



Evaluación probabilista del riesgo sísmico para el GAR 2015 Probabilistic seismic risk assessment for the GAR 2015

Omar Darío Cardona^{1*}, Mario G. Ordaz², Mario A. Salgado-Gálvez³,
Gabriel A. Bernal³, Miguel G. Mora³, Daniela Zuloaga⁴, Claudia P. Villegas⁴
y Mabel C. Marulanda³

¹Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia

²Profesor Titular, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., México

³CIMNE, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España

⁴INGENIAR: Grupo de Consultoría

RESUMEN

El Modelo Global del Riesgo (MGR), que se desarrolló inicialmente para el GAR13 y que ahora ha sido actualizado para GAR15, incorpora los componentes pertinentes para la evaluación del riesgo catastrófico: los elementos o bienes expuestos, el nivel de amenaza que les afecta y su vulnerabilidad frente a dicha amenaza. El principal resultado de la MGR es la curva nacional de excedencia de pérdidas (CEP) para cada país, que es una medida que representa la frecuencia anual en que una pérdida económica determinada puede superarse en el futuro. Se calcularon métricas tales como la pérdida anual esperada (PAE) y la Pérdida Máxima (PMP) de 216 países, derivando estas métricas directamente de la CEP de cada país. La PAE es la medida más robusta de riesgo, siendo una medida probabilística compacta, relativamente insensible a la incertidumbre. Esta métrica se calcula de la suma del producto de las pérdidas previstas de cada evento con la frecuencia anual de ocurrencia del mismo evento, suponiendo un proceso estacionario y exhaustivo de eventos (es decir, se consideran todos los eventos posibles). Además, la pérdida anual esperada puede ser expresada como una fracción del valor expuesto. Esta métrica versátil es conocida en la industria de seguros como la "prima pura", y se puede utilizar para expresar el riesgo de un edificio, de una cartera de edificios, de una ciudad o de un país. Se puede obtener para una sola o para múltiples amenazas, lo que permite considerar al mismo tiempo el riesgo agregado de diferentes amenazas. Por otra parte, la PMP es una medida compactada relacionada con la tasa anual de excedencia de pérdidas y se puede considerar como una medida complementaria a la PAE y como punto de referencia para dar cuenta de las pérdidas menos frecuentes (es decir, con amplios períodos de retorno) que pueden ser excedidas en el futuro.

Palabras clave: Riesgo sísmico, CAPRA, evaluación probabilista, métricas del riesgo.

ABSTRACT

The Global Risk Model (GRM), which was initially developed for the global risk assessment in GAR13 and is now updated for GAR15, incorporates the relevant components of catastrophe risk assessment: the exposed elements or assets, the level of hazard affecting them and their vulnerability to such hazard. The main outcome of the GRM is a national Loss Exceedance Curve (LEC) for each country, which is a metric that represents the annual frequency at that a determined economic loss may be exceeded in the future. Metrics such as the Average Annual Loss (AAL) and the Probable Maximum Loss (PML) curve were calculated for the 216 countries, by directly deriving them from the LEC of each country. The AAL is the most robust measure of risk, being a compact probabilistic metric that is relatively insensitive to uncertainty. This metric is calculated through the sum of the product of the expected losses from each event with the annual frequency of occurrence of the same event, assuming a stationary and exhaustive process of events (i.e. all the possible events are considered). Furthermore, the annual average loss can be expressed as a fraction of the exposed value. This versatile metric is known in the insurance industry as the "pure premium", and can be used to express the risk for a building, for a portfolio of buildings, for a city or for a country. It can be obtained for a single or for multiple hazards, allowing to consider at the same time the aggregated risk from different hazards. At the same time, the PML is a compacted measure related to the loss exceedance annual rate and can be considered as a complementary measure to the AAL, as benchmark for the amount of less frequent losses (i.e. with long return periods) that can be exceeded in the future.

Keywords: Seismic risk, insurance, CAPRA, probabilistic evaluation, risk metrics.

* odcardona@unal.edu.co



1 INTRODUCCIÓN

La evaluación del riesgo sísmico y por otras amenazas importantes a nivel global ha sido una iniciativa de la UNISDR (agencia de las Naciones Unidas para la reducción del riesgo de desastres) para aportar estimaciones globales de riesgo para el Global Assessment Report, GAR, que se publica cada dos años desde 2009. El modelo, basado en los desarrollos más recientes de la plataforma CAPRA (*Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment*), fue concebido como una iniciativa a largo plazo, que generó los primeros resultados para la mayoría de los países en el GAR13, pero que siguió en evolución y enriquecimiento continuo y ha aportado una nueva evaluación y Atlas de amenazas y riesgos para el GAR15 y la 3ª Conferencia Mundial de Reducción del Riesgo de Desastres, celebrada en marzo de 2015 en Sendai. El desarrollo del Modelo Global de Riesgo realmente comenzó después del GAR11, en el cual se incluyó la evaluación probabilista del riesgo de desastres para Colombia, México y Nepal. La construcción de la MGR es el resultado de la colaboración entre un amplio grupo de expertos que a través de una red internacional de colaboración, se convirtió en un gran equipo de modelación, trabajando juntos por más de 5 años para dar lugar a este hito en la evaluación del riesgo de desastres a nivel mundial. Es importante notar que la resolución y la precisión no sólo están asociadas con la valoración del peligro, sino también a la representación de la exposición y la caracterización de la vulnerabilidad. Por esta razón, es necesario tener la consistencia y compatibilidad en el nivel de rigor y los detalles en las diferentes fases de la evaluación del riesgo. La elección de la resolución está relacionada con el tipo de decisiones que este tipo de evaluación del riesgo intenta informar. Para este estudio, simplificaciones y suposiciones se han realizado, adecuadas para este trabajo a nivel mundial, por lo cual se ha sacrificado en parte la precisión. No obstante, se ha logrado obtener un “paisaje operativo del riesgo” de los países que permite una visión común y comparativa, su dimensión económica y la capacidad para recuperarse. En otras palabras, este análisis proporciona información sobre la capacidad de recuperación económica de los países, en términos de indicadores de flujo económico de los países. Como una manera de comunicar con facilidad y asertivamente el riesgo de desastres a los países, se desarrollaron unos perfiles de riesgo resumidos. Estos perfiles tienen la intención de ofrecer una visión de la situación de riesgo de desastres de cualquier país. Los Perfiles de Riesgo vienen a ser una referencia fundamental para los gobiernos conozcan el orden de magnitud de sus pasivos contingentes, para conocer su situación en relación con otros países de su región, y para tener en cuenta las implicaciones que tiene sobre el riesgo de desastres para su desarrollo desde las perspectivas de crecimiento social, económico y financiero. Este artículo describe el tipo de trabajo realizado (Cardona et al., 2015) con fines de divulgación y se orienta a ilustrar los resultados de riesgo sin entrar en detalles con respecto a las amenazas respectivas.

