expuestos durante cada uno de los escenarios que colectivamente describen la amenaza, y luego integrar probabilísticamente los resultados obtenidos, utilizando como factores de peso las frecuencias de ocurrencia de cada escenario. El análisis probabilista de riesgo involucra incertidumbres que no pueden despreciarse y deben propagarse a lo largo del proceso de cálculo.

6.1. MARCO TEÓRICO

6.1.1. Procedimiento para el Análisis del Riesgo

Como se mencionó anteriormente, la frecuencia de eventos sísmicos catastróficos es particularmente baja y por lo tanto la disponibilidad de datos históricos es limitada. Considerando la posibilidad de futuros eventos altamente destructivos, la estimación del riesgo se debe enfocar en modelos probabilistas que puedan utilizar la limitada información disponible para predecir, de la mejor manera, futuros escenarios y para considerar la alta incertidumbre involucrada en el análisis. Por lo tanto, la estimación del riesgo debe ser prospectiva, anticipando eventos científicamente creíbles que podrían ocurrir en el futuro.

Los fundamentos sismológicos y de ingeniería son necesarios para desarrollar modelos de predicción de terremotos que permitan evaluar el riesgo de que se presenten pérdidas como resultado de un evento catastrófico. Dado que existen grandes incertidumbres inherentes en los modelos, relacionados con las características de severidad y frecuencia de los eventos, y por lo tanto en las pérdidas causadas como consecuencia de estos eventos, el modelo de riesgo sísmico debe estar basado en formulaciones probabilistas que incorporen esta incertidumbre en la estimación del riesgo. El modelo probabilista que cuantifica las pérdidas potenciales causadas por sismos se presenta en la *Figura 6.1*.

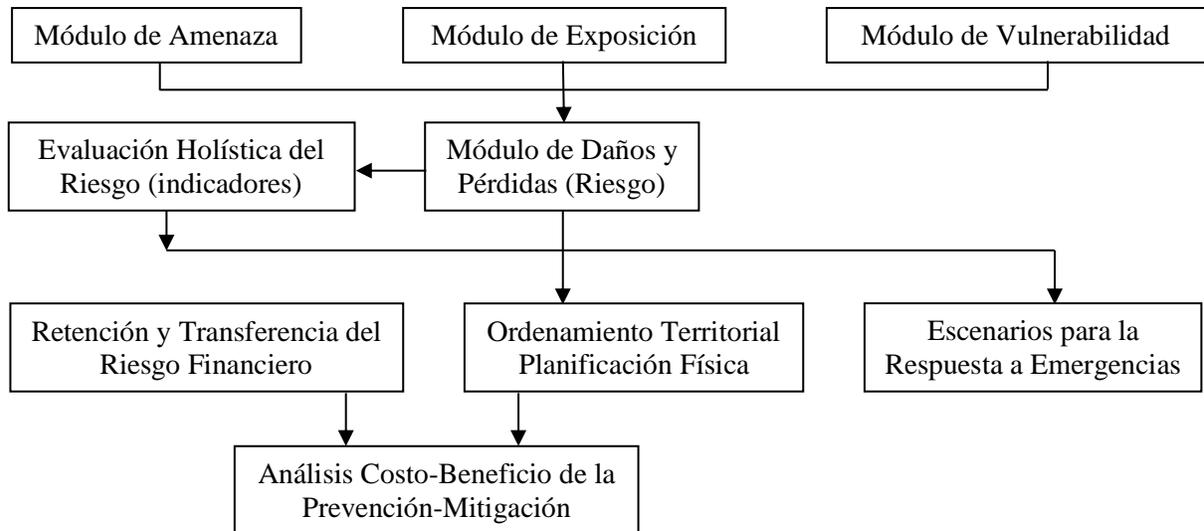


Figura 6.1. Modelo probabilista de riesgo y aplicaciones para la gestión del riesgo de desastre (tomada de Cardona, Ordaz, Reinoso, Yamín, & Barbat, 2011)

En base a la figura anterior, la evaluación de riesgo correspondiente al presente trabajo se puede resumir en tres pasos de análisis los cuales se describen a continuación:

- *Evaluación de la amenaza (CAPÍTULO 3):* para cada uno de los peligros considerados se define un conjunto de eventos, con sus respectivas frecuencias de ocurrencia, que representan de manera integral la amenaza correspondiente. Cada escenario contiene la distribución espacial de parámetros que permiten construir la distribución de probabilidad de las intensidades producidas por su ocurrencia.
- *Definición del inventario de elementos expuestos (CAPÍTULO 4):* debe definirse el inventario de elementos expuestos, el cual debe especificar la localización geográfica del bien expuesto más los siguientes parámetros (como mínimo), que califican el elemento:
 - ✓ Valor físico o costo de reposición del bien
 - ✓ Valor humano o número de ocupantes estimado
 - ✓ Clase estructural a la que pertenece el bien
- *Vulnerabilidad de las construcciones (CAPÍTULO 5):* debe asignarse a cada una de las clases estructurales una función de vulnerabilidad para cada tipo de amenaza. Esta función caracteriza el comportamiento de la construcción durante la ocurrencia de fenómenos amenazantes. Las funciones de vulnerabilidad definen la distribución de probabilidad de las pérdidas como función de la intensidad producida durante un escenario específico. Se definen mediante curvas que relacionan el valor esperado del daño y la desviación estándar del daño con la intensidad del fenómeno.

6.1.2. Ecuación Básica

El riesgo por amenazas naturales es comúnmente descrito mediante la llamada curva de excedencia de pérdidas (*loss curve*) que especifica las frecuencias, usualmente anuales, con que ocurrirán eventos en que se exceda un valor especificado de pérdidas. Esta frecuencia anual de excedencia se conoce también como tasa de excedencia, y puede calcularse mediante la siguiente ecuación, que es una de las múltiples formas que adopta el teorema de la probabilidad total:

$$v(p) = \sum_{i=1}^{\text{Eventos}} \Pr(P > p | \text{Evento } i) F_A(\text{Evento } i) \quad (6.1)$$

Donde,

- $v(p)$ es la tasa de excedencia de la pérdida p ,
- $\Pr(P > p | \text{Evento } i)$ es la probabilidad de que la pérdida sea superior a p dado que ocurrió el i -ésimo evento, y
- $F_A(\text{Evento } i)$ es la frecuencia anual de ocurrencia del evento i .

Como se verá más adelante, la curva de pérdidas contiene toda la información necesaria para describir en términos de probabilidad el proceso de ocurrencia de eventos que produzcan pérdidas.

La pérdida p a que se refiere la ecuación (6.1) es la suma de las pérdidas que acontecen en todos los bienes expuestos. Conviene hacer notar lo siguiente:

- La pérdida p es una cantidad incierta, cuyo valor, dada la ocurrencia de un evento, no puede conocerse con precisión. Debe, por tanto, ser vista y tratada como una variable aleatoria y deben preverse mecanismos para conocer su distribución de probabilidad, condicionada a la ocurrencia de cierto evento.
- La pérdida p se calcula como la suma de las pérdidas que se presentan en cada uno de los bienes expuestos. Cada uno de los sumandos es una variable aleatoria y entre ellos existe cierto nivel de correlación, que debe ser incluido en el análisis.

En vista de la ecuación (6.1), la secuencia de cálculo probabilista de riesgo es la siguiente:

- ✓ Para un escenario, determinar la distribución de probabilidades de la pérdida en cada uno de los bienes expuestos.
- ✓ A partir de las distribuciones de probabilidad de las pérdidas en cada bien, determinar la distribución de probabilidad de la suma de estas pérdidas, tomando en cuenta la correlación que existe entre ellas.
- ✓ Una vez determinada la distribución de probabilidad de la suma de las pérdidas en este evento, calcular la probabilidad de que esta exceda un valor determinado, p .
- ✓ La probabilidad determinada en el inciso anterior, multiplicada por la frecuencia anual de ocurrencia del evento, es la contribución de este evento a la tasa de excedencia de la pérdida p .

El cálculo se repite para todos los eventos, con lo que se obtiene el resultado indicado por la ecuación (6.1).

6.1.3. Incertidumbres

Como se observa en la ecuación (6.1), y como se planteó anteriormente, la pérdida que se presenta en un grupo de bienes expuestos durante un escenario es una cantidad incierta que debe ser tratada como variable aleatoria.

Generalmente es impráctico determinar de manera directa la distribución de probabilidad de la pérdida en un bien expuesto condicionada a la ocurrencia de un escenario. En otras palabras, por ejemplo, es

impráctico determinar la distribución de probabilidad de la pérdida en un edificio, dado que en un sitio localizado a 100 km de distancia ocurrió un sismo con magnitud 6.

Por razones metodológicas, la probabilidad de excedencia de la pérdida p , dado que ocurrió un evento, suele expresarse de la siguiente manera:

$$\Pr(P > p | \text{Evento}) = \int_I \Pr(P > p | I) f(I | \text{Evento}) dI \quad (6.2)$$

Donde,

$\Pr(P > p | I)$ es la probabilidad de que la pérdida exceda el valor p dado que la intensidad local fue I . Es término, por tanto, toma en cuenta la incertidumbre que hay en las relaciones de vulnerabilidad.

$f(I | \text{Evento})$ es la densidad de probabilidades de la intensidad, condicionada a la ocurrencia del evento. Este término toma en cuenta el hecho de que, dado que ocurrió un evento, la intensidad en el sitio de interés es incierta.

De esta forma, se garantiza que las incertidumbres generadas en el proceso de la evaluación del riesgo se están llevando hasta el final del mismo.

6.1.4. Estimadores Puntuales del Riesgo

Como se indicó anteriormente, la curva calculada aplicando la ecuación (6.1) tiene toda la información necesaria para caracterizar el proceso de ocurrencia de eventos que produzcan pérdidas. Sin embargo, en ocasiones es impráctico utilizar una curva completa, por lo que conviene utilizar estimadores puntuales del riesgo que permitan expresarlo con un solo número. Se presentan a continuación los dos estimadores puntuales más comúnmente utilizados.

- *Pérdida anual esperada (P_{AE}):* se trata del valor esperado de la pérdida anual. Es una cantidad importante puesto que indica, por ejemplo, que si el proceso de ocurrencia de eventos dañinos fuera estacionario de aquí a la eternidad, su costo equivaldría a haber pagado la P_{AE} cantidad anualmente. Por tanto, en un sistema simple de seguro, la pérdida anual esperada sería la prima pura anual justa. La P_{AE} puede obtenerse por integración de $v(p)$ o mediante la siguiente expresión:

$$P_{AE} = \sum_{i=1}^{\text{Eventos}} E(P | \text{Evento } i) F_A(\text{Evento } i) \quad (6.3)$$

- *Pérdida máxima probable (PML por las iniciales en inglés de Probable Maximum Loss):* se trata de una pérdida que ocurre poco frecuentemente, es decir, que está asociada a un periodo de retorno muy largo (o, alternativamente, a una tasa de excedencia muy baja). No existen estándares universalmente aceptados para definir qué quiere decir “poco frecuentemente”. De hecho, la elección de un periodo de retorno u otro depende de qué tanto riesgo está dispuesto a asumir la persona que está tomando la decisión final. En la industria aseguradora, por ejemplo, los periodos de retorno utilizados para definir la PML varían entre 200 y 1500 años.

6.1.5. Probabilidad de Excedencia de Valores de Pérdida

La curva de pérdidas, $v(p)$, calculada con la ecuación (6.1) indica con qué frecuencia ocurrirán eventos que producirán pérdidas iguales o superiores a una dada, p . Si suponemos que el proceso de ocurrencia de eventos en el tiempo obedece a un proceso de Poisson, entonces es posible calcular la probabilidad de que la pérdida p sea excedida en un lapso T , es decir, en los próximos T años, con la siguiente expresión:

$$P_e(p, T) = 1 - e^{-v(p)T} = 1 - \exp\left(-\frac{T}{T_r}\right) \quad (6.4)$$

Donde,

$v(p)$ es la tasa de excedencia asociada a la pérdida p , y
 T_r es el periodo de retorno en años.

En la *Tabla 3.3* se presentan las probabilidades de excedencia asociadas a cada uno de los periodos de retorno definidos en el presente trabajo.

6.2. HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO

El entendimiento del riesgo de desastre debido a eventos naturales, como los terremotos, crea poderosos incentivos para que los países desarrollen opciones y herramientas de planeación para reducir los daños potenciales. Esta ha sido la razón por la que el modelo de evaluación de riesgo CAPRA (ERN Latinoamérica & ITEC Ltda, 2011) fue desarrollado, con el apoyo técnico y financiero del Banco Mundial, el Banco Interamericano de Desarrollo y la Estrategia Internacional de las Naciones Unidas para la Reducción de los Desastres.

CAPRA es una metodología y una plataforma de información técnico-científica, que la integran una serie de herramientas para la evaluación y comunicación de riesgo en diferentes niveles territoriales. Este modelo permite la evaluación de pérdidas en elementos expuestos utilizando métricas probabilistas tales como la curva de probabilidad de excedencia, la pérdida anual esperada y la pérdida máxima probable; medidas útiles para análisis del riesgo multiamenaza.

La plataforma está conceptualmente orientada para facilitar el proceso de toma de decisiones; utilizando CAPRA es posible diseñar instrumentos de transferencia de riesgo y realizar la evaluación de relaciones probabilistas de beneficio-costos, facilitando una herramienta innovadora para los tomadores de decisiones y para analizar los beneficios de las estrategias de mitigación del riesgo, como el reforzamiento de edificaciones existentes. Este modelo es útil para planeación urbana, para realizar escenarios de pérdida para planes de emergencia, para sistemas de alerta, para mecanismos de evaluación de pérdidas en tiempo real y para la evaluación holística de riesgo de desastre utilizando indicadores, lo que facilita la gestión integral del riesgo por parte de los diferentes actores de la toma de decisiones para la reducción de riesgo.

CAPRA ha sido utilizado en Colombia, México, Perú, Bolivia, Ecuador, Guyana, Jamaica, los países de Centro América, España, Nepal y sus experiencias son una contribución para el actual desarrollo del Global Earthquake Model (GEM). Ejemplos de la aplicación del modelo en diferentes países,

descripciones del *wiki*⁵ y herramientas de visualización disponibles fueron creados para ilustrar las capacidades de esta innovadora plataforma de arquitectura y código fuente abierto. Dado el alcance de este estudio, únicamente se ilustra la aplicación del CAPRA en el caso sísmico; sin embargo, también se han realizado aplicaciones para tsunamis, huracanes, inundaciones, deslizamientos y volcanes.

La totalidad del software desarrollado constituye un sistema especializado en la evaluación de riesgos naturales. El sistema integra una serie de procesos de punta en evaluación probabilista de amenazas, caracterización de elementos expuestos, comportamiento y vulnerabilidad social y de infraestructura, y evaluación de riesgo físico y humano.

Los programas se encuentran agrupados en módulos de funcionamiento (amenaza, vulnerabilidad, exposición y riesgo). Los módulos de amenaza, vulnerabilidad y exposición permiten realizar las evaluaciones preliminares al análisis de riesgos, como son la evaluación de la amenaza, y la caracterización de los elementos expuestos y su vulnerabilidad. La información o resultados arrojados por estos módulos, se integra en un sistema central de procesamiento, el cual permite la visualización general de los componentes del análisis, así como la evaluación determinista o probabilista del riesgo. Una descripción de la interacción de los diferentes módulos se presenta en la *Figura 6.2*. Adicionalmente, en la *Tabla 6.1* se presentan los diferentes módulos que conforman el software CAPRA.

Tabla 6.1. Módulos del software CAPRA
(tomada de ERN Latinoamérica, 2005c)

Módulo	Programa	Descripción
Amenaza	CRISIS 2007	Programa de cálculo de amenaza sísmica
	ERN-Huracán	Programa de cálculo de amenaza por huracán
	ERN-LluviaNH	Programa de cálculo de amenaza por lluvias no huracanadas
	ERN-Deslizamientos	Programa de cálculo de amenaza por deslizamientos
	ERN-Inundación	Programa de cálculo de amenaza por inundación
	ERN-Volcán	Programa de cálculo de amenaza volcánica
Vulnerabilidad	ERN-Vulnerabilidad	Programa de cálculo y edición de funciones de vulnerabilidad
Exposición	CAPRA-InfoPunt	Aplicación para captura de datos de exposición tipo punto
	CAPRA-InfoMovil	Aplicación para captura de datos de exposición tipo punto con equipos móviles
	CAPRA-InfoPolig	Aplicación para captura de datos de exposición tipo polígono
	CAPRA-InfoLinea	Aplicación para captura de datos de exposición tipo línea
	CAPRA-ZonaUrbana	Aplicación para captura de datos de exposición tipo polígono-Zonificación Urbana
Riesgo	CAPRA-GIS	Sistema CAPRA de cálculo de riesgo y visualización

Dado que en los capítulos anteriores ya se definió todo lo correspondiente a la amenaza, exposición y vulnerabilidad, no hubo necesidad de utilizar los módulos que ofrece el programa CAPRA para determinar los mismos. Sin embargo, los cálculos de riesgo se llevaron a cabo en el programa CAPRA-GIS, para lo cual fue necesario adaptar todos los resultados obtenidos de amenaza, exposición y vulnerabilidad a los formatos adecuados tal que fueran compatibles con el programa (ERN Latinoamérica, 2005c). En la siguiente sección se presenta una breve descripción del programa CAPRA-GIS.

⁵ **wiki:** es el nombre que recibe un sitio web, cuyas páginas pueden ser editadas directamente desde el navegador, donde los usuarios crean, modifican o eliminan contenidos que, generalmente, comparten.

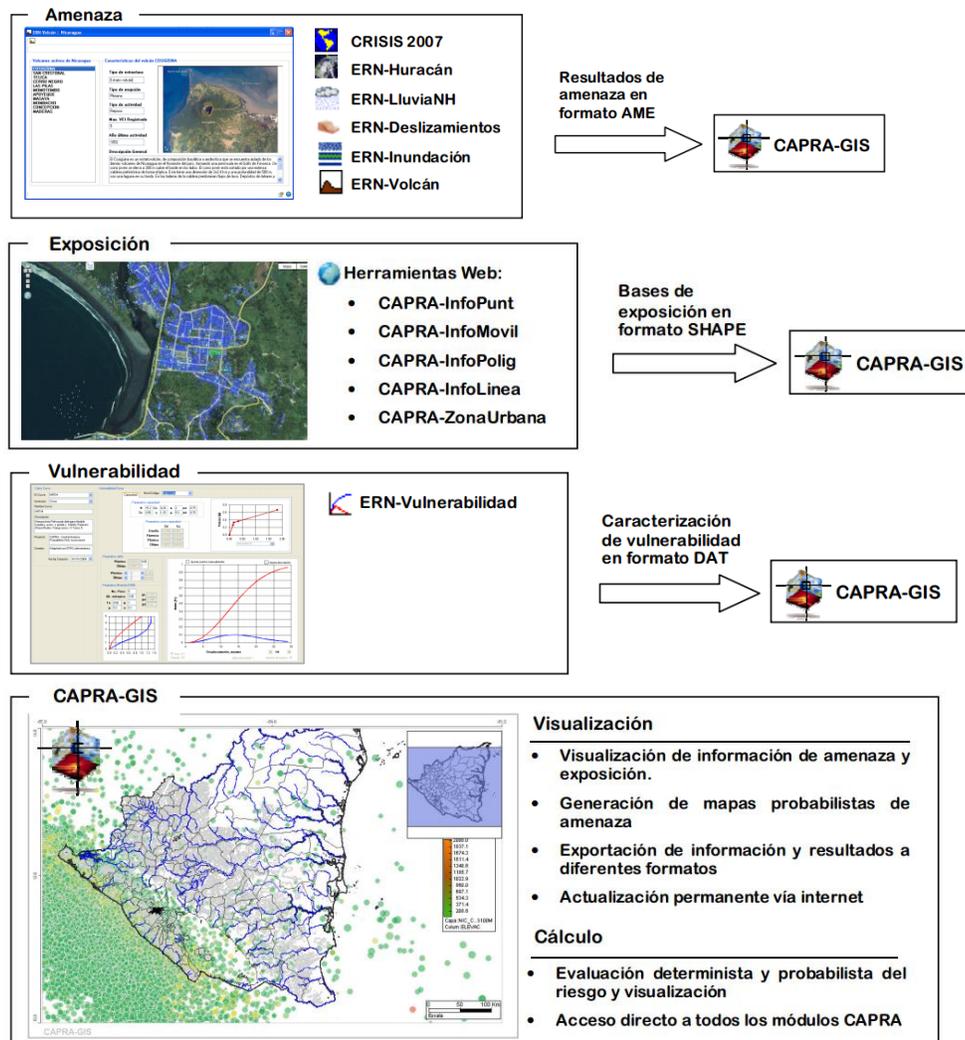


Figura 6.2. Descripción general del software CAPRA
 (tomada de ERN Latinoamérica, 2005c)

6.2.1. Descripción General del Programa CAPRA-GIS

El programa CAPRA-GIS es un sistema de información geográfica desarrollado por ERN Latinoamérica & ITEC Ltda (2011), el cual está orientado al cálculo de riesgos por amenazas naturales, consistentemente con todas las metodologías CAPRA. Permite la visualización de toda la información de amenaza y exposición, y ejecuta los análisis de riesgo a partir de dicha información. Constituye el núcleo central del conjunto de programas CAPRA.

El módulo de software CAPRA-GIS tiene las siguientes características:

- ✓ Es un visualizador de información geográfica vectorial y ráster orientado al análisis de riesgo.
- ✓ Permite la visualización de archivos tipo Shape, AME (ver sección 6.3 para su definición) y GRD (grid).
- ✓ Permite la edición de las propiedades gráficas de la información visualizada.
- ✓ Permite la adición de atributos a formatos Shape mediante operaciones matemáticas entre bases de datos disponibles.

- ✓ Gran variedad de ventanas para edición de formatos de gráficas y mapas.
- ✓ Vincula los diferentes tipos de archivos de amenaza, exposición y vulnerabilidad.
- ✓ Vincula las diferentes aplicaciones de cálculo de amenaza y vulnerabilidad.
- ✓ Permite realizar el análisis multiriesgo a bases de exposición.
- ✓ Manual de usuario y de referencia técnica involucrado.

El módulo de software CAPRA-GIS tiene las siguientes limitaciones principales:

- ✗ No permite la edición de los archivos tipo AME o GRD.
- ✗ No permite edición de los componentes geográficos de los archivos tipo Shape.

El nivel de resolución de los archivos de amenaza está definido por diferentes factores tales como la resolución de la información de entrada al modelo (por ejemplo, modelos de elevación digital), de las limitaciones propias del modelo, del criterio del analista y de las condiciones particulares del problema a estudiar.

El nivel de resolución de los archivos de exposición depende de la unidad geométrica básica que se utilice para caracterizar el bien o grupo de bienes expuestos (por ejemplo, predios, manzanas o zonas).

El nivel de resolución de los resultados del riesgo, los cuales se asocian a los elementos expuestos, resulta de una combinación entre la resolución de la amenaza y la resolución de la exposición. Cuando el nivel de resolución de la amenaza refleja adecuadamente la variación geográfica de la misma, la resolución final del riesgo es correspondiente a la de la exposición. Sin embargo, si el nivel de resolución de la amenaza no refleja dicha variación geográfica adecuadamente (por ejemplo, cuando para el cálculo de la amenaza se utilice una grilla muy espaciada) el nivel de resolución del riesgo, será menor al de la exposición. La resolución final del riesgo, será igual o menor que la de la exposición, y variará para cada bien expuesto, en función de qué tan adecuadamente se representa la variación geográfica de la amenaza en cada punto de exposición.

De acuerdo a lo anterior, la resolución de los resultados de riesgo en inmuebles no presentará problema alguno ya que la amenaza y la base de datos de exposición presentan un mallado muy similar, 0.125° (ver sección 3.3) y 0.1° (ver sección 4.2), respectivamente. Sin embargo, los resultados en los centros de salud e instituciones educativas se verán altamente influenciados por la resolución que presenta la base de datos, la cual no tiene una distribución uniforme. A diferencia de la base de datos de inmuebles, ésta se definió en base a la ubicación de cada uno de los centroides de los polígonos que conforman la división administrativa nivel 2 de cada país (ver sección 0).

6.3. MODELO PROBABILISTA DE RIESGO

Para la construcción del modelo de riesgo se utilizaron los resultados del modelo de amenaza llevado a cabo en el programa CRISIS2015 (ver sección 3.4). Sin embargo, el análisis de riesgo no se ejecuta con los mapas allí presentados, sino por medio de un conjunto de eventos estocásticos los cuales se almacenan en un archivo tipo AME.

Los formatos AME son simultáneamente dos cosas:

- Una forma estandarizada de representar las amenazas por fenómenos naturales.
- Una interfaz computacional para crear modelos que describan las amenazas naturales.

Los AME están constituidos por una colección de escenarios posibles de ocurrencia de un evento natural. Se considera que los escenarios que forman la colección son mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos.

La primera característica se refiere a que un evento natural (por ejemplo, la ocurrencia de un sismo) puede ocurrir como lo indica el escenario 1 de la colección, o como lo indica el escenario 2, pero no como lo indican ambos al mismo tiempo. En otras palabras, esta condición significa que dos escenarios que formen parte de la colección no pueden ocurrir al mismo tiempo.

La segunda característica, ser colectivamente exhaustivos, se refiere a que la colección de escenarios es completa en el sentido que el evento natural no puede ocurrir de ninguna manera diferente a las descritas en los escenarios de la colección.

Los archivos AME describen ciertas características de los escenarios que son relevantes para el análisis probabilista de riesgo. Estas características son:

- Su frecuencia anual de ocurrencia.
- La distribución espacial de las intensidades producidas durante la ocurrencia del escenario.

Las intensidades producidas durante la ocurrencia del escenario son medidas locales de la severidad del evento natural. Cabe la posibilidad de que la severidad de un escenario no quede correctamente descrita con una sola medida de intensidad. Por ejemplo, en el caso de los sismos no es relevante solamente la aceleración máxima del suelo. Dado que importa el contenido frecuencial del movimiento, es necesario describir la intensidad con más de una medida, por ejemplo, determinar la aceleración del terreno para diferentes periodos estructurales además del PGA. Los formatos AME permiten entonces que la severidad de un escenario quede definida con más de una medida de intensidad.

En el contexto del análisis probabilista de riesgo, las intensidades durante un escenario no son números que se conozcan con precisión, sino que hay incertidumbres sobre sus valores. Deben, por tanto, ser vistos y tratados como variables aleatorias. Esto conduce a que, para describir cada una de las intensidades que se producen durante un escenario, sea necesario definir los momentos estadísticos que sean necesarios para definir la distribución de probabilidad de la intensidad dado que se presentó el escenario.

Los AMES admiten 4 distribuciones de probabilidad (normal, lognormal, beta y gamma), todas ellas definidas por dos momentos estadísticos. Es necesario entonces definir dos momentos estadísticos de cada una de las medidas de intensidad que se presentan durante la ocurrencia de un evento.

En resumen, un AME describe una amenaza natural mediante un cierto número de escenarios de ocurrencia, cada uno con una frecuencia anual de ocurrencia y una distribución espacial de todas las medidas de intensidad que se consideren relevantes; estas medidas de intensidad son descritas mediante dos momentos de una distribución de probabilidad.

Para este caso, se creó una serie de eventos estocásticos para un rango de magnitud con límite inferior de 4.5 y valor máximo igual a la magnitud última, M_U , de cada sismofuente. Se generaron eventos con una separación promedio de 30 km y 6 magnitudes en cada locación. De acuerdo con estudios de riesgo realizados en otros lugares tal densidad de eventos es suficiente para lograr resultados precisos de la pérdida.

A manera de ejemplo, en la *Figura 6.3* se presentan los posibles escenarios con magnitud mayor o igual a 7.0 que se pudiesen presentar en la zona de estudio. Es claro que no se pueden presentar todos los

escenarios para todas las magnitudes ya que visualmente no sería conveniente por la cantidad de puntos que resultarían. Los epicentros se han dibujado junto con el mapa de aceleraciones pico del suelo (PGA) asociadas a un periodo de retorno de 475 años teniendo en cuenta los efectos de sitio. Esto, con el objetivo de demostrar que en los lugares de mayor amenaza (mayor aceleración) es donde se presentan los sismos más grandes.

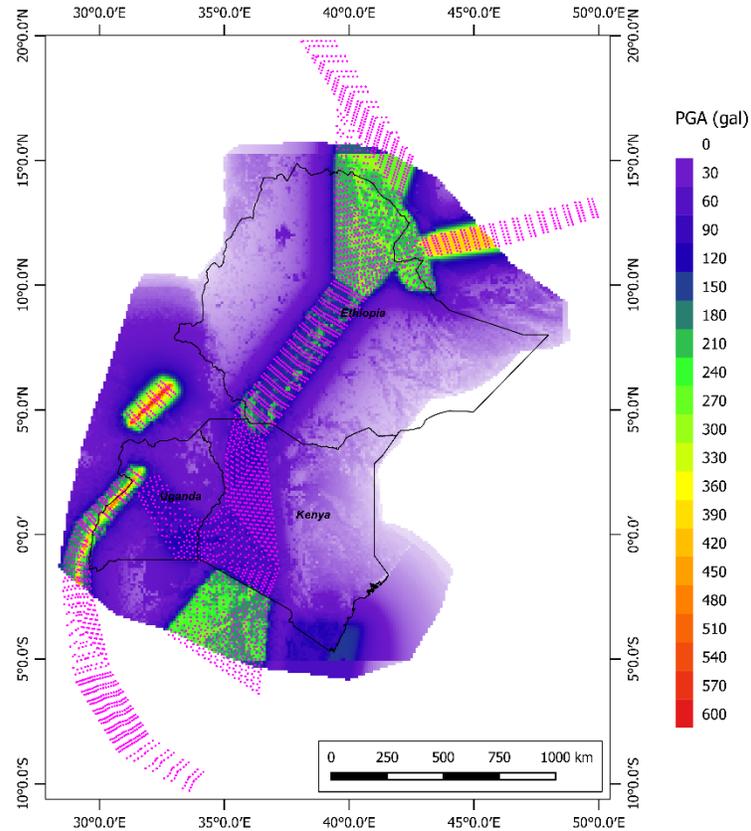


Figura 6.3. Localización epicentral para una serie de eventos estocásticos con $M \geq 7.0$ y efectos de sitio

Adicionalmente, en la *Figura 6.4* se presentan 3 eventos en particular, cada uno con su respectiva escala de intensidades y área de influencia.

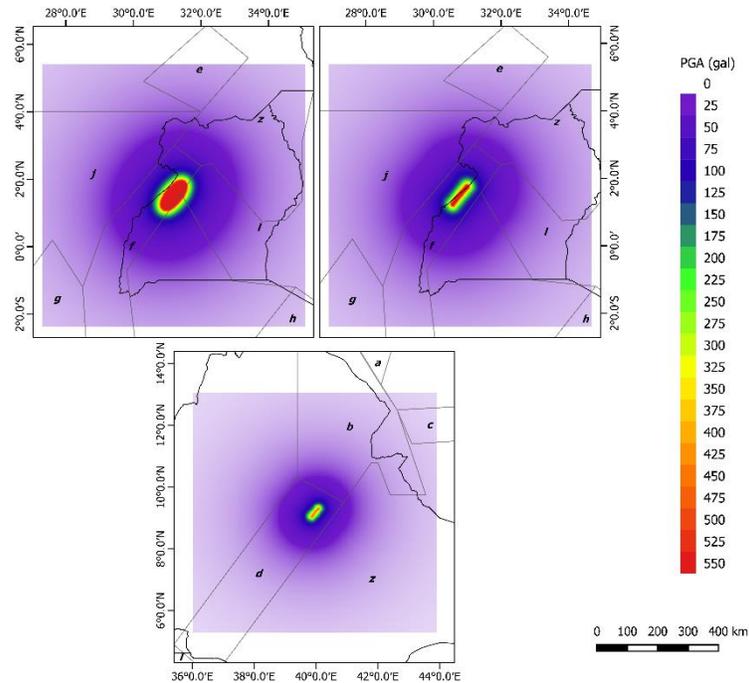


Figura 6.4. Aceleración pico del suelo (PGA) para 3 eventos sin efectos de sitio

6.4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE RIESGO

En las secciones 6.4.1 a 6.4.3 se presentan los resultados obtenidos del análisis de riesgo llevado a cabo en el programa CAPRA-GIS. Para cada una de las bases de datos de exposición (inmuebles, centros de salud e instituciones educativas) se presentan las curvas de tasa de excedencia y la pérdida anual esperada, P_{AE} , en función del periodo de retorno y la localidad de cada país.

6.4.1. Inmuebles

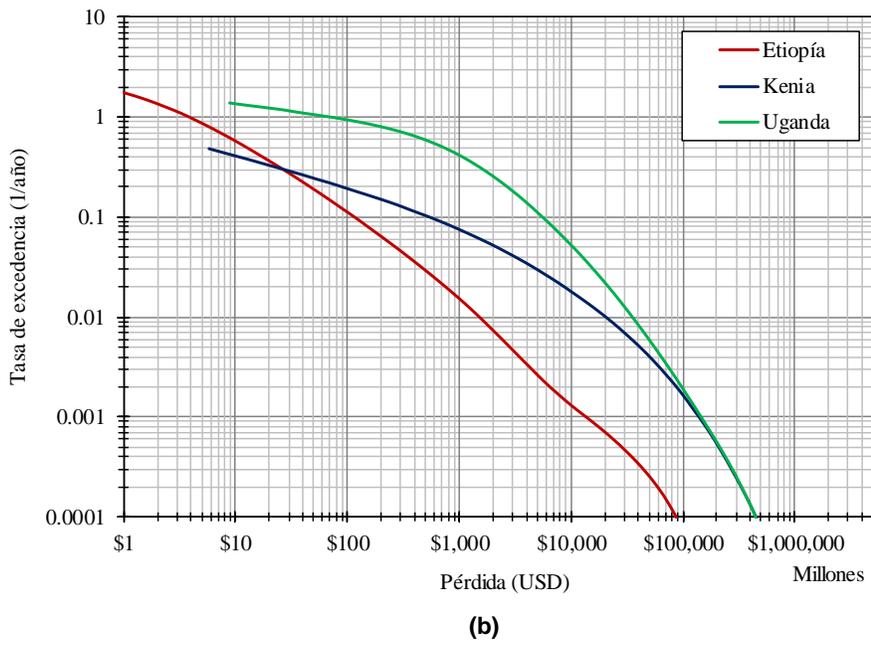
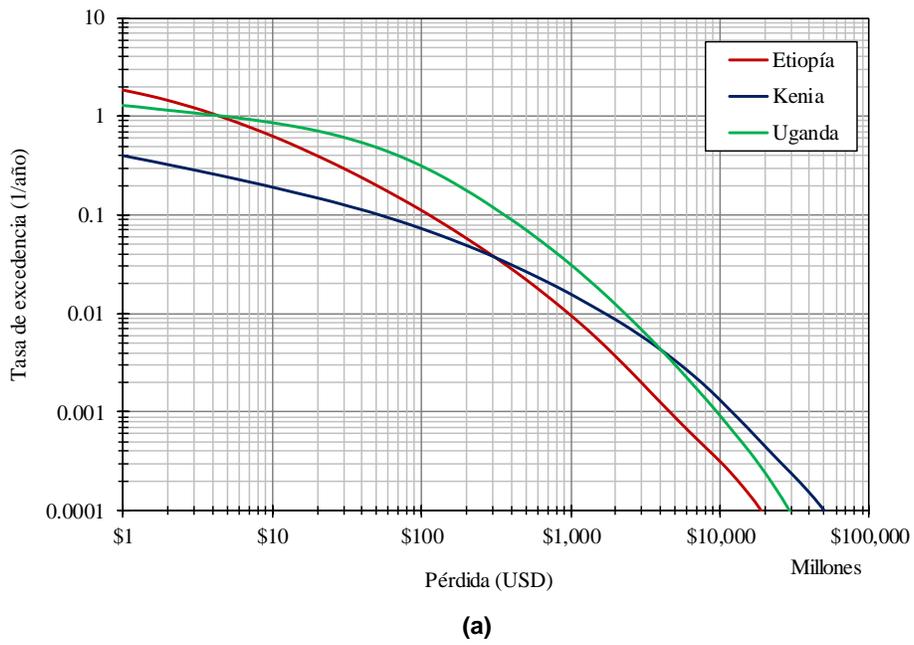
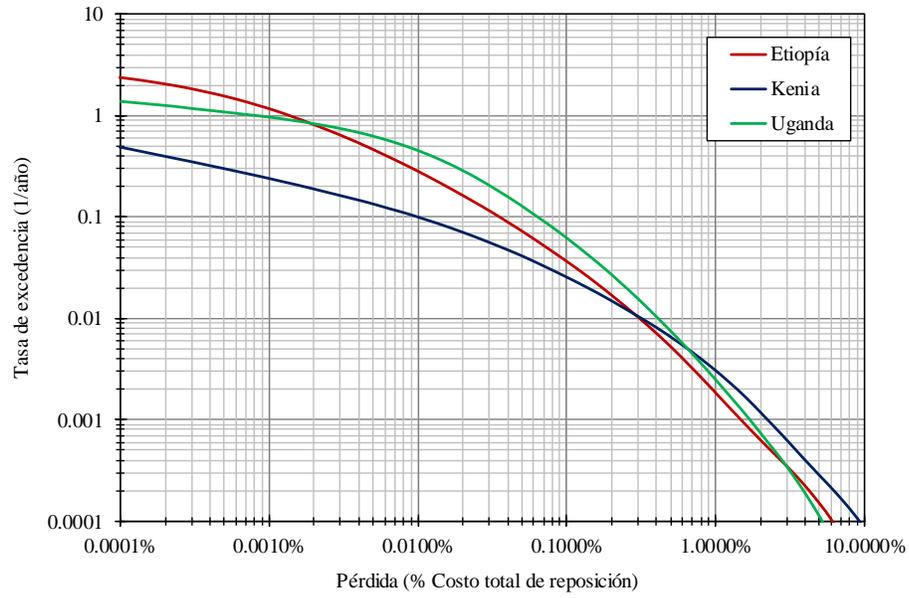
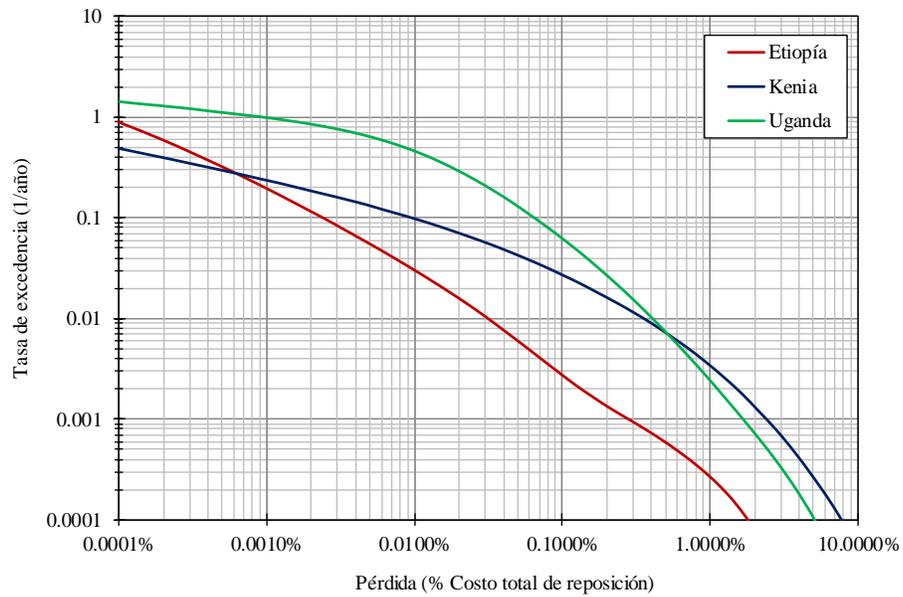


Figura 6.5. Curvas de tasa de excedencia de las pérdidas (Millones de USD) en inmuebles presentes en Etiopía, Kenia y Uganda: a) 2015; b) 2050



(a)



(b)

Figura 6.6. Curvas de tasa de excedencia de las pérdidas (% Costo total de reposición) en inmuebles presentes en Etiopía, Kenia y Uganda: a) 2015; b) 2050

Tabla 6.2. Pérdidas en inmuebles a nivel nacional para los diferentes periodos de retorno - Etiopía

Periodo de retorno (años)	Pérdida (Millones USD)	
	2015	2050
10	\$ 111	\$ 1,718
25	\$ 287	\$ 4,441
50	\$ 543	\$ 8,389
100	\$ 962	\$ 14,917
250	\$ 1,880	\$ 29,147
500	\$ 2,956	\$ 45,949
1000	\$ 4,627	\$ 71,994

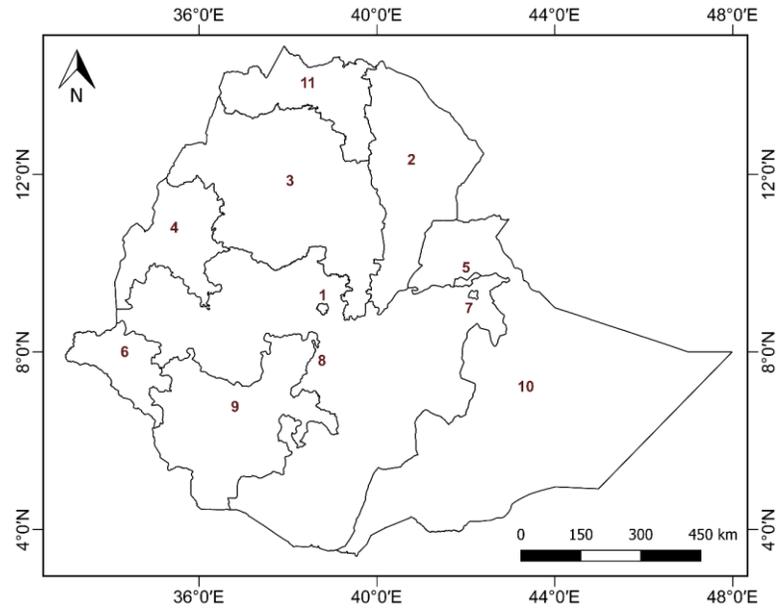
Tabla 6.3. Pérdidas en inmuebles a nivel nacional para los diferentes periodos de retorno - Kenia

Periodo de retorno (años)	Pérdida (Millones USD)	
	2015	2050
10	\$ 52	\$ 562
25	\$ 279	\$ 3,249
50	\$ 737	\$ 8,935
100	\$ 1,695	\$ 20,861
250	\$ 4,242	\$ 51,283
500	\$ 7,425	\$ 88,754
1000	\$ 11,949	\$ 140,339

Tabla 6.4. Pérdidas en inmuebles a nivel nacional para los diferentes periodos de retorno - Uganda

Periodo de retorno (años)	Pérdida (Millones USD)	
	2015	2050
10	\$ 361	\$ 5,564
25	\$ 821	\$ 12,570
50	\$ 1,413	\$ 21,557
100	\$ 2,320	\$ 35,211
250	\$ 4,203	\$ 63,753
500	\$ 6,370	\$ 96,391
1000	\$ 9,548	\$ 144,716

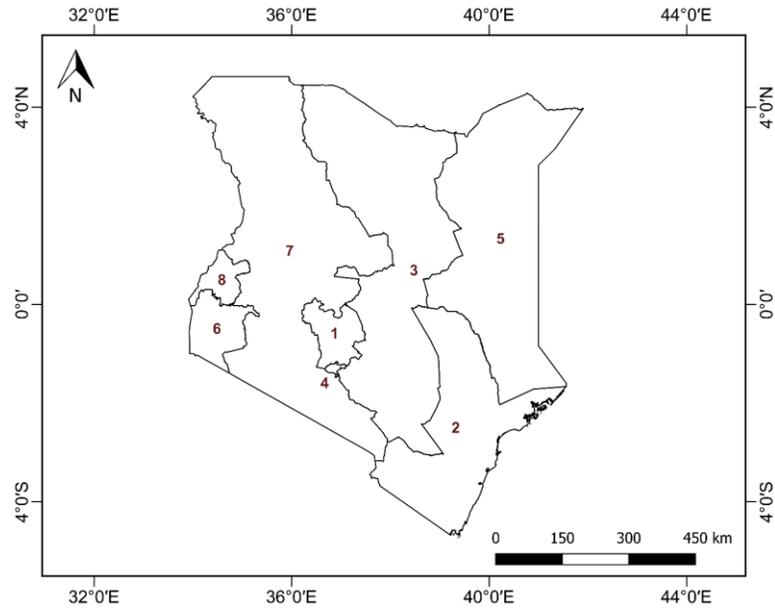
En la *Figura 6.5* y *Figura 6.6* se puede observar que Etiopía siempre presenta los menores índices de pérdidas a pesar de tener zonas consideradas sísmicamente activas, como lo son la Depresión de Afar y el Rift de Etiopía. Por el contrario, Kenia posee los valores más altos de los tres países en consideración. Tomando como base los 500 años de periodo de retorno, muy cercano a los 475 años que se hace referencia en los resultados de amenaza, se encuentra que Etiopía presenta pérdidas por 2,956 y 45,949 millones de dólares para el 2015 y 2050, respectivamente. Calculando la proporción con el costo total de reposición (ver *Tabla 4.6*), dichas pérdidas son del 0.95 % en el 2015 y 0.96 % en el 2050. Tanto para el 2015 como para el 2050, las pérdidas no sobrepasan el 10 % del costo total de reposición en ninguno de los tres países.



ID	Localidad	2015		2050	
		P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)	P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)
1	Adís Abeba	\$ 12.083	\$ 21,983	\$ 188.737	\$ 343,367
2	Afar	\$ 6.971	\$ 71	\$ 110.104	\$ 1,124
3	Amhara	\$ 9.742	\$ 61	\$ 141.499	\$ 887
4	Benishangul-Gumaz	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.001	\$ 0
5	Dire Dawa	\$ 0.039	\$ 36	\$ 0.603	\$ 561
6	Gambela	\$ 0.012	\$ 0	\$ 0.188	\$ 6
7	Harar Jugol	\$ 0.005	\$ 13	\$ 0.079	\$ 208
8	Oromía	\$ 19.321	\$ 59	\$ 301.409	\$ 919
9	NNPS ¹	\$ 17.393	\$ 158	\$ 271.304	\$ 2,467
10	Somalia	\$ 1.444	\$ 5	\$ 22.756	\$ 72
11	Tigray	\$ 6.179	\$ 115	\$ 96.914	\$ 1,805

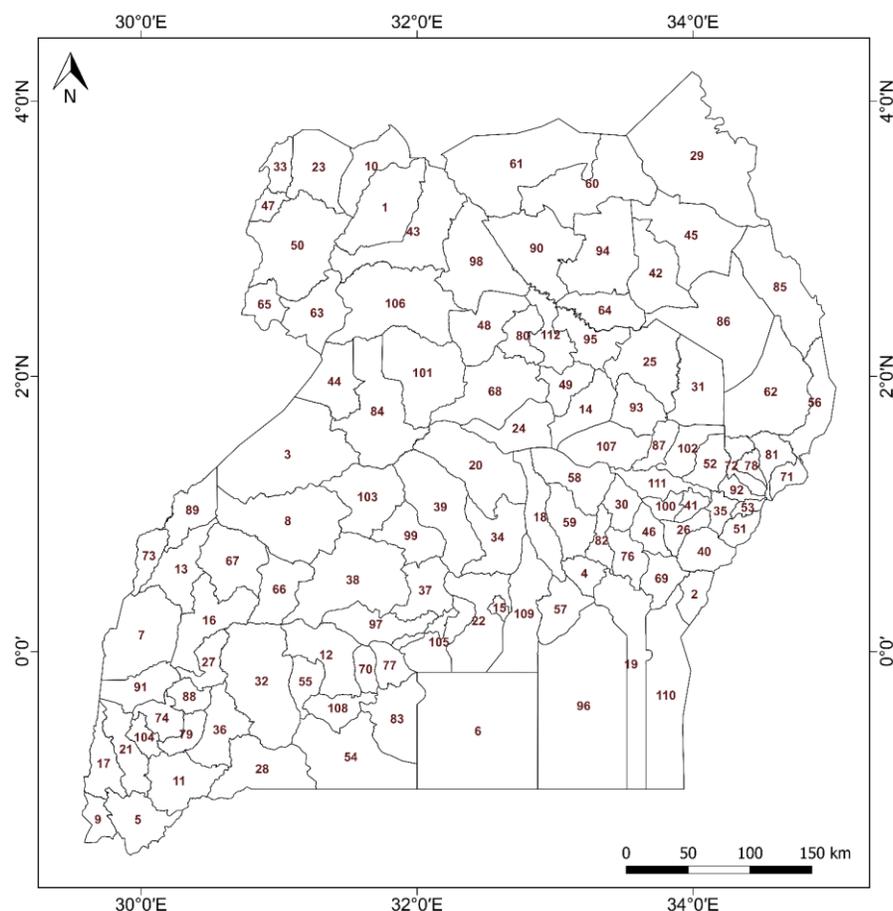
¹ Naciones, Nacionalidades y Pueblos del Sur

Figura 6.7. Pérdida anual esperada (PAE) en inmuebles – Etiopía



ID	Localidad	2015		2050	
		P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)	P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)
1	Centro	\$ 6.345	\$ 479	\$ 54.705	\$ 4,127
2	Costa	\$ 15.550	\$ 186	\$ 134.088	\$ 1,608
3	Este	\$ 9.188	\$ 60	\$ 79.209	\$ 514
4	Nairobi	\$ 20.794	\$ 29,657	\$ 179.266	\$ 255,677
5	Noreste	\$ 0.013	\$ 0	\$ 0.116	\$ 1
6	Nyanza	\$ 11.387	\$ 695	\$ 220.771	\$ 13,472
7	Valle del Rift	\$ 22.542	\$ 124	\$ 194.338	\$ 1,069
8	Oeste	\$ 7.366	\$ 875	\$ 204.714	\$ 24,314

Figura 6.8. Pérdida anual esperada (P_{AE}) en inmuebles - Kenia



ID	Localidad	2015		2050	
		P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)	P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)
1	Adjumani	\$ 0.448	\$ 144	\$ 6.688	\$ 2,146
2	Busia	\$ 0.821	\$ 1,013	\$ 12.261	\$ 15,138
3	Hoima	\$ 16.926	\$ 2,939	\$ 252.517	\$ 43,848
4	Jinja	\$ 2.528	\$ 3,452	\$ 29.452	\$ 40,214
5	Kabale	\$ 0.311	\$ 177	\$ 4.662	\$ 2,657
6	Kalangala	\$ 0.063	\$ 7	\$ 0.916	\$ 100
7	Kasese	\$ 24.029	\$ 7,095	\$ 361.216	\$ 106,650
8	Kibaale	\$ 4.723	\$ 1,070	\$ 70.551	\$ 15,990
9	Kisoro	\$ 0.820	\$ 1,213	\$ 13.519	\$ 19,998
10	Moyo	\$ 0.414	\$ 224	\$ 6.322	\$ 3,426
11	Ntungamo	\$ 0.202	\$ 98	\$ 3.023	\$ 1,463
12	Ssembabule	\$ 0.052	\$ 22	\$ 0.784	\$ 336
13	Kabarole	\$ 16.998	\$ 9,310	\$ 255.453	\$ 139,912
14	Kaberamaido	\$ 0.203	\$ 124	\$ 3.042	\$ 1,859
15	Kampala	\$ 7.388	\$ 37,734	\$ 110.066	\$ 562,192
16	Kamwenge	\$ 1.151	\$ 475	\$ 16.966	\$ 6,997
17	Kanungu	\$ 1.077	\$ 825	\$ 16.283	\$ 12,465
18	Kayunga	\$ 2.100	\$ 1,209	\$ 30.937	\$ 17,805
19	Mayuge	\$ 1.066	\$ 307	\$ 15.772	\$ 4,549
20	Nakasongola	\$ 1.061	\$ 300	\$ 15.840	\$ 4,479
21	Rukungiri	\$ 0.640	\$ 423	\$ 9.832	\$ 6,501
22	Wakiso	\$ 4.995	\$ 1,766	\$ 74.316	\$ 26,271
23	Yumbe	\$ 0.314	\$ 134	\$ 4.709	\$ 2,008
24	Amolatar	\$ 1.226	\$ 693	\$ 18.308	\$ 10,343
25	Amuria	\$ 0.051	\$ 20	\$ 0.761	\$ 292

ID	Localidad	2015		2050	
		P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)	P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)
26	Butaleja	\$ 0.158	\$ 240	\$ 2.359	\$ 3,587
27	Ibanda	\$ 0.211	\$ 217	\$ 3.146	\$ 3,238
28	Isingiro	\$ 0.249	\$ 92	\$ 3.714	\$ 1,378
29	Kaabong	\$ 0.006	\$ 1	\$ 0.091	\$ 13
30	Kaliro	\$ 0.719	\$ 822	\$ 10.735	\$ 12,273
31	Katakwi	\$ 0.114	\$ 47	\$ 1.700	\$ 695
32	Kiruhura	\$ 0.275	\$ 59	\$ 4.108	\$ 886
33	Koboko	\$ 0.166	\$ 221	\$ 2.572	\$ 3,432
34	Luwero	\$ 1.642	\$ 735	\$ 24.510	\$ 10,976
35	Mbale	\$ 0.166	\$ 319	\$ 4.652	\$ 8,906
36	Mbarara	\$ 0.482	\$ 268	\$ 7.197	\$ 3,997
37	Mityana	\$ 0.550	\$ 347	\$ 8.222	\$ 5,180
38	Mubende	\$ 0.598	\$ 128	\$ 8.923	\$ 1,916
39	Nakaseke	\$ 0.776	\$ 222	\$ 11.580	\$ 3,307
40	Tororo	\$ 0.613	\$ 503	\$ 3.344	\$ 2,744
41	Budaka	\$ 0.157	\$ 379	\$ 3.751	\$ 9,075
42	Abim	\$ 0.004	\$ 2	\$ 0.064	\$ 27
43	Amuru	\$ 0.317	\$ 87	\$ 8.292	\$ 2,272
44	Buliisa	\$ 9.950	\$ 5,109	\$ 148.412	\$ 76,198
45	Kotido	\$ 0.031	\$ 9	\$ 0.473	\$ 130
46	Namutumba	\$ 0.616	\$ 751	\$ 9.190	\$ 11,208
47	Maracha	\$ 0.123	\$ 254	\$ 2.037	\$ 4,208
48	Oyam	\$ 1.744	\$ 789	\$ 26.038	\$ 11,784
49	Dokolo	\$ 0.296	\$ 273	\$ 4.406	\$ 4,068
50	Arua	\$ 1.745	\$ 393	\$ 25.870	\$ 5,821
51	Manafwa	\$ 0.061	\$ 101	\$ 1.085	\$ 1,809
52	Bukedea	\$ 0.116	\$ 110	\$ 1.728	\$ 1,635
53	Bududa	\$ 0.022	\$ 87	\$ 0.327	\$ 1,290
54	Rakai	\$ 0.109	\$ 27	\$ 1.632	\$ 399
55	Lyantonde	\$ 0.018	\$ 20	\$ 0.267	\$ 298
56	Amudat	\$ 0.142	\$ 85	\$ 1.986	\$ 1,186
57	Buikwe	\$ 1.059	\$ 725	\$ 14.851	\$ 10,171
58	Buyende	\$ 1.715	\$ 905	\$ 38.100	\$ 20,116
59	Kamuli	\$ 2.278	\$ 1,472	\$ 30.207	\$ 19,525
60	Kitgum	\$ 0.071	\$ 17	\$ 0.911	\$ 225
61	Lamwo	\$ 0.110	\$ 19	\$ 2.169	\$ 385
62	Nakapiripirit	\$ 0.081	\$ 19	\$ 1.277	\$ 302
63	Nebbi	\$ 16.502	\$ 8,176	\$ 239.874	\$ 118,842
64	Otuke	\$ 0.051	\$ 32	\$ 0.537	\$ 344
65	Zombo	\$ 0.718	\$ 793	\$ 11.794	\$ 13,030
66	Kyegegwa	\$ 0.109	\$ 62	\$ 2.299	\$ 1,307
67	Kyenjojo	\$ 7.190	\$ 3,038	\$ 95.254	\$ 40,255
68	Apac	\$ 1.718	\$ 524	\$ 22.842	\$ 6,967
69	Bugiri	\$ 1.105	\$ 1,044	\$ 18.563	\$ 17,545
70	Bukomansimbi	\$ 0.011	\$ 18	\$ 0.316	\$ 523
71	Bukwo	\$ 0.031	\$ 56	\$ 0.458	\$ 837
72	Bulambuli	\$ 0.042	\$ 61	\$ 0.920	\$ 1,319
73	Bundibugyo	\$ 3.870	\$ 4,598	\$ 56.039	\$ 66,578
74	Bushenyi	\$ 0.314	\$ 344	\$ 3.412	\$ 3,742
75	Butambala	\$ 0.123	\$ 301	\$ 4.531	\$ 11,096
76	Iganga	\$ 1.513	\$ 1,475	\$ 17.166	\$ 16,730
77	Kalungu	\$ 0.039	\$ 47	\$ 0.927	\$ 1,101
78	Kapchorwa	\$ 0.006	\$ 17	\$ 0.068	\$ 191
79	Sheema	\$ 0.251	\$ 356	\$ 3.629	\$ 5,155
80	Kole	\$ 0.440	\$ 407	\$ 7.816	\$ 7,238
81	Kween	\$ 0.017	\$ 20	\$ 0.422	\$ 491
82	Luuka	\$ 0.499	\$ 764	\$ 16.643	\$ 25,459
83	Masaka	\$ 0.037	\$ 17	\$ 0.274	\$ 124
84	Masindi	\$ 2.883	\$ 729	\$ 34.935	\$ 8,835
85	Moroto	\$ 0.041	\$ 12	\$ 0.432	\$ 122

ID	Localidad	2015		2050	
		P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)	P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)
86	Napak	\$ 0.039	\$ 8	\$ 0.794	\$ 158
87	Ngora	\$ 0.084	\$ 115	\$ 1.562	\$ 2,150
88	Buhweju	\$ 0.017	\$ 24	\$ 0.284	\$ 411
89	Ntoroko	\$ 19.021	\$ 12,718	\$ 357.727	\$ 239,189
90	Pader	\$ 0.110	\$ 33	\$ 1.668	\$ 502
91	Rubirizi	\$ 0.438	\$ 302	\$ 7.168	\$ 4,939
92	Sironko	\$ 0.021	\$ 52	\$ 0.272	\$ 662
93	Soroti	\$ 0.144	\$ 101	\$ 1.717	\$ 1,207
94	Agago	\$ 0.052	\$ 15	\$ 0.764	\$ 217
95	Alebtong	\$ 0.103	\$ 67	\$ 2.358	\$ 1,532
96	Buvuma	\$ 0.390	\$ 41	\$ 15.959	\$ 1,660
97	Gomba	\$ 0.109	\$ 64	\$ 2.233	\$ 1,321
98	Gulu	\$ 0.825	\$ 237	\$ 12.312	\$ 3,538
99	Kiboga	\$ 0.325	\$ 203	\$ 5.035	\$ 3,151
100	Kibuku	\$ 0.192	\$ 390	\$ 5.324	\$ 10,786
101	Kiryandongo	\$ 1.279	\$ 350	\$ 27.758	\$ 7,589
102	Kumi	\$ 0.080	\$ 74	\$ 1.060	\$ 979
103	Kyankwanzi	\$ 0.320	\$ 129	\$ 4.635	\$ 1,874
104	Mitooma	\$ 0.377	\$ 689	\$ 10.676	\$ 19,484
105	Mpigi	\$ 0.412	\$ 269	\$ 4.059	\$ 2,644
106	Nwoya	\$ 1.862	\$ 387	\$ 11.400	\$ 2,370
107	Serere	\$ 0.617	\$ 312	\$ 13.749	\$ 6,946
108	Lwengo	\$ 0.054	\$ 52	\$ 1.063	\$ 1,031
109	Mukono	\$ 6.228	\$ 2,187	\$ 93.087	\$ 32,693
110	Namayingo	\$ 1.185	\$ 252	\$ 12.825	\$ 2,731
111	Pallisa	\$ 0.166	\$ 151	\$ 1.972	\$ 1,787
112	Lira	\$ 0.366	\$ 273	\$ 4.836	\$ 3,611

Figura 6.9. Pérdida anual esperada (P_{AE}) en inmuebles - Uganda

De la *Figura 6.7* a la *Figura 6.9* se presenta la pérdida anual esperada, P_{AE}, en inmuebles para los países de Etiopía, Kenia y Uganda detallada por localidad administrativa nivel 1. En ellas, se presenta la pérdida monetaria en millones de dólares y la pérdida por km² de cada una de las localidades. Inicialmente, se pensaría que las mayores pérdidas se presentan en las capitales de cada uno de los países. Sin embargo, dichas capitales suelen ser ciudades pequeñas en extensión y, por lo tanto, las pérdidas pueden ser menores comparadas con localidades mucho más extensas. Este es el caso de Kenia, donde su capital, Nairobi, reporta pérdidas por 20 millones de dólares, mientras que el Valle del Rift alcanza los 22 millones de dólares. No obstante, al calcular las pérdidas por km², las capitales de cada país son las localidades que reportan las mayores pérdidas superando los 10,000 dólares por km² de área.

Por otro lado, erróneamente se cree que donde existen mayores niveles de amenaza se presentarán altos niveles de pérdida. Se debe recordar que el cálculo del riesgo no sólo depende de la amenaza, en él participan factores adicionales como la vulnerabilidad de las estructuras y la distribución de los bienes expuestos, los cuales influyen altamente en los resultados de las pérdidas. En la *Figura 6.10* se presenta la pérdida anual esperada en los tres países y la aceleración pico del suelo para un periodo de retorno de 475 años. En ella, se puede observar que no necesariamente donde hay mayores aceleraciones se presentan las mayores pérdidas, es el caso de la Depresión de Afar y el Rift de Etiopía, donde, a pesar de los altos niveles de amenaza, las pérdidas se mantienen en un nivel medio. En cambio, zonas como la Rama Este del EARS, donde la amenaza es baja, se presentan altos niveles de pérdidas. Lo anterior, invita a reflexionar a que el cálculo del riesgo es un análisis integral y que la determinación de la amenaza no es un indicador de pérdidas.

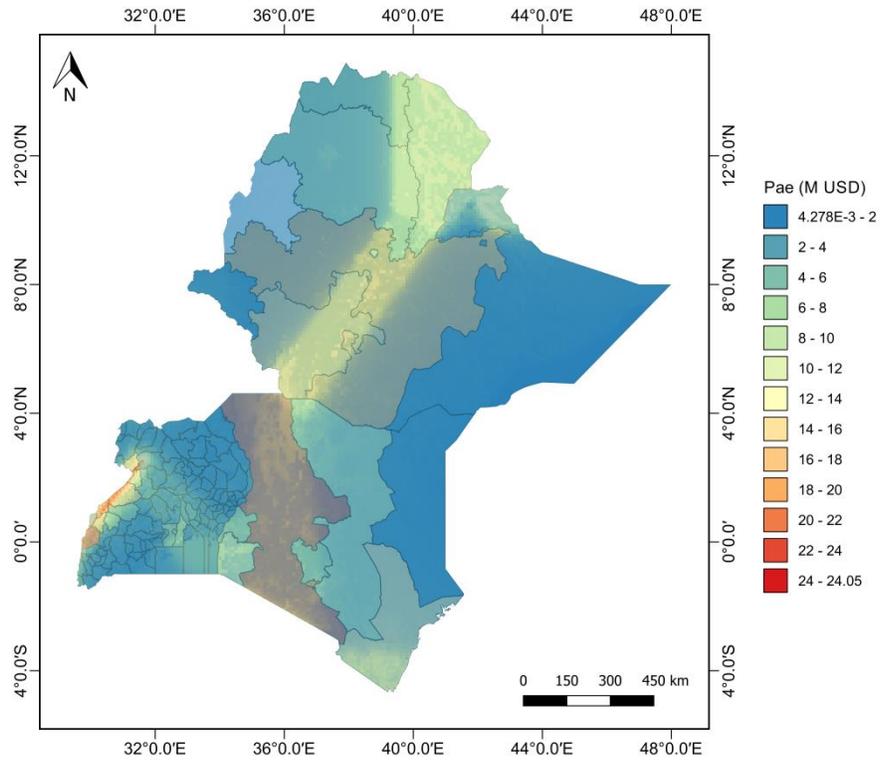
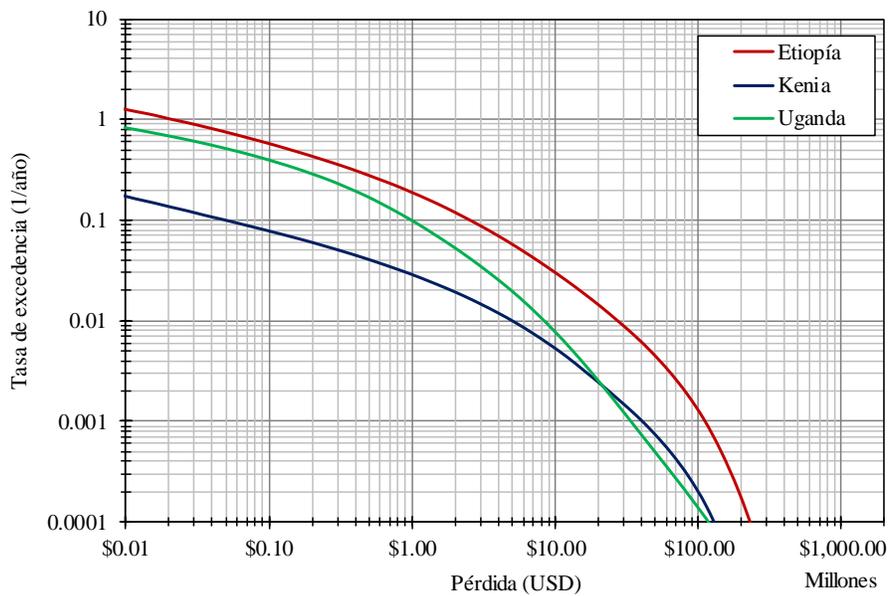
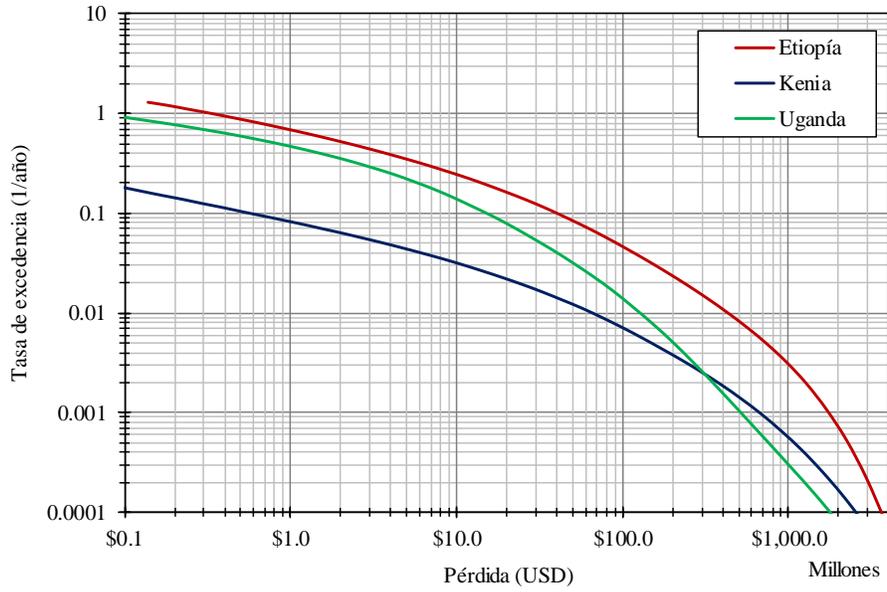


Figura 6.10. Pérdida anual esperada (P_{AE}) en inmuebles y PGA para $Tr = 475$ años

6.4.2. Centros de Salud

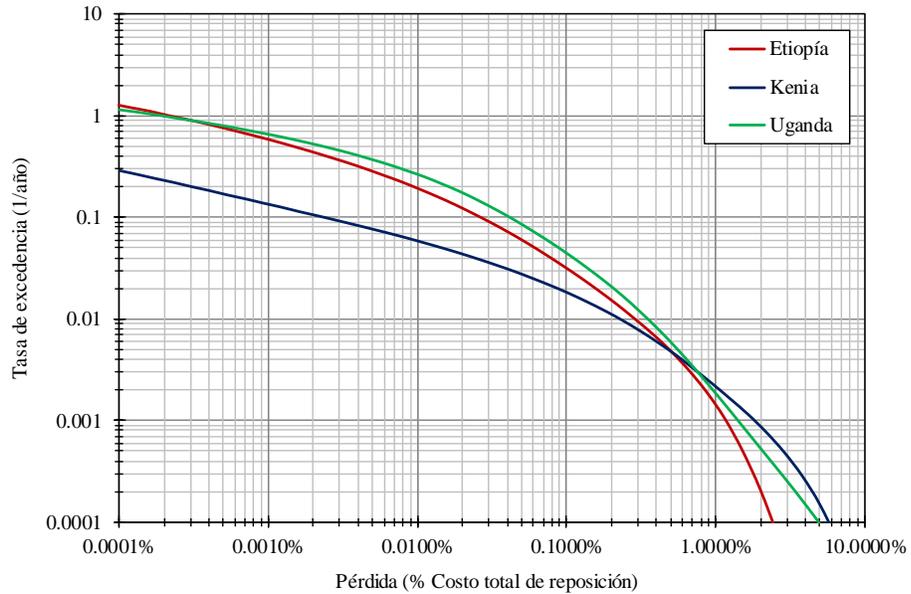


(a)

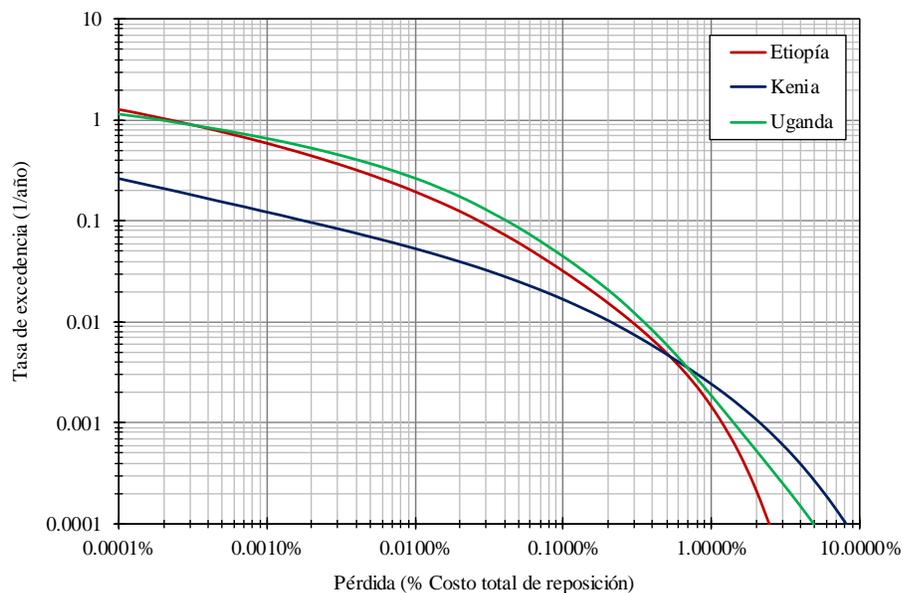


(b)

Figura 6.11. Curvas de tasa de excedencia de las pérdidas en centros de salud presentes en Etiopía, Kenia y Uganda: a) 2015; b) 2050



(a)



(b)

Figura 6.12. Curvas de tasa de excedencia de las pérdidas (% Costo total de reposición) en centros de salud presentes en Etiopía, Kenia y Uganda: a) 2015; b) 2050

Tabla 6.5. Pérdidas en centros de salud a nivel nacional para los diferentes periodos de retorno - Etiopía

Periodo de retorno (años)	Pérdida (Millones USD)	
	2015	2050
10	\$ 2.56	\$ 40.29
25	\$ 7.54	\$ 117.27
50	\$ 15.06	\$ 234.56
100	\$ 27.70	\$ 432.53
250	\$ 54.15	\$ 842.90
500	\$ 81.50	\$ 1,270.10
1000	\$ 112.63	\$ 1,742.24

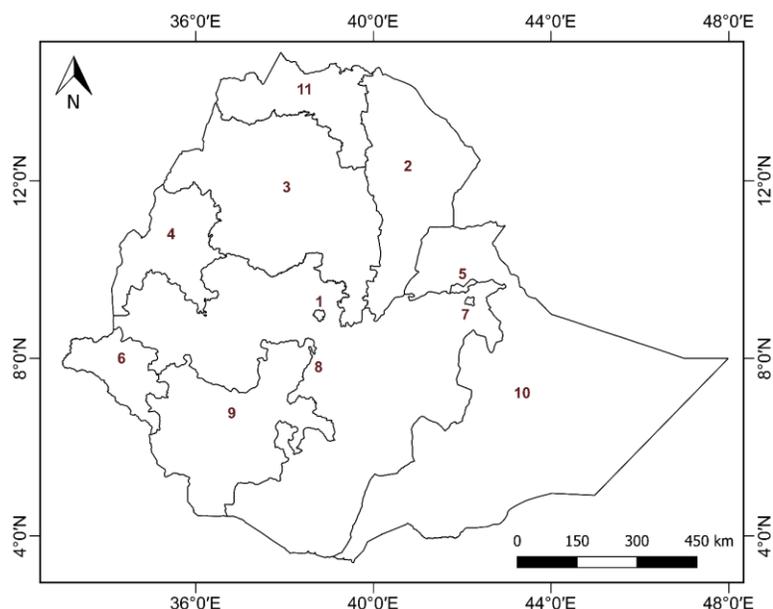
Tabla 6.6. Pérdidas en centros de salud a nivel nacional para los diferentes periodos de retorno - Kenia

Periodo de retorno (años)	Pérdida (Millones USD)	
	2015	2050
10	\$ 0.05	\$ 0.58
25	\$ 0.53	\$ 6.21
50	\$ 1.92	\$ 23.60
100	\$ 5.04	\$ 65.83
250	\$ 13.09	\$ 189.01
500	\$ 23.60	\$ 374.35
1000	\$ 40.27	\$ 664.34

Tabla 6.7. Pérdidas en centros de salud a nivel nacional para los diferentes periodos de retorno - Uganda

Periodo de retorno (años)	Pérdida (Millones USD)	
	2015	2050
10	\$ 1.01	\$ 15.39
25	\$ 2.76	\$ 40.87
50	\$ 5.21	\$ 75.93
100	\$ 8.90	\$ 128.03
250	\$ 16.30	\$ 233.11
500	\$ 24.47	\$ 352.64
1000	\$ 36.05	\$ 516.55

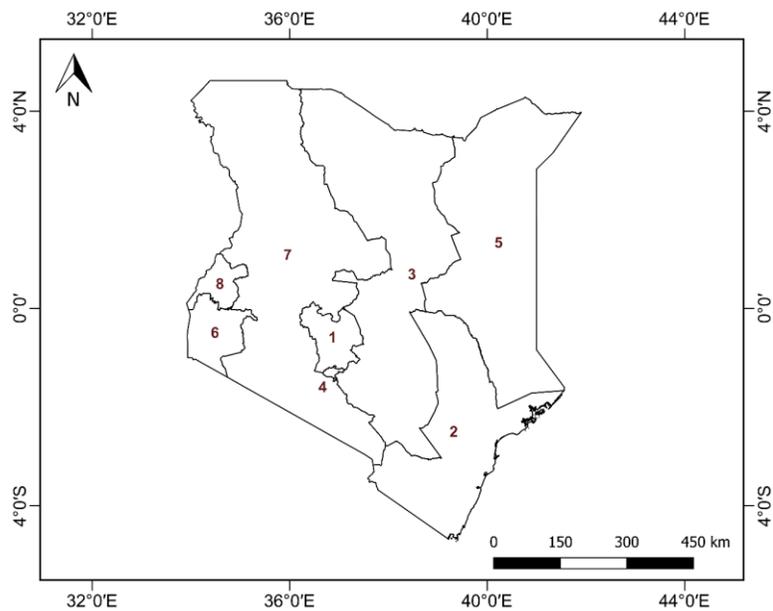
Diferente a lo que se presentó en los inmuebles, donde Etiopía resultó con las pérdidas más bajas, en el caso de los centros de salud es el país que reporta las pérdidas más altas sobrepasando los 81 millones de dólares para un periodo de retorno de 500 años. Sin embargo, al realizar la división por el costo total de reposición, se observa que es el país con el menor porcentaje de pérdidas, 0.84 %. Claramente se puede ver que las pérdidas en los centros de salud son menores a las de los inmuebles, lo cual es lógico ya que existe una menor cantidad de centros de salud comparado el número de viviendas. Lo anterior también se ve reflejado en que las pérdidas no superan el 8 % del costo de reposición total, mientras que en los inmuebles casi llegan al 10 %.



ID	Localidad	2015		2050	
		P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)	P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)
1	Addis Ababa	\$ 0.092	\$ 168	\$ 1.444	\$ 2,627
2	Afar	\$ 0.366	\$ 4	\$ 5.788	\$ 59
3	Amhara	\$ 0.082	\$ 1	\$ 1.192	\$ 7
4	Beneshangul Gumu	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.000	\$ 0
5	Dire Dawa	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.003	\$ 3
6	Gambela	\$ 0.001	\$ 0	\$ 0.009	\$ 0
7	Hareri	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.002	\$ 6
8	Oromia	\$ 0.302	\$ 1	\$ 4.713	\$ 14
9	SNNPR ¹	\$ 0.614	\$ 6	\$ 9.579	\$ 87
10	Somali	\$ 0.063	\$ 0	\$ 0.986	\$ 3
11	Tigray	\$ 0.081	\$ 2	\$ 1.270	\$ 24

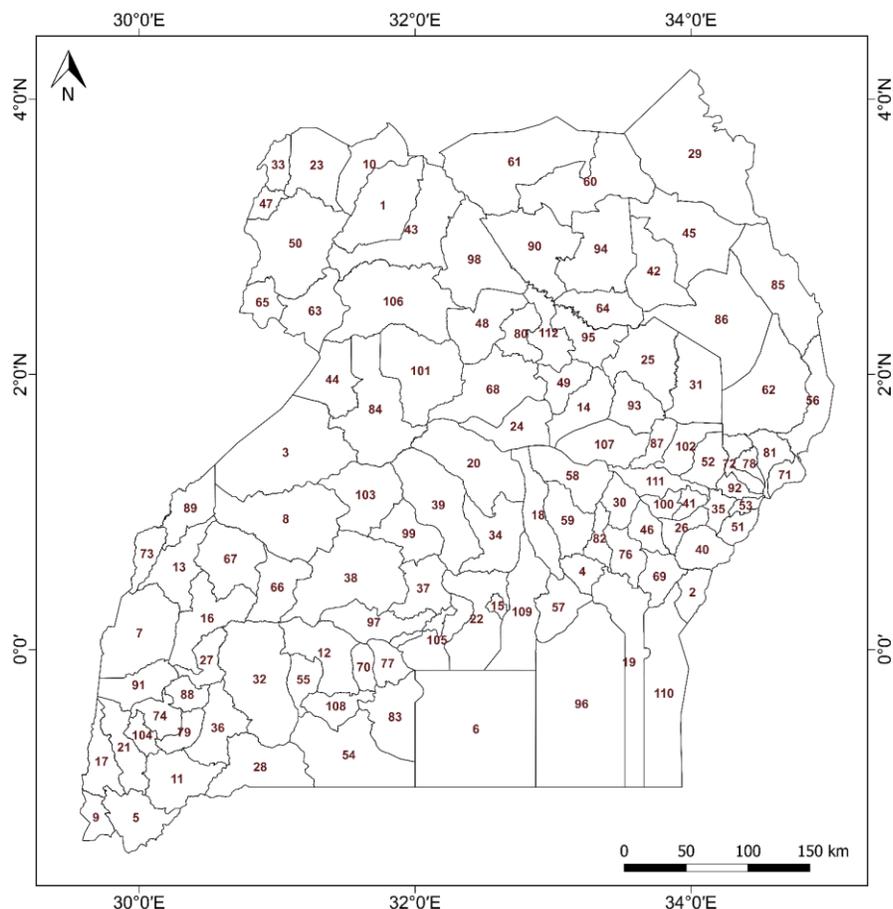
¹ Naciones, Nacionalidades y Pueblos del Sur

Figura 6.13. Pérdida anual esperada (P_{AE}) en centros de salud - Etiopía



ID	Localidad	2015		2050	
		P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)	P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)
1	Central	\$ 0.033	\$ 3	\$ 0.286	\$ 22
2	Coast	\$ 0.030	\$ 0	\$ 0.262	\$ 3
3	Eastern	\$ 0.002	\$ 0	\$ 0.014	\$ 0
4	Nairobi	\$ 0.045	\$ 65	\$ 0.391	\$ 557
5	North Eastern	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.001	\$ 0
6	Nyanza	\$ 0.040	\$ 2	\$ 0.766	\$ 47
7	Rift Valley	\$ 0.039	\$ 0	\$ 0.341	\$ 2
8	Western	\$ 0.065	\$ 8	\$ 1.819	\$ 216

Figura 6.14. Pérdida anual esperada (P_{AE}) en centros de salud - Kenia



ID	Localidad	2015		2050	
		P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)	P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)
1	Adjumani	\$ 0.001	\$ 0	\$ 0.010	\$ 3
2	Busia	\$ 0.002	\$ 2	\$ 0.023	\$ 28
3	Hoima	\$ 0.032	\$ 5	\$ 0.472	\$ 82
4	Jinja	\$ 0.011	\$ 16	\$ 0.133	\$ 181
5	Kabale	\$ 0.002	\$ 1	\$ 0.030	\$ 17
6	Kalangala	\$ 0.001	\$ 0	\$ 0.010	\$ 1
7	Kasese	\$ 0.053	\$ 16	\$ 0.794	\$ 234
8	Kibaale	\$ 0.005	\$ 1	\$ 0.081	\$ 18
9	Kisoro	\$ 0.012	\$ 17	\$ 0.192	\$ 284
10	Moyo	\$ 0.001	\$ 1	\$ 0.021	\$ 11
11	Ntungamo	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.007	\$ 3
12	Ssembabule	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.001	\$ 1
13	Kabarole	\$ 0.037	\$ 20	\$ 0.555	\$ 304
14	Kaberamaido	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.007	\$ 4
15	Kampala	\$ 0.045	\$ 231	\$ 0.674	\$ 3,441
16	Kamwenge	\$ 0.006	\$ 3	\$ 0.093	\$ 38
17	Kanungu	\$ 0.007	\$ 5	\$ 0.099	\$ 76
18	Kayunga	\$ 0.001	\$ 1	\$ 0.022	\$ 12
19	Mayuge	\$ 0.013	\$ 4	\$ 0.186	\$ 54
20	Nakasongola	\$ 0.006	\$ 2	\$ 0.084	\$ 24
21	Rukungiri	\$ 0.004	\$ 2	\$ 0.057	\$ 38
22	Wakiso	\$ 0.010	\$ 4	\$ 0.154	\$ 54
23	Yumbe	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.006	\$ 3
24	Amolatar	\$ 0.003	\$ 2	\$ 0.048	\$ 27
25	Amuria	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.002	\$ 1

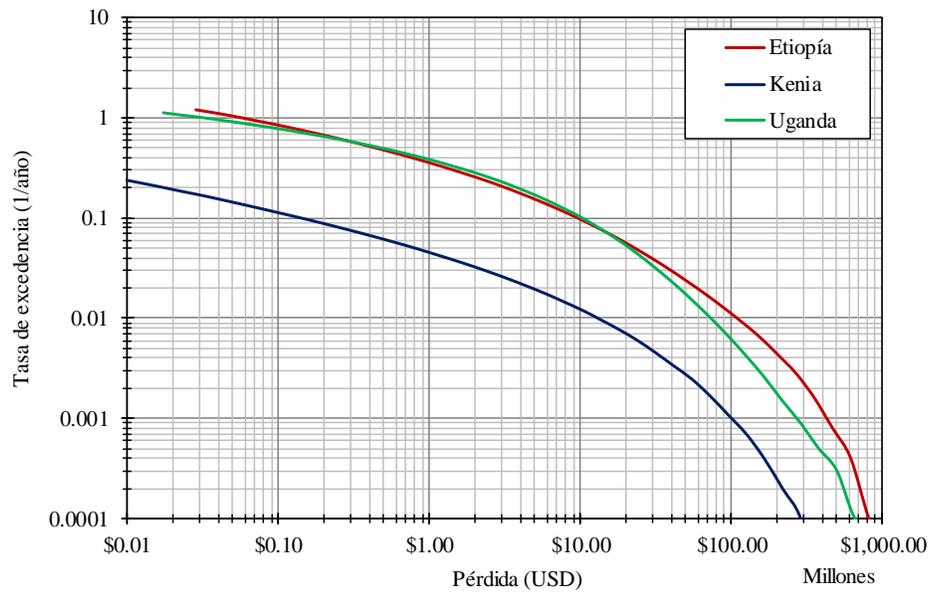
ID	Localidad	2015		2050	
		P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)	P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)
26	Butaleja	\$ 0.000	\$ 1	\$ 0.007	\$ 10
27	Ibanda	\$ 0.001	\$ 1	\$ 0.019	\$ 20
28	Isingiro	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.000	\$ 0
29	Kaabong	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.003	\$ 0
30	Kaliro	\$ 0.001	\$ 1	\$ 0.010	\$ 12
31	Katakwi	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.003	\$ 1
32	Kiruhura	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.001	\$ 0
33	Koboko	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.001	\$ 1
34	Luwero	\$ 0.012	\$ 5	\$ 0.178	\$ 80
35	Mbale	\$ 0.000	\$ 1	\$ 0.008	\$ 15
36	Mbarara	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.004	\$ 2
37	Mityana	\$ 0.001	\$ 1	\$ 0.020	\$ 13
38	Mubende	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.006	\$ 1
39	Nakaseke	\$ 0.005	\$ 1	\$ 0.069	\$ 20
40	Tororo	\$ 0.004	\$ 3	\$ 0.022	\$ 18
41	Budaka	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.001	\$ 3
42	Abim	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.000	\$ 0
43	Amuru	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.005	\$ 1
44	Buliisa	\$ 0.012	\$ 6	\$ 0.174	\$ 89
45	Kotido	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.001	\$ 0
46	Namutumba	\$ 0.003	\$ 3	\$ 0.039	\$ 47
47	Maracha	\$ 0.001	\$ 1	\$ 0.012	\$ 24
48	Oyam	\$ 0.001	\$ 0	\$ 0.012	\$ 5
49	Dokolo	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.005	\$ 4
50	Arua	\$ 0.002	\$ 0	\$ 0.024	\$ 5
51	Manafwa	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.004	\$ 7
52	Bukedea	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.005	\$ 5
53	Bududa	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.000	\$ 1
54	Rakai	\$ 0.002	\$ 0	\$ 0.028	\$ 7
55	Lyantonde	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.001	\$ 2
56	Amudat	\$ 0.001	\$ 0	\$ 0.008	\$ 5
57	Buikwe	\$ 0.003	\$ 2	\$ 0.041	\$ 28
58	Buyende	\$ 0.003	\$ 2	\$ 0.063	\$ 33
59	Kamuli	\$ 0.006	\$ 4	\$ 0.081	\$ 52
60	Kitgum	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.001	\$ 0
61	Lamwo	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.001	\$ 0
62	Nakapiripirit	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.001	\$ 0
63	Nebbi	\$ 0.109	\$ 54	\$ 1.580	\$ 783
64	Otuke	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.001	\$ 1
65	Zombo	\$ 0.001	\$ 1	\$ 0.018	\$ 20
66	Kyegegwa	\$ 0.001	\$ 0	\$ 0.012	\$ 7
67	Kyenjojo	\$ 0.014	\$ 6	\$ 0.179	\$ 76
68	Apac	\$ 0.005	\$ 1	\$ 0.064	\$ 20
69	Bugiri	\$ 0.006	\$ 5	\$ 0.098	\$ 92
70	Bukomansimbi	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.001	\$ 2
71	Bukwo	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.002	\$ 3
72	Bulambuli	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.000	\$ 0
73	Bundibugyo	\$ 0.008	\$ 10	\$ 0.123	\$ 146
74	Bushenyi	\$ 0.001	\$ 1	\$ 0.008	\$ 9
75	Butambala	\$ 0.000	\$ 1	\$ 0.018	\$ 44
76	Iganga	\$ 0.011	\$ 11	\$ 0.123	\$ 120
77	Kalungu	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.002	\$ 2
78	Kapchorwa	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.000	\$ 1
79	Sheema	\$ 0.000	\$ 1	\$ 0.006	\$ 9
80	Kole	\$ 0.001	\$ 0	\$ 0.009	\$ 9
81	Kween	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.001	\$ 1
82	Luuka	\$ 0.001	\$ 1	\$ 0.028	\$ 43
83	Masaka	\$ 0.001	\$ 0	\$ 0.004	\$ 2
84	Masindi	\$ 0.003	\$ 1	\$ 0.034	\$ 9
85	Moroto	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.002	\$ 0

ID	Localidad	2015		2050	
		P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)	P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)
86	Napak	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.004	\$ 1
87	Ngora	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.000	\$ 1
88	Buhweju	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.005	\$ 7
89	Ntoroko	\$ 0.035	\$ 24	\$ 0.661	\$ 442
90	Pader	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.003	\$ 1
91	Rubirizi	\$ 0.019	\$ 13	\$ 0.307	\$ 211
92	Sironko	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.000	\$ 1
93	Soroti	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.002	\$ 1
94	Agago	\$ 0.002	\$ 1	\$ 0.027	\$ 8
95	Alebtong	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.003	\$ 2
96	Buvuma	\$ 0.001	\$ 0	\$ 0.036	\$ 4
97	Gomba	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.005	\$ 3
98	Gulu	\$ 0.003	\$ 1	\$ 0.039	\$ 11
99	Kiboga	\$ 0.001	\$ 0	\$ 0.009	\$ 6
100	Kibuku	\$ 0.000	\$ 1	\$ 0.008	\$ 16
101	Kiryandongo	\$ 0.005	\$ 1	\$ 0.108	\$ 29
102	Kumi	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.001	\$ 1
103	Kyankwanzi	\$ 0.001	\$ 0	\$ 0.009	\$ 4
104	Mitooma	\$ 0.001	\$ 1	\$ 0.020	\$ 37
105	Mpigi	\$ 0.002	\$ 1	\$ 0.021	\$ 14
106	Nwoya	\$ 0.018	\$ 4	\$ 0.113	\$ 23
107	Serere	\$ 0.001	\$ 0	\$ 0.013	\$ 7
108	Lwengo	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.005	\$ 4
109	Mukono	\$ 0.002	\$ 1	\$ 0.036	\$ 12
110	Namayingo	\$ 0.009	\$ 2	\$ 0.101	\$ 22
111	Pallisa	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.003	\$ 3
112	Lira	\$ 0.001	\$ 1	\$ 0.011	\$ 8

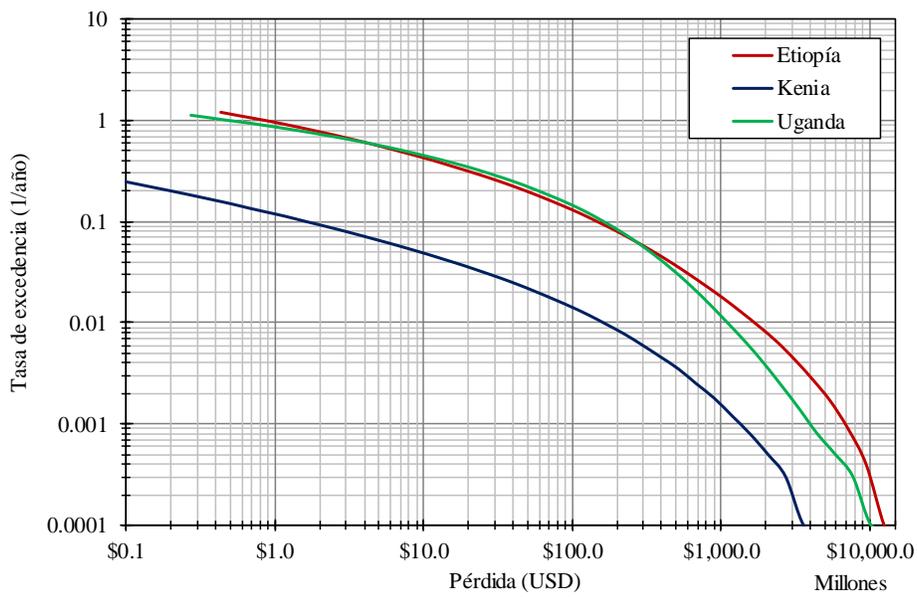
Figura 6.15. Pérdida anual esperada (P_{AE}) en centros de salud – Uganda

Al igual que en los inmuebles, en los centros de salud se presenta un caso muy similar en el que las capitales no reportan las mayores pérdidas monetarias, pero sí las pérdidas por unidad de área. En las capitales de Etiopía, Kenia y Uganda se reportan pérdidas muy por encima de las demás localidades, Etiopía presenta pérdidas de 168 dólares por km², Kenia reporta pérdidas de 65 dólares por km² y Uganda tiene pérdidas de 231 dólares por km². Además, se puede observar que la mayoría de localidades presentan pérdidas iguales a 0 dólares por km², esto se debe a que las pérdidas anuales esperadas son bajas (menos al millón de dólares) y el área de la localidad es muy grande, por lo tanto, al presentar la relación entre estos dos valores, el resultado es mínimo, prácticamente cero. Sin embargo, vale la pena presentar este tipo de resultado para destacar la desigualdad de las pérdidas en cada una de las capitales con respecto a las demás localidades de cada país.

6.4.3. Instituciones Educativas

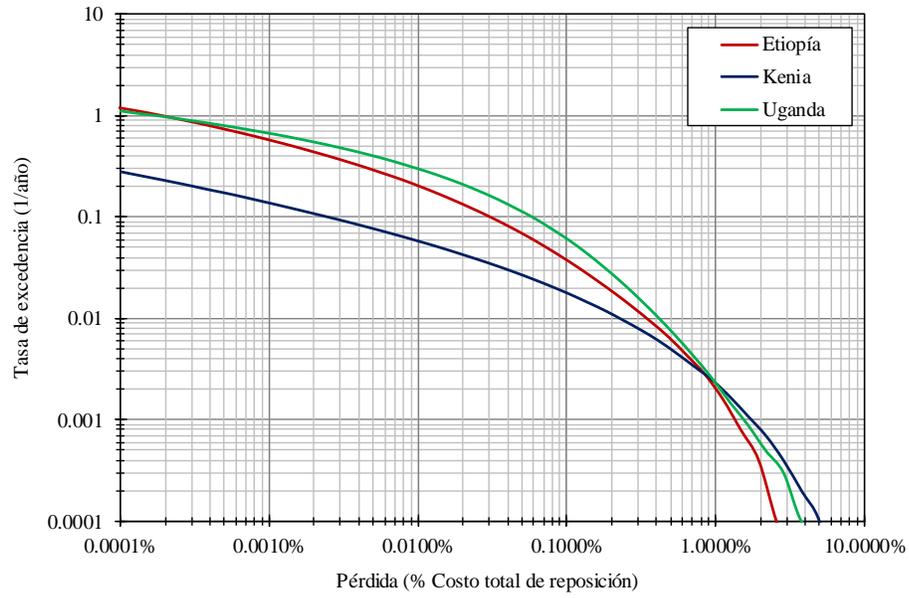


(a)

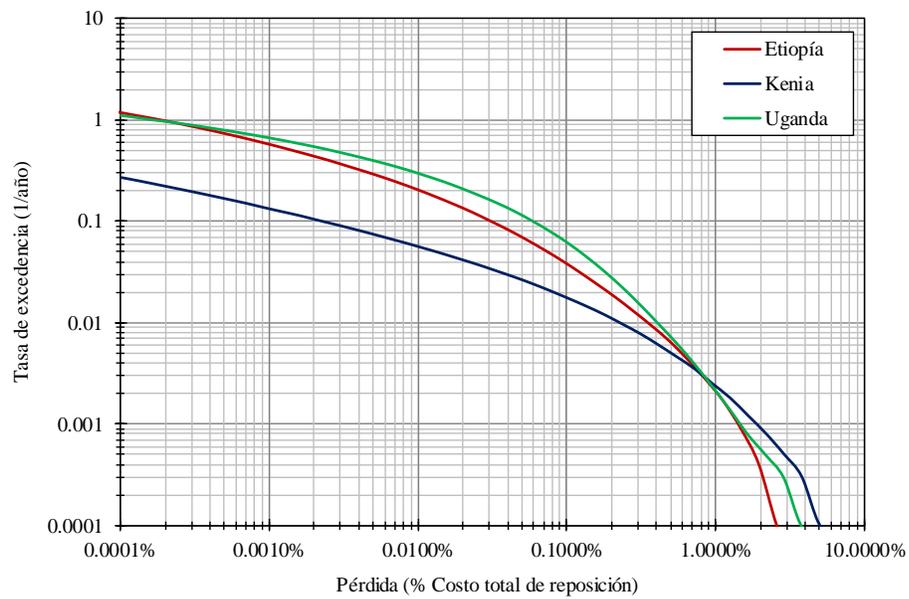


(b)

Figura 6.16. Curvas de tasa de excedencia de las pérdidas en instituciones educativas presentes en Etiopía, Kenia y Uganda: a) 2015; b) 2050



(a)



(b)

Figura 6.17. Curvas de tasa de excedencia de las pérdidas (% Costo total de reposición) en instituciones educativas presentes en Etiopía, Kenia y Uganda: a) 2015; b) 2050

Tabla 6.8. Pérdidas en instituciones educativas a nivel nacional para los diferentes periodos de retorno - Etiopía

Periodo de retorno (años)	Pérdida (Millones USD)	
	2015	2050
10	\$ 9.63	\$ 150.12
25	\$ 29.51	\$ 460.90
50	\$ 59.07	\$ 920.92
100	\$ 109.08	\$ 1,694.26
250	\$ 213.56	\$ 3,308.29
500	\$ 313.87	\$ 4,883.23
1000	\$ 428.63	\$ 6,682.11

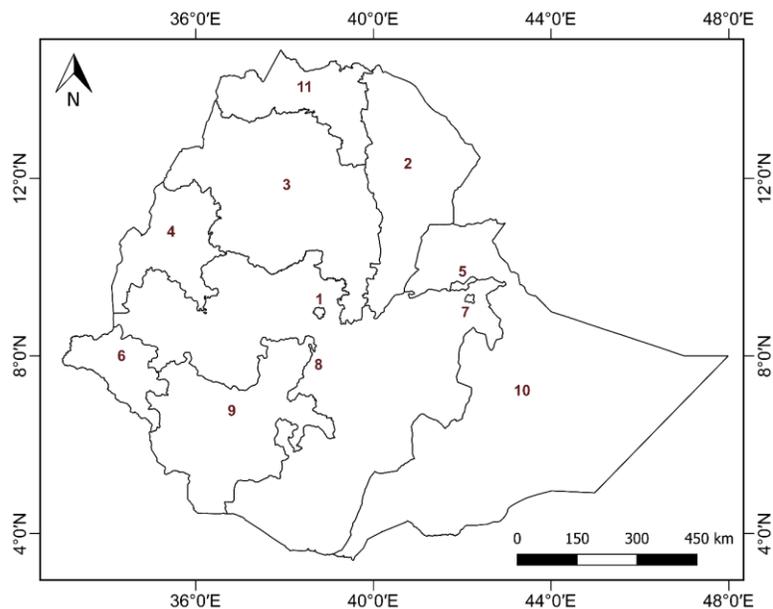
Tabla 6.9. Pérdidas en instituciones educativas a nivel nacional para los diferentes periodos de retorno - Kenia

Periodo de retorno (años)	Pérdida (Millones USD)	
	2015	2050
10	\$ 0.15	\$ 1.63
25	\$ 1.34	\$ 15.68
50	\$ 4.84	\$ 58.55
100	\$ 13.13	\$ 163.85
250	\$ 35.44	\$ 453.25
500	\$ 63.02	\$ 828.02
1000	\$ 100.80	\$ 1,351.40

Tabla 6.10. Pérdidas en instituciones educativas a nivel nacional para los diferentes periodos de retorno - Uganda

Periodo de retorno (años)	Pérdida (Millones USD)	
	2015	2050
10	\$ 10.29	\$ 162.90
25	\$ 25.73	\$ 407.38
50	\$ 44.65	\$ 695.54
100	\$ 72.77	\$ 1,115.24
250	\$ 128.37	\$ 1,943.74
500	\$ 186.40	\$ 2,821.77
1000	\$ 267.58	\$ 4,036.91

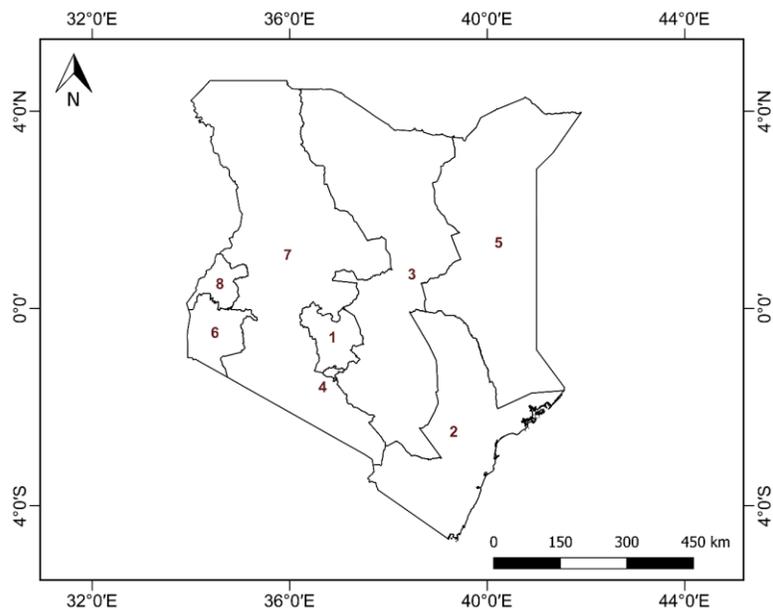
Las pérdidas en las instituciones educativas son mayores que en los centros de salud, pero menores que en los inmuebles. Para 500 años de periodo de retorno, Etiopía, Kenia y Uganda reportan pérdidas de 313, 63 y 186 millones de dólares, respectivamente.



ID	Localidad	2015		2050	
		P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)	P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)
1	Addis Ababa	\$ 0.523	\$ 952	\$ 8.177	\$ 14,876
2	Afar	\$ 1.310	\$ 13	\$ 20.690	\$ 211
3	Amhara	\$ 0.419	\$ 3	\$ 6.091	\$ 38
4	Beneshangul Gumu	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.000	\$ 0
5	Dire Dawa	\$ 0.001	\$ 1	\$ 0.017	\$ 16
6	Gambela	\$ 0.002	\$ 0	\$ 0.028	\$ 1
7	Hareri	\$ 0.000	\$ 1	\$ 0.006	\$ 15
8	Oromia	\$ 1.319	\$ 4	\$ 20.571	\$ 63
9	SNNPR ¹	\$ 1.823	\$ 17	\$ 28.434	\$ 259
10	Somali	\$ 0.152	\$ 0	\$ 2.396	\$ 8
11	Tigray	\$ 0.546	\$ 10	\$ 8.562	\$ 159

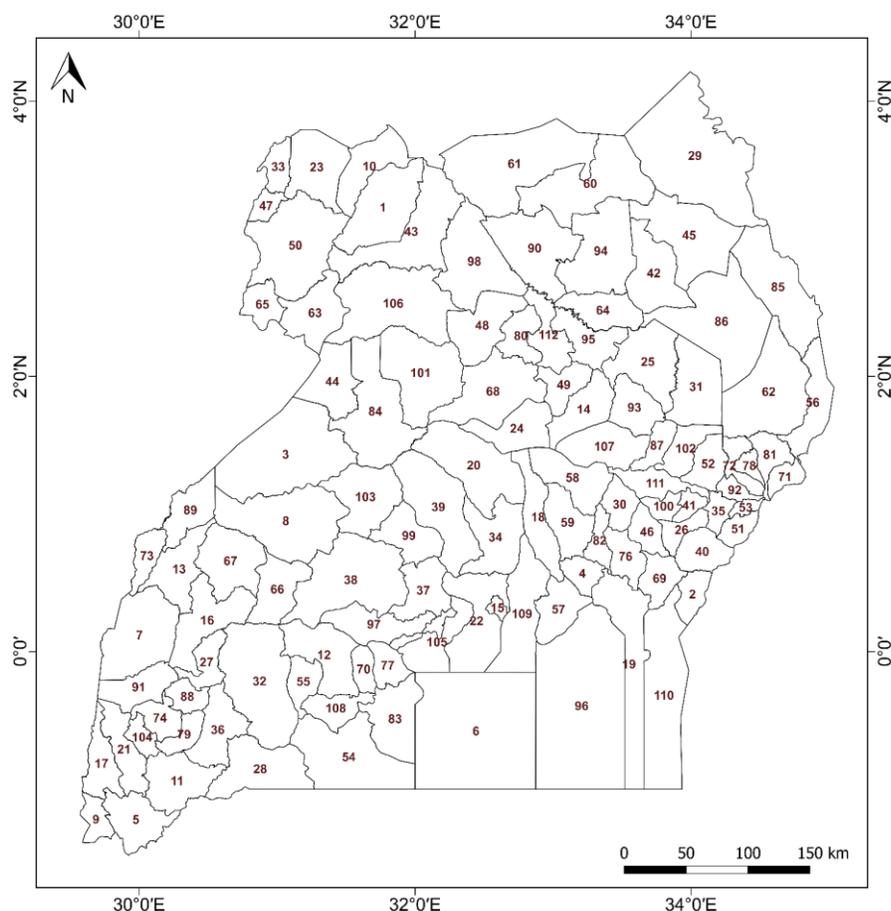
¹ Naciones, Nacionalidades y Pueblos del Sur

Figura 6.18. Pérdida anual esperada (P_{AE}) en instituciones educativas - Etiopía



ID	Localidad	2015		2050	
		P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)	P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)
1	Central	\$ 0.059	\$ 4	\$ 0.505	\$ 38
2	Coast	\$ 0.041	\$ 0	\$ 0.356	\$ 4
3	Eastern	\$ 0.009	\$ 0	\$ 0.073	\$ 0
4	Nairobi	\$ 0.049	\$ 70	\$ 0.424	\$ 605
5	North Eastern	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.000	\$ 0
6	Nyanza	\$ 0.164	\$ 10	\$ 3.183	\$ 194
7	Rift Valley	\$ 0.266	\$ 1	\$ 2.291	\$ 13
8	Western	\$ 0.054	\$ 6	\$ 1.496	\$ 178

Figura 6.19. Pérdida anual esperada (P_{AE}) en instituciones educativas - Kenia



ID	Localidad	2015		2050	
		P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)	P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)
1	Adjumani	\$ 0.002	\$ 1	\$ 0.029	\$ 9
2	Busia	\$ 0.029	\$ 35	\$ 0.427	\$ 527
3	Hoima	\$ 0.372	\$ 65	\$ 5.543	\$ 962
4	Jinja	\$ 0.046	\$ 63	\$ 0.537	\$ 733
5	Kabale	\$ 0.016	\$ 9	\$ 0.244	\$ 139
6	Kalangala	\$ 0.005	\$ 0	\$ 0.066	\$ 7
7	Kasese	\$ 0.364	\$ 108	\$ 5.479	\$ 1,618
8	Kibaale	\$ 0.123	\$ 28	\$ 1.834	\$ 416
9	Kisoro	\$ 0.133	\$ 197	\$ 2.193	\$ 3,244
10	Moyo	\$ 0.009	\$ 5	\$ 0.137	\$ 74
11	Ntungamo	\$ 0.016	\$ 8	\$ 0.232	\$ 112
12	Ssembabule	\$ 0.003	\$ 1	\$ 0.042	\$ 18
13	Kabarole	\$ 0.464	\$ 254	\$ 6.979	\$ 3,823
14	Kaberamaido	\$ 0.006	\$ 4	\$ 0.090	\$ 55
15	Kampala	\$ 0.114	\$ 584	\$ 1.704	\$ 8,705
16	Kamwenge	\$ 0.060	\$ 25	\$ 0.882	\$ 364
17	Kanungu	\$ 0.037	\$ 28	\$ 0.556	\$ 426
18	Kayunga	\$ 0.049	\$ 28	\$ 0.719	\$ 414
19	Mayuge	\$ 0.120	\$ 35	\$ 1.775	\$ 512
20	Nakasongola	\$ 0.052	\$ 15	\$ 0.775	\$ 219
21	Rukungiri	\$ 0.025	\$ 16	\$ 0.378	\$ 250
22	Wakiso	\$ 0.153	\$ 54	\$ 2.279	\$ 806
23	Yumbe	\$ 0.004	\$ 2	\$ 0.061	\$ 26
24	Amolatar	\$ 0.021	\$ 12	\$ 0.306	\$ 173
25	Amuria	\$ 0.001	\$ 0	\$ 0.014	\$ 5

ID	Localidad	2015		2050	
		P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)	P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)
26	Butaleja	\$ 0.009	\$ 14	\$ 0.141	\$ 214
27	Ibanda	\$ 0.010	\$ 11	\$ 0.156	\$ 161
28	Isingiro	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.007	\$ 3
29	Kaabong	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.006	\$ 1
30	Kaliro	\$ 0.021	\$ 23	\$ 0.306	\$ 350
31	Katakwi	\$ 0.001	\$ 1	\$ 0.018	\$ 7
32	Kiruhura	\$ 0.010	\$ 2	\$ 0.151	\$ 33
33	Koboko	\$ 0.001	\$ 1	\$ 0.013	\$ 18
34	Luwero	\$ 0.086	\$ 38	\$ 1.282	\$ 574
35	Mbale	\$ 0.002	\$ 4	\$ 0.064	\$ 122
36	Mbarara	\$ 0.003	\$ 2	\$ 0.041	\$ 23
37	Mityana	\$ 0.011	\$ 7	\$ 0.169	\$ 106
38	Mubende	\$ 0.006	\$ 1	\$ 0.091	\$ 20
39	Nakaseke	\$ 0.039	\$ 11	\$ 0.581	\$ 166
40	Tororo	\$ 0.016	\$ 13	\$ 0.087	\$ 71
41	Budaka	\$ 0.002	\$ 4	\$ 0.037	\$ 89
42	Abim	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.000	\$ 0
43	Amuru	\$ 0.001	\$ 0	\$ 0.022	\$ 6
44	Buliisa	\$ 0.201	\$ 103	\$ 3.003	\$ 1,542
45	Kotido	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.002	\$ 1
46	Namutumba	\$ 0.026	\$ 32	\$ 0.396	\$ 482
47	Maracha	\$ 0.004	\$ 8	\$ 0.065	\$ 134
48	Oyam	\$ 0.019	\$ 9	\$ 0.281	\$ 127
49	Dokolo	\$ 0.004	\$ 4	\$ 0.060	\$ 56
50	Arua	\$ 0.015	\$ 3	\$ 0.221	\$ 50
51	Manafwa	\$ 0.003	\$ 5	\$ 0.058	\$ 96
52	Bukedea	\$ 0.003	\$ 3	\$ 0.051	\$ 48
53	Bududa	\$ 0.001	\$ 5	\$ 0.017	\$ 68
54	Rakai	\$ 0.005	\$ 1	\$ 0.072	\$ 17
55	Lyantonde	\$ 0.001	\$ 2	\$ 0.021	\$ 23
56	Amudat	\$ 0.001	\$ 0	\$ 0.011	\$ 6
57	Buikwe	\$ 0.027	\$ 19	\$ 0.386	\$ 264
58	Buyende	\$ 0.036	\$ 19	\$ 0.792	\$ 418
59	Kamuli	\$ 0.051	\$ 33	\$ 0.675	\$ 436
60	Kitgum	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.004	\$ 1
61	Lamwo	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.005	\$ 1
62	Nakapiripirit	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.006	\$ 1
63	Nebbi	\$ 0.434	\$ 215	\$ 6.309	\$ 3,126
64	Otuke	\$ 0.001	\$ 0	\$ 0.005	\$ 4
65	Zombo	\$ 0.017	\$ 19	\$ 0.286	\$ 316
66	Kyegegwa	\$ 0.006	\$ 3	\$ 0.117	\$ 66
67	Kyenjojo	\$ 0.157	\$ 66	\$ 2.075	\$ 877
68	Apac	\$ 0.035	\$ 11	\$ 0.463	\$ 141
69	Bugiri	\$ 0.045	\$ 42	\$ 0.755	\$ 713
70	Bukomansimbi	\$ 0.000	\$ 1	\$ 0.009	\$ 14
71	Bukwo	\$ 0.001	\$ 1	\$ 0.012	\$ 22
72	Bulambuli	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.003	\$ 4
73	Bundibugyo	\$ 0.128	\$ 152	\$ 1.853	\$ 2,201
74	Bushenyi	\$ 0.009	\$ 10	\$ 0.098	\$ 108
75	Butambala	\$ 0.003	\$ 7	\$ 0.100	\$ 245
76	Iganga	\$ 0.057	\$ 56	\$ 0.647	\$ 630
77	Kalungu	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.009	\$ 11
78	Kapchorwa	\$ 0.000	\$ 1	\$ 0.002	\$ 7
79	Sheema	\$ 0.008	\$ 12	\$ 0.118	\$ 167
80	Kole	\$ 0.004	\$ 3	\$ 0.063	\$ 58
81	Kween	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.006	\$ 7
82	Luuka	\$ 0.015	\$ 24	\$ 0.515	\$ 788
83	Masaka	\$ 0.011	\$ 5	\$ 0.081	\$ 37
84	Masindi	\$ 0.054	\$ 14	\$ 0.650	\$ 164
85	Moroto	\$ 0.001	\$ 0	\$ 0.009	\$ 2

ID	Localidad	2015		2050	
		P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)	P _{AE} (M USD)	P _{AE} / Área (USD / km ²)
86	Napak	\$ 0.000	\$ 0	\$ 0.009	\$ 2
87	Ngora	\$ 0.001	\$ 1	\$ 0.014	\$ 20
88	Buhweju	\$ 0.002	\$ 2	\$ 0.026	\$ 38
89	Ntoroko	\$ 0.727	\$ 486	\$ 13.677	\$ 9,145
90	Pader	\$ 0.001	\$ 0	\$ 0.014	\$ 4
91	Rubirizi	\$ 0.074	\$ 51	\$ 1.218	\$ 840
92	Sironko	\$ 0.001	\$ 2	\$ 0.010	\$ 24
93	Soroti	\$ 0.002	\$ 1	\$ 0.018	\$ 13
94	Agago	\$ 0.004	\$ 1	\$ 0.060	\$ 17
95	Alebtong	\$ 0.001	\$ 1	\$ 0.019	\$ 12
96	Buvuma	\$ 0.017	\$ 2	\$ 0.694	\$ 72
97	Gomba	\$ 0.004	\$ 2	\$ 0.073	\$ 43
98	Gulu	\$ 0.006	\$ 2	\$ 0.089	\$ 26
99	Kiboga	\$ 0.013	\$ 8	\$ 0.192	\$ 120
100	Kibuku	\$ 0.002	\$ 5	\$ 0.066	\$ 134
101	Kiryandongo	\$ 0.041	\$ 11	\$ 0.892	\$ 244
102	Kumi	\$ 0.002	\$ 1	\$ 0.020	\$ 18
103	Kyankwanzi	\$ 0.013	\$ 5	\$ 0.192	\$ 78
104	Mitooma	\$ 0.007	\$ 13	\$ 0.207	\$ 378
105	Mpigi	\$ 0.011	\$ 7	\$ 0.113	\$ 73
106	Nwoya	\$ 0.030	\$ 6	\$ 0.186	\$ 39
107	Serere	\$ 0.015	\$ 8	\$ 0.344	\$ 174
108	Lwengo	\$ 0.004	\$ 4	\$ 0.084	\$ 82
109	Mukono	\$ 0.066	\$ 23	\$ 0.994	\$ 349
110	Namayingo	\$ 0.050	\$ 11	\$ 0.541	\$ 115
111	Pallisa	\$ 0.008	\$ 7	\$ 0.090	\$ 82
112	Lira	\$ 0.005	\$ 4	\$ 0.068	\$ 51

Figura 6.20. Pérdida anual esperada (P_{AE}) en instituciones educativas - Uganda

Nuevamente, las mayores pérdidas por km² de área se presentan en ciudades capitales. Posiblemente, este suceso se repite en los tres escenarios por el hecho que en las capitales siempre se concentran los centros administrativos y las grandes empresas de una nación, aumentando de esta manera el valor monetario expuesto.

CONCLUSIONES

Se logró construir un modelo de sismicidad para la zona del Sub-Sahara Africano cubierta por los países de Etiopía, Kenia y Uganda, en el cual se definió un catálogo sísmico completo y actualizado conformado por 999 registros sísmicos y 12 fuentes sísmicas. Adicionalmente, se logró cuantificar los efectos de sitio presentes en la región por medio de mediciones indirectas del parámetro V_{s30} .

Se llevó a cabo un análisis de amenaza sísmica para 8 periodos estructurales (incluido el PGA) y 8 periodos de retorno. Como primera impresión, los resultados obtenidos fueron congruentes con lo reportado en la literatura y estudios previos a éste, donde manifiestan la notable actividad sísmica presente en las regiones del EARS, tales como la Depresión de Afar, el Rift de Etiopía y la rama oeste de la misma formación. Adicionalmente, se logró demostrar que la inclusión de los efectos de sitio sí tuvo impacto en los resultados de aceleración del terreno, los cuales sufrieron aumentos y disminuciones en la intensidad.

Para un periodo de retorno de 475 años (el cual es muy utilizado en análisis de amenaza ya que corresponde al 10 % de probabilidad de excedencia en 50 años de exposición) se determinó que la máxima aceleración se encuentra en la zona f, localizada en la rama oeste del sistema EARS. El valor obtenido fue de 1,475 gal y está asociado a un periodo estructural de 0.5 s, que, si se compara con el valor correspondiente al PGA del mismo periodo estructural, es mucho mayor, 500 gal. También vale la pena resaltar las aceleraciones que se presentan dentro de la zona b, particularmente para $T=0.3$ s, cuyo máximo fue aproximadamente de 870 gal. Independientemente del periodo estructural, las zonas b, d y f presentaron los niveles más altos de amenaza, lo cual era de esperarse, debido a que se encuentran localizadas en regiones caracterizadas por ser tectónicamente activas, la Depresión de Afar, el Rift de Etiopía y la rama oeste del sistema EARS, respectivamente. Por otro lado, los periodos estructurales superiores, 1.5 y 2.0 s, reportaron los niveles más bajos de aceleración, menores a 150 gal, lo cual coincide con el espectro de respuesta propuesto por Spudich et al., (1999), en el cual las máximas aceleraciones se presentan en los periodos cercanos a 0.3 y 0.5 s y las más bajas para los periodos superiores.

En los inmuebles, Etiopía siempre presentó los menores índices de pérdidas a pesar de tener zonas consideradas sísmicamente activas, como lo son la Depresión de Afar y el Rift de Etiopía. Por el contrario, Kenia posee los valores más altos de los tres países en consideración. Tomando como base los 500 años de periodo de retorno, muy cercano a los 475 años que se hace referencia en los resultados de amenaza, se encuentra que Etiopía presenta pérdidas por 2,956 y 45,949 millones de dólares para el 2015 y 2050, respectivamente. Calculando la proporción con el producto interno bruto (ver *Tabla 4.1*), dichas pérdidas son del 4.8 % en el 2015 y 5.13 % en el 2050. También se determinó la pérdida anual esperada (P_{AE}) por localidad de cada uno de los países; se pensaría que las mayores pérdidas se presentan en las capitales de cada uno de los países. Sin embargo, dichas capitales suelen ser ciudades pequeñas en extensión y, por lo tanto, las pérdidas pueden ser menores comparadas con localidades mucho más extensas. Este es el caso de Kenia, donde su capital, Nairobi, reporta pérdidas por 20 millones de dólares, mientras que el Valle del Rift alcanza los 22 millones de dólares. No obstante, al calcular las pérdidas por km^2 , las capitales de cada país son las localidades que reportan las mayores pérdidas superando los 10,000 dólares por km^2 de área. Por otro lado, las pérdidas presentes en centros de salud (conservando los mismos 500 años de periodo de retorno) no superan los 100 millones de dólares, son muchos menores si se comparan con las pérdidas asociadas a los inmuebles. Finalmente, las pérdidas en instituciones educativas fueron alrededor de 313, 63 y 186 millones de dólares en Etiopía, Kenia y Uganda, respectivamente.

En los inmuebles se presenta algo en particular, las pérdidas (en términos de % del costo total de reposición) son mayores en el 2015 comparándolas con la proyección del 2050. Situación que no se presenta en los centros de salud ni en las instituciones educativas. Lo anterior significa que la proyección

del PIB al año 2050 muestra un mayor crecimiento económico en los inmuebles, a tal punto que las pérdidas representan un porcentaje menor. Por el contrario, los porcentajes de pérdidas en centros de salud e instituciones educativas se mantienen casi iguales, lo que significa que el crecimiento económico en estos campos es similar al aumento en las pérdidas.

De los resultados obtenidos se pudo observar que las pérdidas monetarias por km² de área es un buen parámetro para estimar el verdadero impacto de una amenaza por sismo. No basta con conocer las pérdidas totales en un lugar determinado, queda claro que no es lo mismo tener pérdidas por 1,000 dólares en tres ciudades juntas, en lugar de una.

Al llevar a cabo estudios de amenaza se suele caer en el error de pensar que donde existen mayores niveles de amenaza se presentarán altos niveles de pérdida. Se debe recordar que el cálculo del riesgo no sólo depende de la amenaza, en él participan factores adicionales, como la vulnerabilidad de las estructuras y la distribución de los bienes expuestos, los cuales influyen altamente en los resultados de las pérdidas. Lo anterior, demuestra que el cálculo del riesgo es un análisis integral y deben tener en cuenta todas las variables que lo describen.

El análisis conjunto de la amenaza y el riesgo sísmico es de gran ayuda para la toma de decisiones, así como en la elaboración de planes de prevención o mitigación ante la acción de los fenómenos naturales. Además, ayuda a desarrollar una buena planeación territorial en la que se haga una correcta distribución y uso del suelo. Finalmente, a partir de estudios como este se pueden plantear cambios o mejoras en las normas de construcción sismoresistente de cada país, ya que los espectros de diseño podrían no estar representando de manera correcta el fenómeno en estudio y se estaría sobreestimando, o bien, subestimando, las fuerzas sísmicas actuantes en una estructura.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdalla, J. A., Eeri, M., Mohamedzein, Y. E. A., & Wahab, A. A. (2001). Probabilistic Seismic Hazard Assessment of Sudan and Its Vicinity. *Earthquake Spectra*, *V17*(No 3), 399–415.
- Ahmad, N., Crowley, H., Pinho, R., & Ali, Q. (2011). *Seismic Risk Assessment and Loss Estimation of Building Stock of Pakistan*. PhD Thesis, ROSE School – IUSS, Pavia, Italia.
- Aki, K. (1965). Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, *V43*, 237–239.
- Akkar, S., Sucuoglu, H., & Yakut, A. (2005). Displacement-based fragility functions for low- and mid-rise ordinary concrete buildings. *Earthquake Spectra*, *V21*(No. 4), 921–927.
- Amo-Oduro, D., Yepes, C., & Silva, V. (2015). *Housing Typologies in Africa*. Global Earthquake Model (GEM).
- Arboleda, J., & Ordaz, M. G. (1993). Un mejor uso de los datos estadísticos para estimación de la sismicidad local. In *Memoria del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica* (pp. 21–27). Puerto Vallarta, México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, A.C.
- Bal, I. E., Crowley, H., & Pinho, R. (2010). *Displacement-based earthquake loss assessment: Method development and application to Turkish building stock*. ROSE Research Report 2010/02. Pavia, Italy: IUSS Press.
- Bal, I. E., Crowley, H., Pinho, R., & Gulay, F. (2008). Detailed assessment of structural characteristics of Turkish RC building stock for loss assessment models. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *V28*, 914–932.
- Benjamin, J. R., & Cornell, C. A. (1970). *Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers*. McGraw-Hill Book Company.
- Berktoold, A., Haak, V., & Angenheister, G. (1975). *Magnetotelluric measurements in the Afar area*. Pilger and A. Rosler (Editors), Afar Depression of Ethiopia, Vol. I. Schweizerbart, Stuttgart.
- Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E., & Atkinson, G. M. (2014). NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, *V30*(No 3), 1057–1085.
- Borzi, B., Crowley, H., & Pinho, R. (2008). Simplified Pushover-Based Earthquake Loss Assessment (SP-BELA) Method for Masonry Buildings. *International Journal of Architectural Heritage*, *V2*(No. 4), 353–376.
- Camelo, V. (2003). *Dynamic Characteristics of Woodframe Buildings*. Doctoral Thesis, California Institute of Technology, California.
- Cardona, O. D., Ordaz, M. G., Reinoso, E., Yamín, L. E., & Barbat, A. H. (2011). Enfoque Integral para la Evaluación Probabilista del Riesgo (CAPRA): Iniciativa Internacional para la Efectividad de la Gestión del Riesgo de Desastre. In *4º Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Granada, España.
- Chiou, B. S.-J., & Youngs, R. R. (2014). Update of the Chiou and Youngs NGA Model for the Average

- Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Earthquake Spectra*, V30(No 3), 1117–1153.
- Chorowicz, J. (2005). The East African rift system. *Journal of African Earth Sciences*, V43, 379–410.
- Coppersmith, K. J., & Youngs, R. R. (1986). Capturing uncertainty in probabilistic seismic hazard assessments within intraplate tectonic environments. In *Proceedings of the Third U.S. National Conference on Earthquake Engineering* (pp. 301–312). Charleston, SC.
- Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, V58(No 5), 1583–1606.
- Cornell, C. A., & Vanmarcke, E. H. (1969). The Major Influences on Seismic Risk. In *Proc. of the 4th World Conference on Earthquake Engineering* (pp. 69–83). Santiago de Chile, Chile.
- Crowley, H., & Pinho, R. (2006). Simplified Equations for Estimating the Period of Vibration of Existing Buildings. In *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*. Geneva, Switzerland.
- Crowley, H., Pinho, R., & Bommer, J. J. (2004). A probabilistic displacement-based vulnerability assessment procedure for earthquake loss estimation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, V2(No. 2), 173–219.
- Di Pasquale, G., & Goretti, A. (2001). Vulnerabilità funzionale ed economica degli edifici residenziali colpiti dai recenti eventi sismici italiani. In *Proceedings of the 10th National Conference "L'ingegneria Sismica in Italia."* Potenza-Matera, Italy.
- Dingel, C. C., & Tiwari, A. (2010). *Report on the status of Disaster Risk Reduction in Sub-Saharan Africa*. Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (GFDRR) and The World Bank.
- Dziewonski, A. M., Chou, T.-A., & Woodhouse, J. H. (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *Journal of Geophysical Research*, V86(No B4), 2825–2852.
- Ekström, G., Nettles, M., & Dziewonski, A. M. (2012). The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, V200-201, 1–9.
- ERN Latinoamérica. (2005a). *Metodología de Análisis Probabilista del Riesgo. Informe Técnico ERN-CAPRA-TI-6*. Ciudad de México, México: Metodología de modelación probabilista de riesgos naturales. CAPRA, Probabilistic Risk Assessment Initiative.
- ERN Latinoamérica. (2005b). *Metodología de Definición del Inventario de Activos Expuestos. Informe Técnico ERN-CAPRA-TI-4*. Ciudad de México, México: Metodología de modelación probabilista de riesgos naturales. CAPRA, Probabilistic Risk Assessment Initiative.
- ERN Latinoamérica. (2005c). *Módulos de Software. Informe Técnico ERN-CAPRA-TI-7*. Ciudad de México, México: Metodología de modelación probabilista de riesgos naturales. CAPRA, Probabilistic Risk Assessment Initiative.
- ERN Latinoamérica. (2005d). *Vulnerabilidad de edificaciones e infraestructura. Informe Técnico ERN-CAPRA-TI-5*. Ciudad de México, México: Metodología de modelación probabilista de riesgos

- naturales. CAPRA, Probabilistic Risk Assessment Initiative.
- ERN Latinoamérica, & ITEC Ltda. (2011). CAPRAGIS Versión 2.0.0.0. Proyecto CAPRA.
- FEMA-443. (2003). *HAZUS-MH technical manual*. Washington, DC, USA: Federal Emergency Management Agency's (FEMA's).
- Goda, K. (2014). Record selection for aftershock incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, *V44*(No. 7), 1157–1162.
- Gouin, P. (1979). *Earthquake History of Ethiopia and the Horn of Africa*. Ottawa, Canadá: International Development Research Centre (IDRC).
- Havskov, J. (1997). Earthquake Analysis Software for the IBM-PC and SUN (Version 6.0). Institute of Solid Earth Physics. University of Bergen, Norway.
- Havskov, J., & Ottemöller, L. (2006). Seisan: the earthquake analysis software (Version 8.1).
- Instituto de Ingeniería UNAM. (2015). *Amenaza sísmica*. Ciudad de México, México.
- Jerven, M. (2013). *Poor Numbers - How We Are Misled by African Development Statistics and What to Do about It*. Cornell University Press. Cornell Studies in Political Economy.
- Kappos, A., Panagopoulos, G., Panagiotopoulos, C., & Penelis, G. (2006). A hybrid method for the vulnerability assessment of R/C and URM buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *V4*(No. 4), 391–413.
- Kebede, F., & Kulhánek, O. (1991). Recent seismicity of the East African rift system and its implications. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, *V68*, 259–273.
- Kebede, F., & Van Eck, T. (1997). Probabilistic seismic hazard assessment for the Horn of Africa based on seismotectonic regionalisation. *Tectonophysics*, *V270*, 221–237.
- Kijko, A., & Smit, A. (2012). Extension of the Aki-Utsu b-Value estimator for incomplete catalogs. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *V 102*(No. 3), 1283–1287.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. University of Washington: Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics.
- Kulkarni, R. B., Youngs, R. R., & Coppersmith, K. J. (1984). Assessment of Confidence Intervals for Results of Seismic Hazard Analysis. In *Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering* (pp. 263–270). San Francisco, CA.
- Lagomarsino, S., & Giovinazzi, S. (2006). Macro seismic and Mechanical Models for the Vulnerability and Damage Assessment of Current Buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *V4*(No. 4), 415–443.
- Maasha, N., & Molnar, P. (1972). Earthquake fault parameters and tectonics in Africa. *Geophysical Research*, *V77*, 5731–5743.
- Makris, J., & Ginzburg, A. (1987). The Afar Depression: transition between continental rifting and sea-floor spreading. *Tectonophysics*, *V141*, 199–214.

- Makris, J., Menzel, H., Zimmermann, R., & Gouin, P. (1975). *Gravity field and crustal structure of north Ethiopia*. Pilger and A. Rosler (Editors), Afar Depression of Ethiopia, Vol. I. Schweizerbart, Stuttgart.
- Mavonga, T., & Durrheim, R. J. (2009). Probabilistic seismic hazard assessment for the Democratic Republic of Congo and surrounding areas. *South African Journal of Geology*, *V112*, 329–342.
- McGuire, R. K. (2004). *Seismic Hazard And Risk Analysis*. Boulder (Colorado), USA: Earthquake Engineering Research Institute (EERI), MNO-10.
- McKenna, F., Fenves, G. L., & Scott, M. H. (2000). OpenSees: Open system for earthquake engineering simulation. University of California, Berkeley, CA.
- McKenzie, D. P., Davies, D., & Molnar, P. (1970). Plate Tectonics of the Red Sea and East Africa. *Nature*, *V226*, 243–248.
- Mengistu, A. S. (2013). *Seismic Hazard Assessment of Sub-Saharan Africa*. Earthquake Engineering &/or Engineering Seismology. Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia. Master Degree.
- Midzi, V., Hlatywayo, D. J., Chapola, L. S., Kebede, F., Atakan, K., Lombe, D. K., ... Tugume, F. A. (1999). Seismic hazard assessment in Eastern and Southern Africa. *Annali Di Geofisica*, *V42*(No 6), 1067–1083.
- Mulugeta, G., Ayonghe, S., Daby, D., Dube, O. P., Gudyanga, F., Lucio, F., & Durrheim, R. J. (2007). *Natural and Human-induced Hazards and Disasters in sub-Saharan Africa*. International Council for Science (ICSU). ICSU Regional Office for Africa.
- O'Neill, B. C., Carter, T. R., Ebi, K. L., Edmonds, J., Hallegatte, S., Kemp-Benedict, E., ... Riahi, K. (2012). *Meeting Report of the Workshop on The Nature and Use of New Socioeconomic Pathways for Climate Change Research*. Boulder (Colorado), USA: National Center for Atmospheric Research (NCAR). Available at: <http://www.isp.ucar.edu/socio-economic-pathways>.
- OFDA/CRED. (2004). *EM-DAT: The OFDA-CRED International Disaster Database. Final Report January 15, 2002– July 14, 2004*. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) and Office of U.S. Foreign Disaster Assistance (OFDA).
- Ordaz, M. G., Cardona, O. D., Salgado-Gálvez, M. A., Bernal-Granados, G. A., Singh, S. K., & Zuloaga-Romero, D. (2014). Probabilistic seismic hazard assessment at global level. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *V10*(Part B), 419–427.
- Ordaz, M. G., Martinelli, F., Aguilar, A., Arboleda, J., Meletti, C., & D'Amico, V. (2015). CRISIS 2015 Ver 2.3 (Core library 15.2.3.0). Program for computing seismic hazard, Instituto de Ingeniería, UNAM (www.iingen.unam.mx).
- Özcebe, S. (2011). *Identification of Initial Damage States in Displacement-Based Assessment of Existing RC Buildings*. MSc Thesis, ROSE School, Pavia, Italia.
- Pezeshk, S., Zandieh, A., & Tavakoli, B. (2011). Hybrid empirical ground-motion prediction equations for Eastern North America using NGA models and updated seismological parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *V101*(No 4), 1859–1870.
- Reiter, L. (1990). *Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insight*. New York: Columbia University

Press.

- Shudofsky, G. N. (1985). Source mechanisms and focal depths of East African earthquakes using Rayleigh-wave inversion and body-wave modelling. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, V83, 563–614.
- Shudofsky, G. N., Cloetingh, S., Stein, S., & Wortel, R. (1987). Unusually deep earthquakes in East Africa: Constraints on the thermo-mechanical structure of a continental rift System. *Geophysical Research Letters*, V14, 741–744.
- Silva, V., Crowley, H., Varum, H., Pinho, R., & Sousa, L. (2015). Investigation of the Characteristics of Portuguese Regular Moment-Frame RC Buildings and Development of a Vulnerability Model. *Bulletin of Earthquake Engineering*, V13(No. 5), 1455–1490.
- Silva, V., Crowley, H., Varum, H., Pinho, R., & Sousa, R. (2014). Evaluation of analytical methodologies used to derive vulnerability functions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, V43, 181–204.
- Skobelev, S. F., Hanon, M., Klerkx, J., Govorova, N. N., Lukina, N. V., & Kazmin, V. G. (2004). Active faults in Africa: A review. *Tectonophysics*, V380, 131–137.
- Spudich, P., Joyner, W. B., Lindh, A. G., Boore, D. M., Margaris, B. M., & Fletcher, J. B. (1999). SEA99: A revised ground motion prediction relation for use in extensional tectonic regimes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, V89(No 5), 1156–1170.
- Storchak, D. A., Di Giacomo, D., Bondár, I., Harris, J., Engdahl, E. R., Lee, W. H. K., ... Ferrari, G. (2012). *ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009)*. *GEM Technical Report 2012-01* (Vol. V1.0.0). Pavia, Italy: GEM Foundation.
- Tarque, N. (2008). *Seismic Risk Assessment of Adobe Dwellings*. Master Thesis, European School for Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk (ROSE School), University of Pavia, Italia.
- The World Bank. (2016). Datos de libre acceso del Banco Mundial: acceso abierto y gratuito a datos sobre desarrollo de los países en todo el mundo. Retrieved from <http://datos.bancomundial.org/>
- The World Bank, & Gobierno de España. (2015a). Etiopía. Retrieved from <http://www.ikuska.com/Africa/Paises/Etiopia.htm>
- The World Bank, & Gobierno de España. (2015b). Kenia. Retrieved from <http://www.ikuska.com/Africa/Paises/Kenia.htm>
- The World Bank, & Gobierno de España. (2015c). Uganda. Retrieved from <http://www.ikuska.com/Africa/Paises/Uganda.htm>
- The World Bank, & ImageCat. (2015). *GFDRR Africa Disaster Risk Financing – Result Area 5. Exposure Development*. World Bank / Global Facility for Disaster Reduction and Recovery, ImageCat, Inc. Center for International Earth Science Information Network, University of Colorado, SecondMuse.
- The World Bank, RED, & ERN. (2016). *National Level Earthquake Risk Profiles for Sub-Saharan Africa*. The World Bank's Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (GFDRR).

- Tinti, S., & Mulargia, F. (1985). An improved method for the analysis of the completeness of a seismic catalogue. *Lettere Al Nuovo Cimento*, V42(No 1), 21–27.
- Twesigomwe, E. M. (1997). Seismic hazards in Uganda. *Journal of African Earth Sciences*, V24(No 1/2), 183–195.
- UN/ISDR. (2004). *Towards Sustainable Development in Africa: A report on the status of disaster risk management and disaster risk assessment in Africa*. UN/ISDR, Africa Development Bank, African Union, New Partnership for Africa's Development.
- USGS. (2013). Global Vs30 Map Server, Earthquake Hazards Program. Retrieved from <http://earthquake.usgs.gov/hazards/apps/vs30/>
- Utsu, T. (1965). A method for determining the value of b in the formula $\log N = a - bM$ showing the magnitude–frequency relation for earthquakes. *Geophysical Bulletin*, V13, 99–113.
- Villani, M. (2010). *High resolution SHA in the vicinity of earthquake sources*. Istituto Universitario di Studi Superiori, Engineering Seismology. ROSE School. Doctor Degree.
- Wald, D. J., & Allen, T. I. (2007). Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site Conditions and Amplification. *Bulletin of the Seismological Society of America*, V97, 1379–1395.
- Wald, D. J., Earle, P. S., & Quitoriano, V. (2004). *Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site Correction and Amplification*. *EOS, Transactions, American Geophysical Union (No. 47, F1424)* (Vol. V85).
- Weichert, D. H. (1980). Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, V70(No 4), 1337–1346.
- Worku, A. (2014). The status of basic design ground motion provisions in seismic design codes of sub-Saharan African countries. A critical review. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, V56(No 1), 40–53.
- Yang, Z., & Chen, W. P. (2010). Earthquakes along the East African Rift System: A multiscale, system-wide perspective. *Journal of Geophysical Research*, V115(B12309), 1–31.

ANEXO 1

ESTIMADORES DE MÁXIMA VEROSIMILITUD

ANEXO 1

ESTIMADORES DE MÁXIMA VEROSIMILITUD

La sismicidad local (β y λ_0) se puede determinar a partir de diversas metodologías y softwares (Aki, 1965; Arboleda & Ordaz, 1993; Havskov, 1997; Havskov & Ottemöller, 2006; Kijko & Smit, 2012; Utsu, 1965; Weichert, 1980), o bien basado en estudios previos hechos en la zona de estudio. Para este estudio, se ha desarrollado un procedimiento de cálculo (basado en la propuesta hecha por Arboleda & Ordaz, 1993) para determinar los parámetros sísmicos β y λ_0 a partir de un catálogo sísmico conformado por subcatálogos con diferentes niveles de completéz. Una de las grandes características de este método es su fácil aplicación y poca demanda computacional.

A partir de la relación de recurrencia propuesta por Cornell & Vanmarcke (1969),

$$\lambda(m) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta m} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}} \quad M_0 \leq m \leq M_u \quad (\text{A1.1})$$

Donde,

- λ_0 es la tasa de excedencia para la magnitud umbral M_0 ,
- β es la pendiente de la parte recta, dentro de la curva de tasa de excedencia,
- m es la magnitud a evaluar,
- M_0 es la magnitud umbral, y
- M_u es la magnitud máxima.

Se puede suponer que la función de densidad de probabilidad de la magnitud (m) está dada por una distribución exponencial:

$$p_M(m) = \frac{\beta e^{-\beta m}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}} \quad M_0 \leq m \leq M_u \quad (\text{A1.2})$$

Por otro lado, si se acepta que la generación de temblores en el tiempo sigue un proceso de Poisson, la función de densidad de probabilidad del tiempo τ entre eventos de magnitud mayor o igual a M_0 es exponencial con parámetro λ_0 :

$$p_t(\tau) = \lambda_0 e^{-\lambda_0 \tau} \quad (\text{A1.3})$$

Supóngase que el catálogo sísmico se divide en k subcatálogos que se consideran completos, de tal manera que el i -ésimo subcatálogo corresponde a un periodo t_i , durante el cual se observaron n_i temblores con magnitudes m_{ij} mayores o iguales a M_{0i} , y que ocurrieron a intervalos de tiempo τ_{ij} . Los periodos pueden ser continuos entre sí o aislados, pero nunca traslapados (ver *Figura A1.1*).

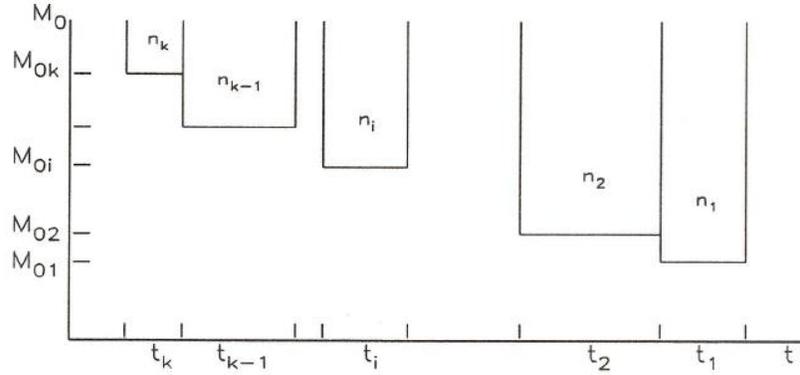


Figura A1.1. División de un catálogo sísmico en k subcatálogos completos (tomada de Arboleda & Ordaz, 1993)

Si ε_i es el evento que comprende las observaciones, supuestas independientes, del i -ésimo subcatálogo, bajo la hipótesis de que el proceso de ocurrencia de los sismos es Poissoniano, de que la magnitud es independiente del tiempo entre sismos y que la magnitud máxima (M_U) es mucho mayor que M_0 ($M_U \rightarrow \infty$), la verosimilitud de ε_i se calcula en base a las ecuaciones (A1.2) y (A1.3).

$$L(\varepsilon_i | \lambda_{0i}, \beta, M_U) = \beta^{n_i} \lambda_{0i}^{n_i} e^{-\lambda_{0i} t_i} e^{-\beta S_i} \quad (\text{A1.4})$$

Donde,

$$t_i \quad \text{es el tiempo del subcatálogo } i \text{ definido como: } t_i = \sum_{j=1}^{n_i} \tau_{ij}$$

$$S_i = \sum_{j=1}^{n_i} (M_{ij} - M_{0i}) = \sum_{j=1}^{n_i} M_{ij} - n_i M_{0i}$$

Para tomar en cuenta a los k subcatálogos, es necesario hallar la verosimilitud del evento ε que incluye a todas las realizaciones del catálogo.

$$L(\varepsilon | \lambda_{01}, \lambda_{02}, \dots, \lambda_{0k}, \beta, M_U) = \beta^N e^{-\sum_{i=1}^k \lambda_{0i} t_i} e^{-\beta \sum_{i=1}^k S_i} \prod_{i=1}^k \lambda_{0i}^{n_i} \quad (\text{A1.5})$$

Donde,

$$N = \sum_{i=1}^k n_i$$

Los parámetros a estimar son las tasas λ_{0i} , correspondientes a la magnitud umbral de cada uno de los subcatálogos, además de β . La ecuación anterior puede ser simplificada si las λ_{0i} se expresan en función de la magnitud umbral del subcatálogo más reciente, *magnitud umbral de referencia* (M_{01} en el siguiente desarrollo). De acuerdo con la ecuación (A1.1):

$$\lambda_{0i} = \lambda_{01} \gamma_i \quad (\text{A1.6})$$

Donde,

$$\gamma_i = e^{-\beta(M_{0i} - M_{01})}$$

Reemplazando (A1.6) en (A1.5), la verosimilitud tomando en cuenta a los k subcatálogos queda definida por:

$$L(\varepsilon | \lambda_{01}, \beta, M_U) = \beta^N \lambda_{01}^N e^{-\lambda_{01} t^*} e^{-\beta S_k} \prod_{i=1}^k \gamma_i^{n_i} \quad (\text{A1.7})$$

Donde,

$$t^* = \sum_{i=1}^k \gamma_i t_i = \sum_{i=1}^k [t_i e^{-\beta(M_{0i} - M_{01})}]$$

$$S_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (M_{ij} - M_{0i})$$

$$\prod_{i=1}^k \gamma_i^{n_i} = e^{-\beta \sum_{i=1}^k [n_i (M_{0i} - M_{01})]}$$

Simplificando los últimos dos términos de la ecuación (A1.7), la ecuación de la verosimilitud es igual a:

$$L(\varepsilon | \lambda_{01}, \beta, M_U) = \beta^N \lambda_{01}^N e^{-\lambda_{01} t^*} e^{-\beta \left[\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (M_{ij} - M_{01}) \right]} \quad (\text{A1.8})$$

Se requiere encontrar el valor máximo de la ecuación (A1.8) para garantizar que los parámetros λ_{01} y β , efectivamente son los estimadores de máxima verosimilitud. Para ello, se igualan a cero (0) sus derivadas parciales y se solucionan de manera simultánea para λ_{01} y β (Benjamin & Cornell, 1970). Para simplificar el proceso de derivación, se aplica logaritmo natural a ambos lados de la ecuación; esto no afecta el resultado puesto que, si se encuentra el máximo del logaritmo natural de L , también se encuentra el máximo de L .

$$\ln(L) = N \ln(\beta) + N \ln(\lambda_{01}) - \lambda_{01} t^* - \beta \left[\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (M_{ij} - M_{01}) \right] \quad (\text{A1.9})$$

La derivada parcial de (A1.9) con respecto a λ_{01} es igual a:

$$\frac{\partial}{\partial \lambda_{01}} \ln(L) = \frac{N}{\lambda_{01}} - t^* \quad (\text{A1.10})$$

Igualando a cero (0) la ecuación (A1.10) y resolviendo para λ_{01} se tiene que:

$$\frac{N}{\lambda_{01}} - t^* = 0 \quad \rightarrow \quad \lambda_{01} = \frac{N}{t^*} \quad (\text{A1.11})$$

De igual forma, se encuentra la derivada parcial de (A1.9) con respecto a β :

$$\frac{\partial}{\partial \beta} \ln(L) = \frac{N}{\beta} - \lambda_{01} \left(\frac{\partial}{\partial \beta} t^* \right) - S_k \quad (\text{A1.12})$$

Donde,

$$\frac{\partial}{\partial \beta} t^* = -\sum_{i=1}^k \left[t_i e^{-\beta(M_{0i}-M_{01})} (M_{0i} - M_{01}) \right]$$

$$S_{k1} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (M_{ij} - M_{01})$$

Reemplazando (A1.11) en (A1.12), y resolviendo para β :

$$\beta = \left(\frac{S_{k1}}{N} + \frac{\frac{\partial}{\partial \beta} t^*}{t^*} \right)^{-1} \quad (\text{A1.13})$$

La ecuación (A1.13) se debe solucionar por un método iterativo ya que dentro de la expresión de β hay términos que dependen de sí misma. Para ello, se propone un procedimiento iterativo con el cual se puede encontrar la solución de manera rápida:

1. Definir un valor de tolerancia a tener en cuenta en el cálculo (aproximadamente 0.001).
2. Proponer un valor inicial de β_i a partir del cual se comenzarán las iteraciones. Se recomienda un valor no mayor a 10.0 ya que tomaría más tiempo en converger el método.
3. Calcular S_{k1} :

$$S_{k1} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (M_{ij} - M_{01}) \quad (\text{A1.14})$$

4. Calcular $\frac{\partial}{\partial \beta} t^*$:

$$\frac{\partial}{\partial \beta} t^* = -\sum_{i=1}^k \left[t_i e^{-\beta(M_{0i}-M_{01})} (M_{0i} - M_{01}) \right] \quad (\text{A1.15})$$

5. Calcular t^* :

$$t^* = \sum_{i=1}^k \gamma_i t_i = \sum_{i=1}^k \left[t_i e^{-\beta(M_{0i}-M_{01})} \right] \quad (\text{A1.16})$$

6. Calcular nueva β por medio de la ecuación (A1.13):

$$\beta = \left(\frac{S_{k1}}{N} + \frac{\frac{\partial}{\partial \beta} t^*}{t^*} \right)^{-1}$$

7. Encontrar el error entre la nueva β (paso anterior) y β_i :

$$error = |\beta_i - \beta| \quad (\text{A1.17})$$

8. Si el error calculado en el paso anterior es menor que la tolerancia determinada en el paso 1, entonces se ha encontrado el estimador de máxima verosimilitud de β . De lo contrario, se debe regresar al paso 4 y repetir el proceso utilizando la nueva β .
9. Recalcular t^* (ecuación (A1.16)) con la nueva β encontrada en el paso anterior.
10. Calcular λ_{01} con la ecuación (A1.11):

$$\lambda_{01} = \frac{N}{t^*}$$

Este procedimiento se resume en la *Figura A1.2*.

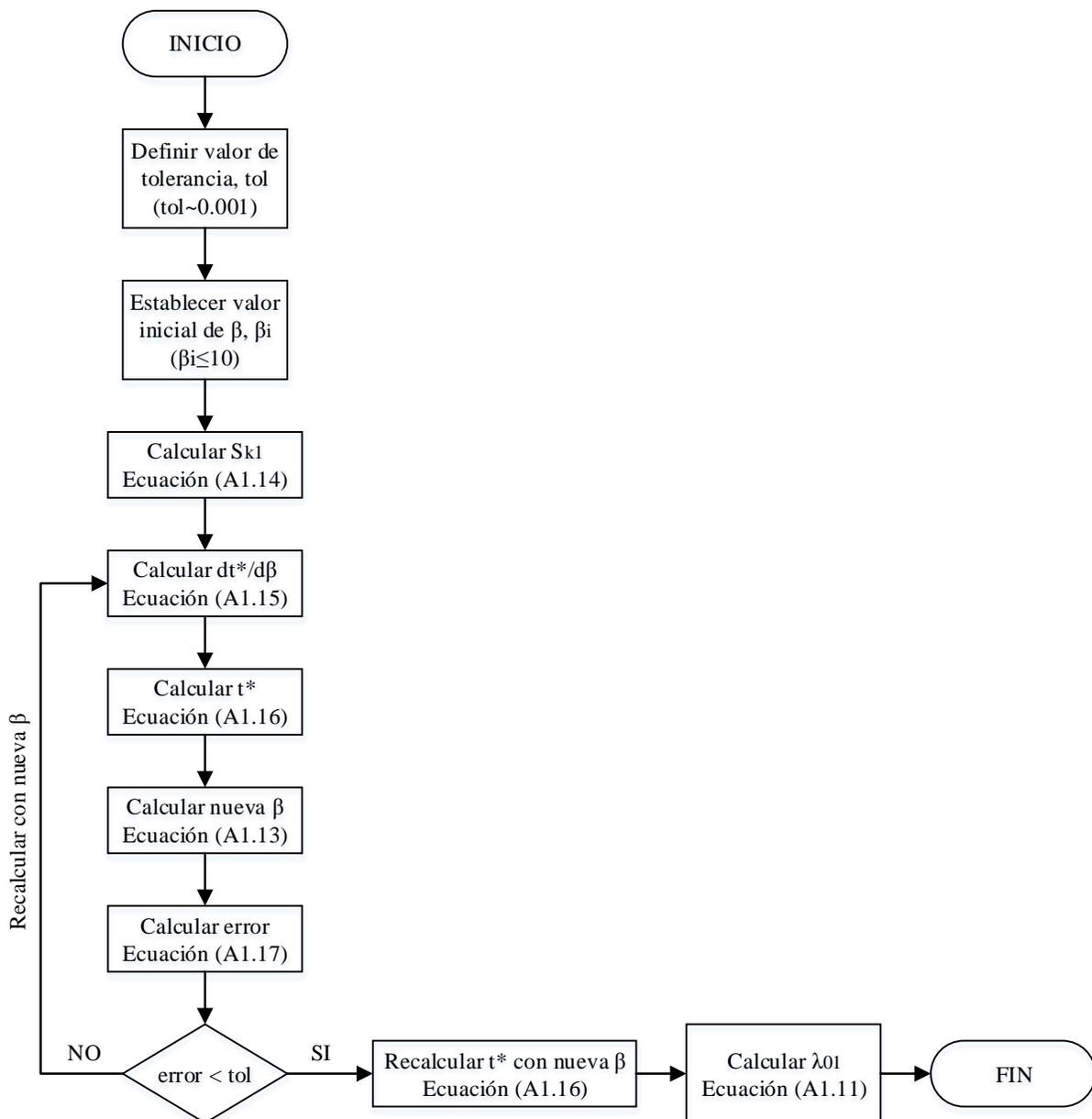


Figura A1.2. Diagrama de flujo para el cálculo de β y λ_{01}

ANEXO 2

RESULTADOS DE AMENAZA SÍSMICA

ANEXO 2

RESULTADOS DE AMENAZA SÍSMICA

LISTA DE FIGURAS

Figura A2.1. Valores de aceleración (gal), en suelo, para Tr=10 años	A2-1
Figura A2.2. Valores de aceleración (gal), en suelo, para Tr=25 años	A2-2
Figura A2.3. Valores de aceleración (gal), en suelo, para Tr=50 años	A2-3
Figura A2.4. Valores de aceleración (gal), en suelo, para Tr=100 años	A2-4
Figura A2.5. Valores de aceleración (gal), en suelo, para Tr=250 años	A2-5
Figura A2.6. Valores de aceleración (gal), en suelo, para Tr=475 años	A2-6
Figura A2.7. Valores de aceleración (gal), en suelo, para Tr=500 años	A2-7
Figura A2.8. Valores de aceleración (gal), en suelo, para Tr=1000 años	A2-8

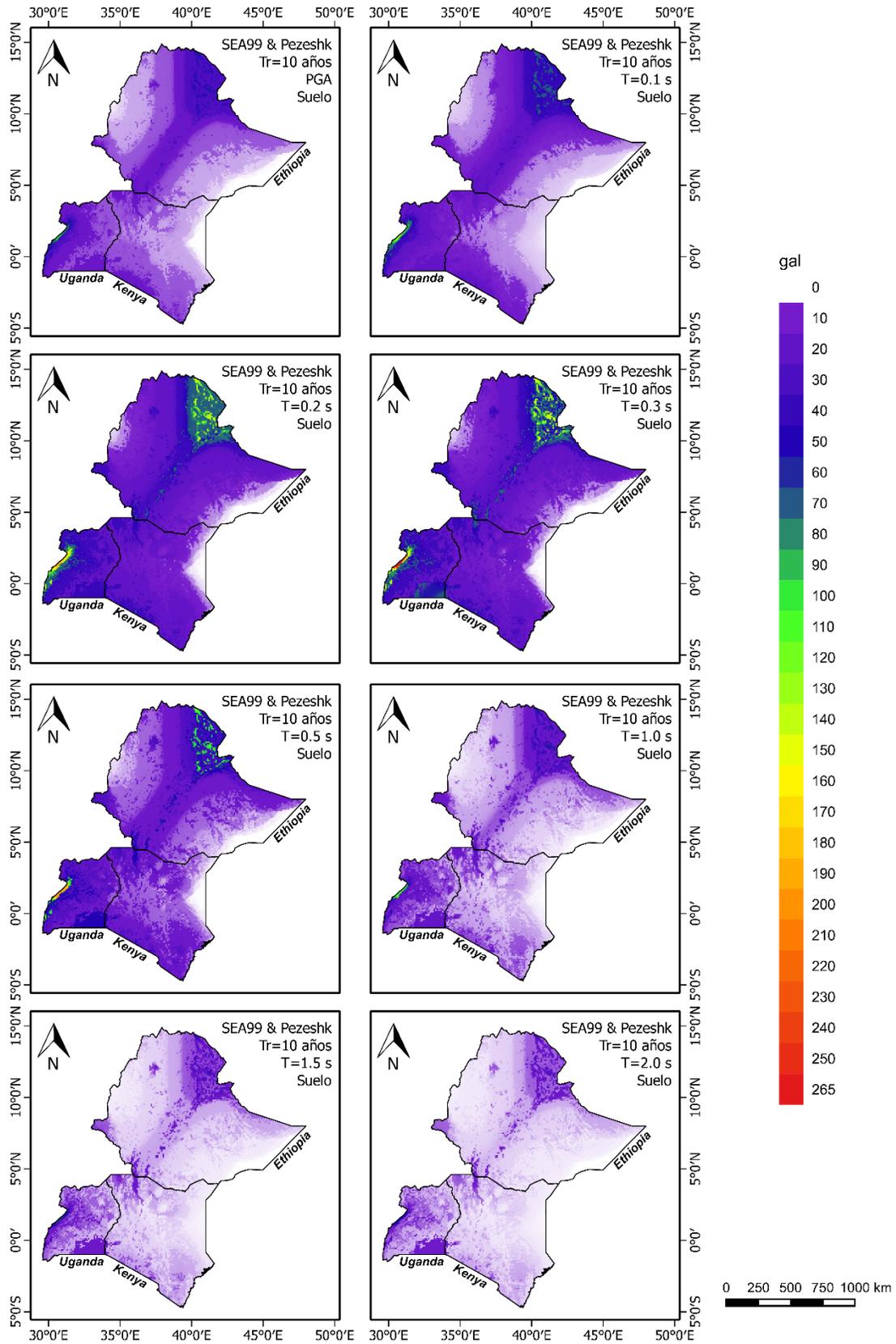


Figura A2.1. Valores de aceleración (gal), en suelo, para Tr=10 años

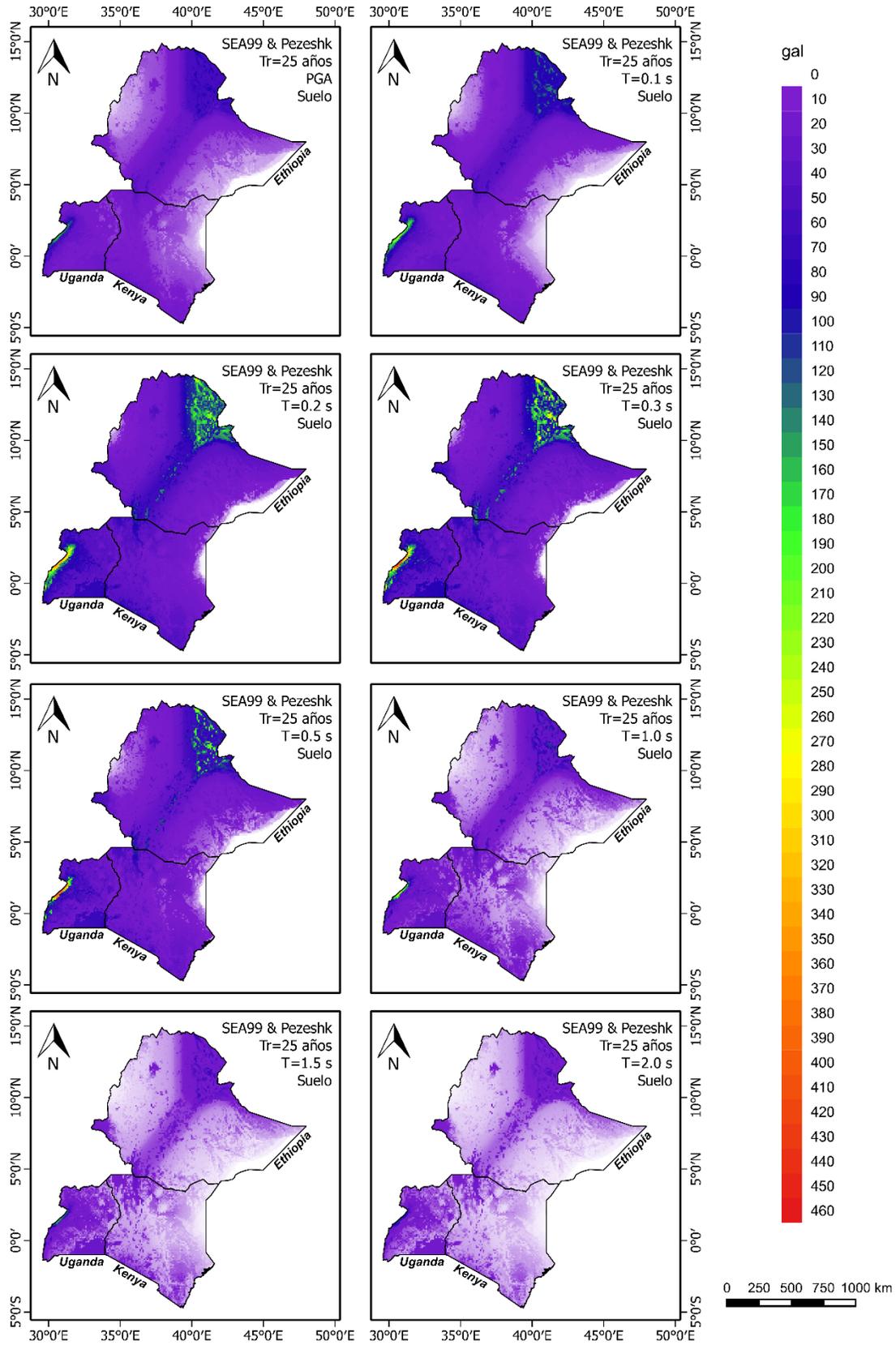


Figura A2.2. Valores de aceleración (gal), en suelo, para Tr=25 años

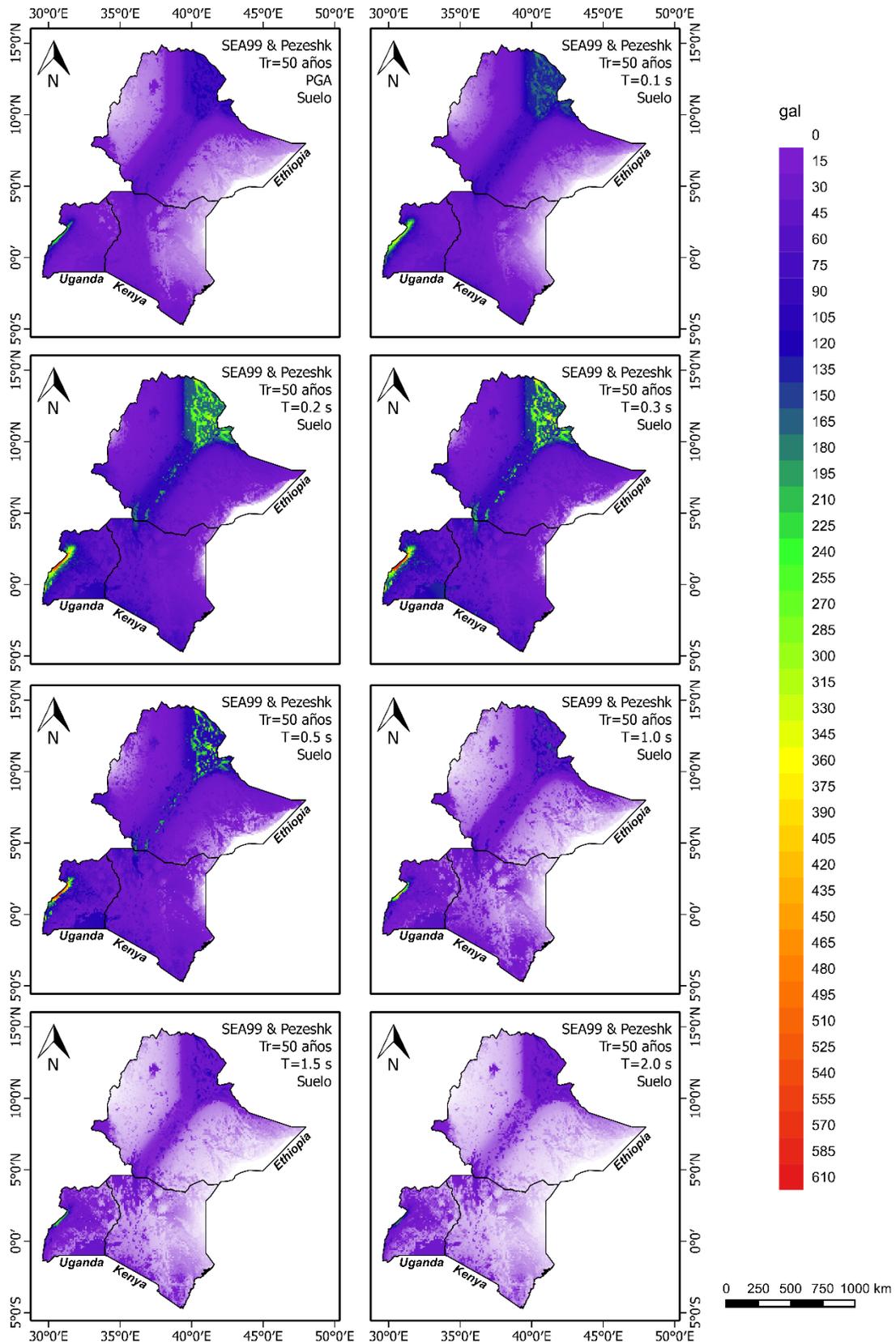


Figura A2.3. Valores de aceleración (gal), en suelo, para Tr=50 años

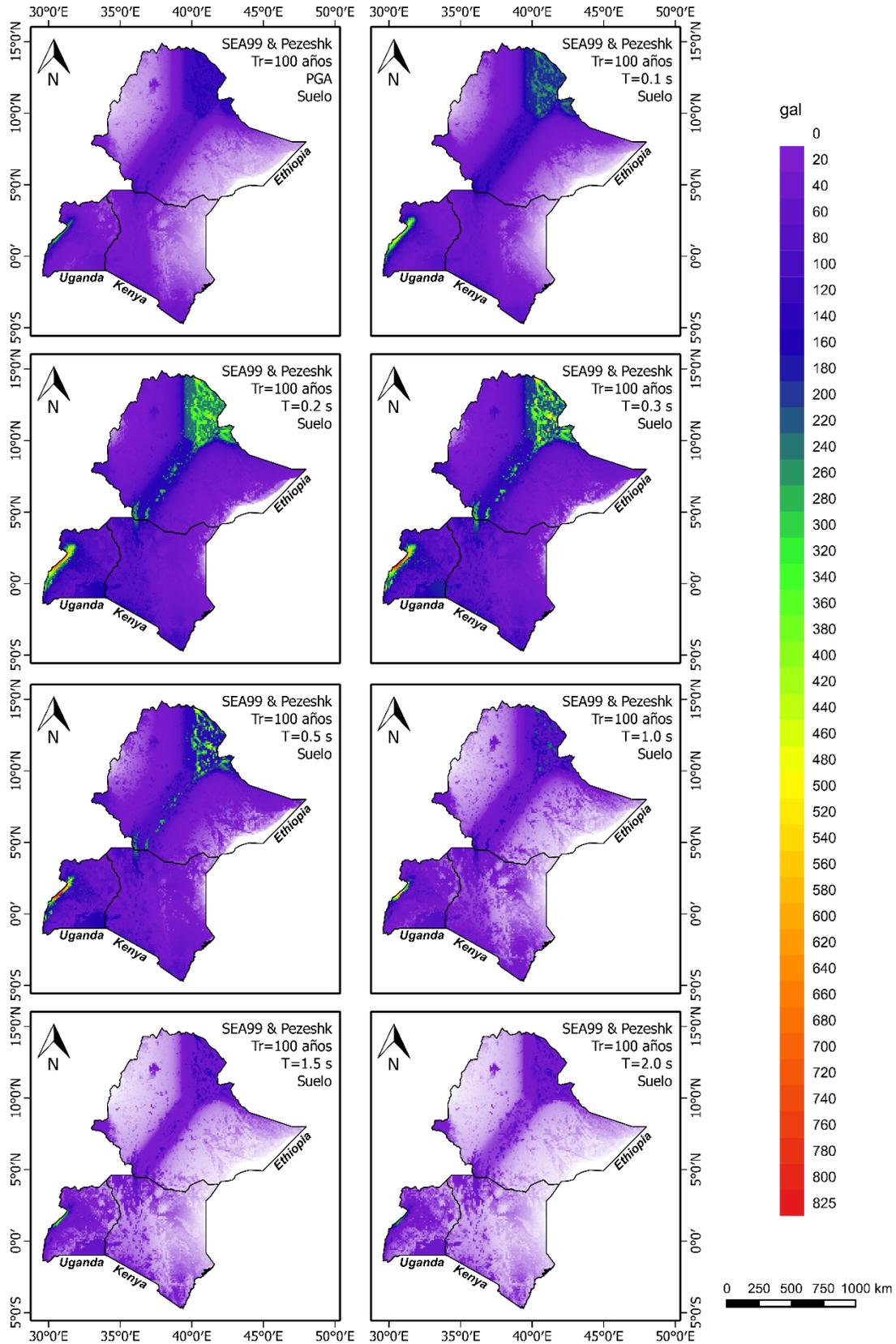


Figura A2.4. Valores de aceleración (gal), en suelo, para Tr=100 años

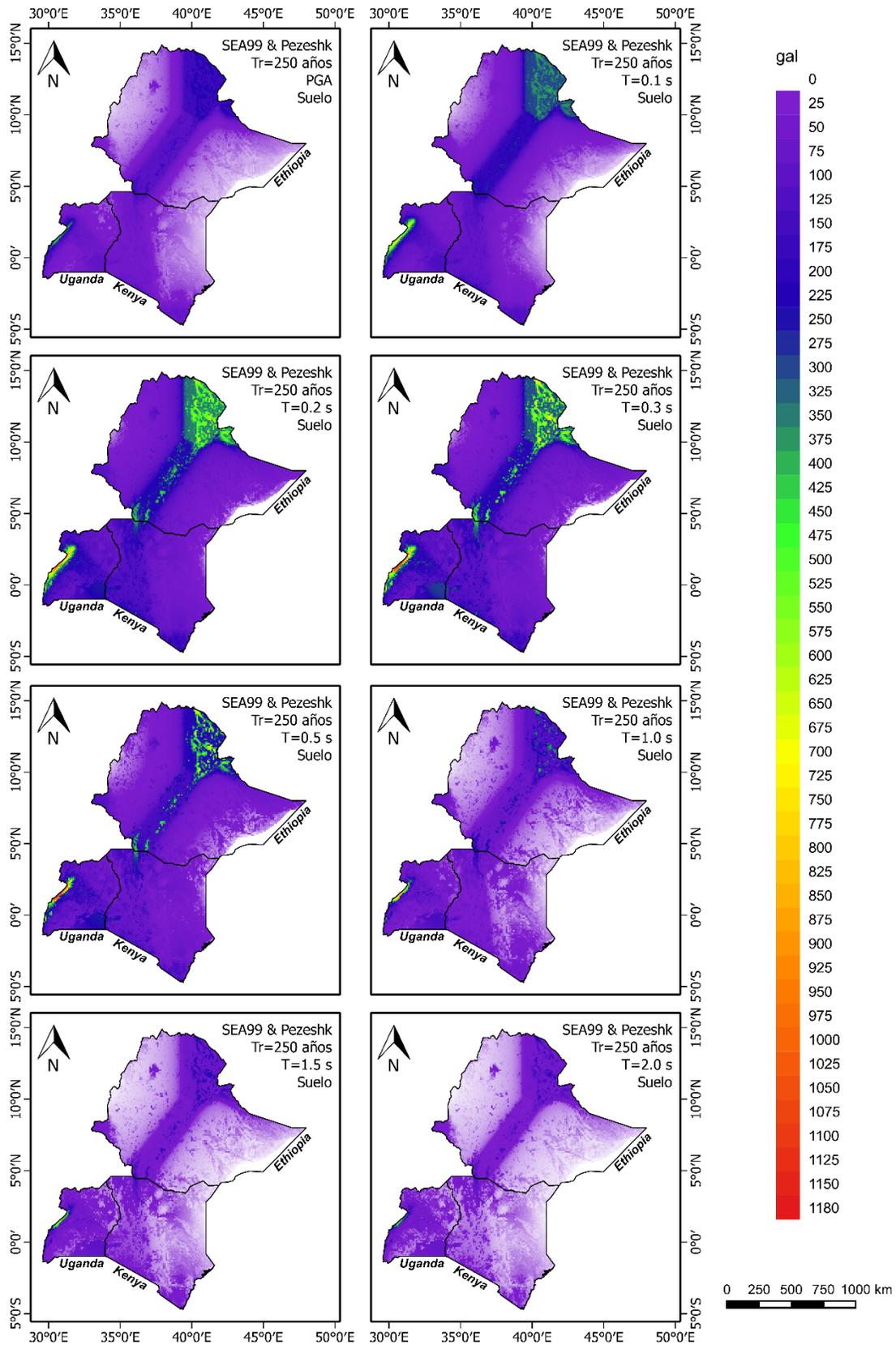


Figura A2.5. Valores de aceleración (gal), en suelo, para Tr=250 años

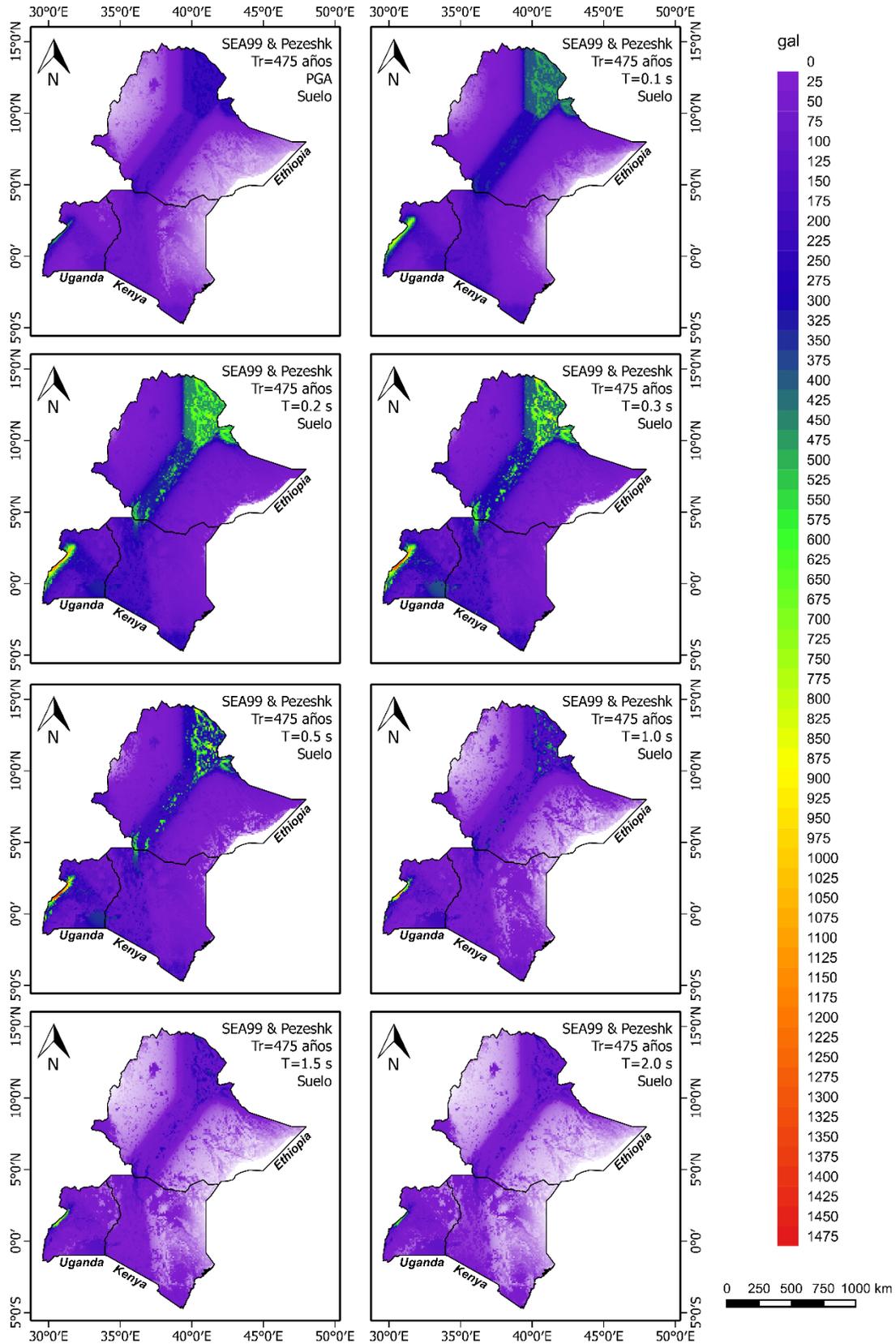


Figura A2.6. Valores de aceleración (gal), en suelo, para $Tr=475$ años

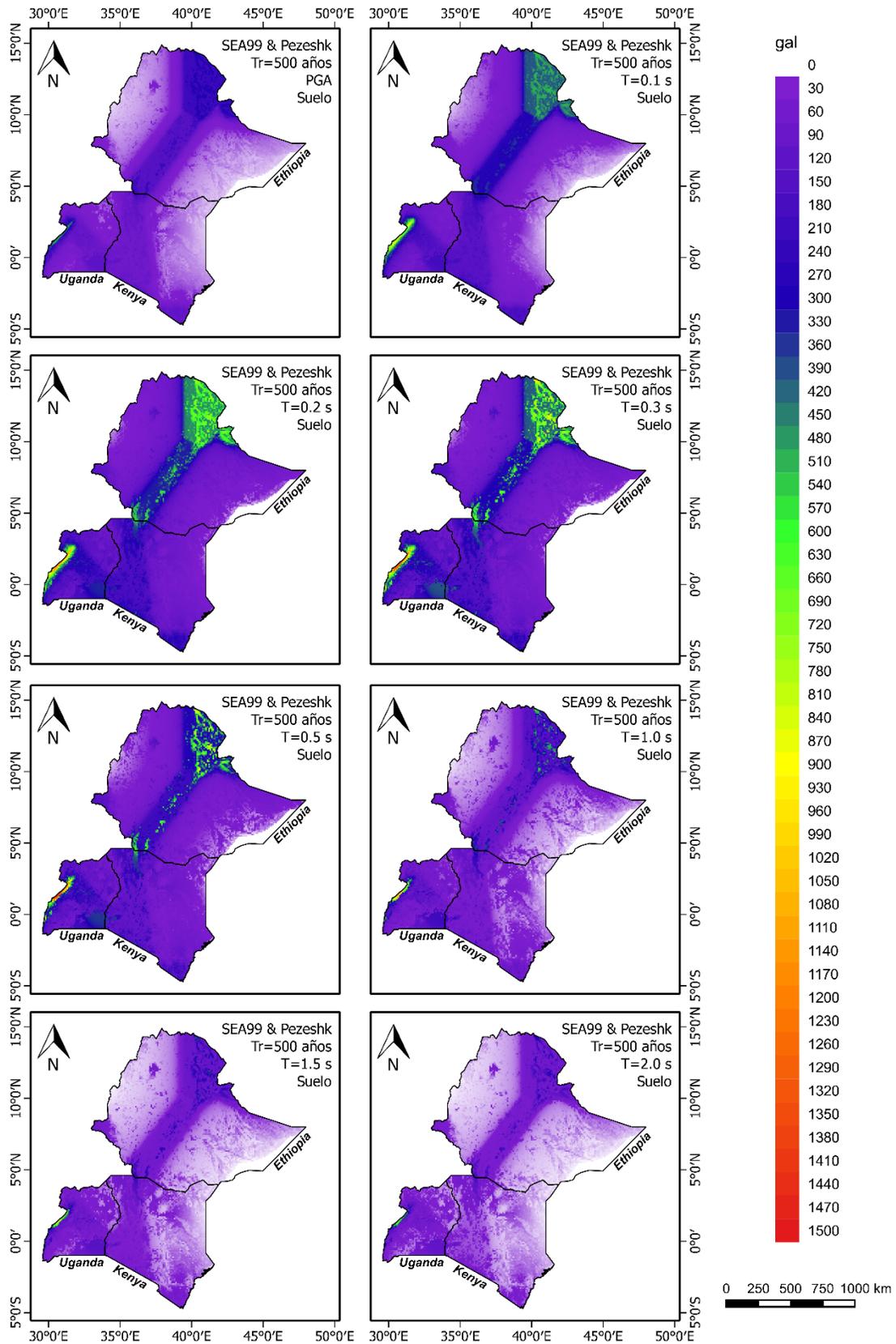


Figura A2.7. Valores de aceleración (gal), en suelo, para Tr=500 años

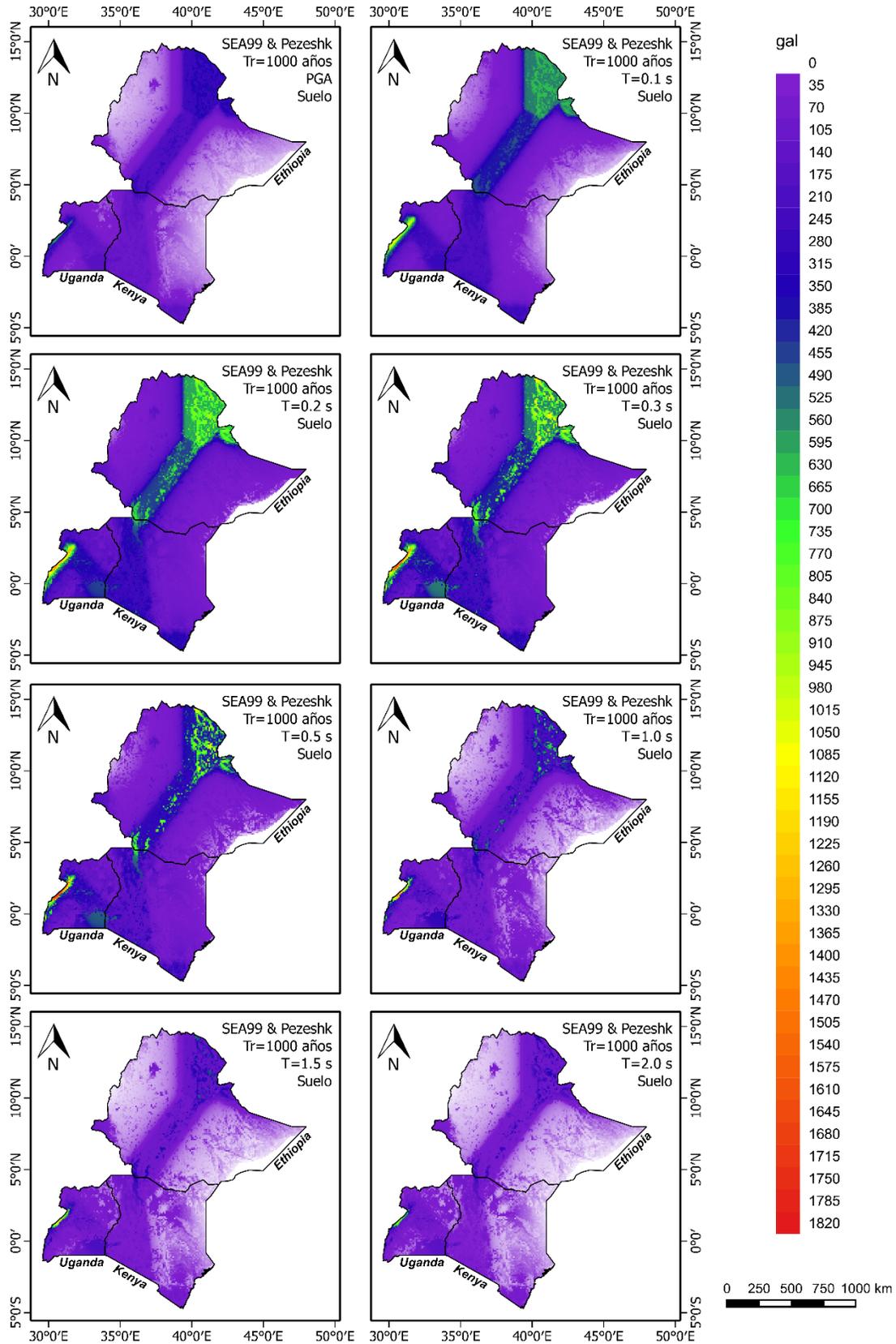


Figura A2.8. Valores de aceleración (gal), en suelo, para $Tr=1000$ años