2 MODELACIÓN DE LA AMENAZA

Al respecto de la amenaza sísmica a nivel mundial Ordaz et al. presentan, en este mismo congreso, un artículo descriptivo del proceso de evaluación de esta amenaza. Para el GAR15 aparte de la amenaza sísmica también se evaluó la amenaza por tsunami, por viento huracanado, marea de tormenta, inundaciones debido a lluvias y parcialmente por cenizas volcánicas. La Figura 1 ilustra un mapa para un período de retorno de la aceleración espectral en el caso sísmico, obtenido con el CAPRA-Viewer de la UNISDR.

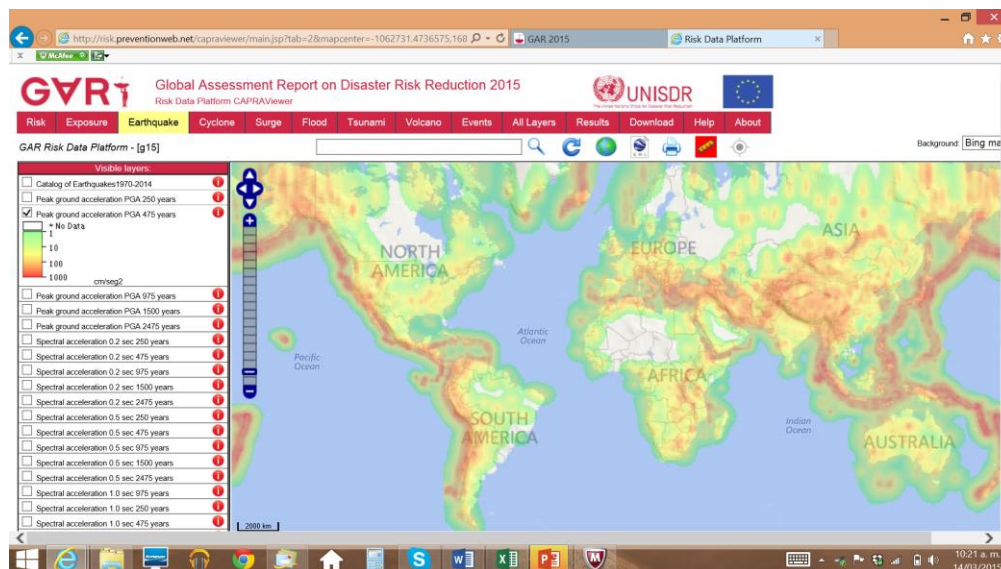


Figura 1: Ejemplo de mapa de amenaza sísmica de aceleración espectral para un período de retorno de 475 años.



3 CARACTERIZACIÓN DE LA EXPOSICIÓN

Para la evaluación del riesgo físico ante eventos naturales se requiere de una adecuada representación de la exposición; es decir, del inventario de componentes de infraestructura física que son susceptibles de sufrir daño ante la acción de dichos eventos. La pérdida física sobre cada componente o activo es el daño directo del cual se pueden desencadenar otras pérdidas o efectos de segundo orden con implicaciones en el mediano y largo plazo. Este estudio involucra sólo edificaciones y no tiene en cuenta efectos indirectos o pérdidas concatenadas o colaterales. El modelo de exposición desarrollado para este estudio, cuyo propósito es realizar una evaluación indicativa del riesgo tipo *coarse grain* a nivel mundial, considera únicamente el daño físico directo en las edificaciones urbanas por medio de un enfoque combinado, utilizando tanto información de indicadores socio-económicos a nivel nacional (*up to bottom*) y una distribución geográfica de población (*bottom up*) como principales fuentes de información.

De acuerdo a lo anterior, el modelo propuesto se basa en la estimación del número de personas que habitan en edificaciones de un tipo constructivo particular de cada una de las agrupaciones o sectores. El número de personas por tipo constructivo y sector en cada ubicación geográfica se convierte en un indicador de exposición y se utiliza como base para distribuir el valor económico expuesto. Para considerar la vulnerabilidad de los diferentes elementos expuestos de cada sector ante las amenazas naturales, cada componente o activo es agrupado de acuerdo con el tipo constructivo al que pertenece. Así por ejemplo, el grupo de edificaciones residenciales de población de bajos ingresos de un área urbana estará conformado por edificaciones de varios tipos constructivos como edificaciones en mampostería simple y edificaciones en madera, que se conoce son las predominantes en ese tipo de estrato socioeconómico. Una importante limitación es que no considera diferencias por la ubicación geográfica a nivel subnacional de los elementos expuestos, no obstante si considera las diferencias que existen de un país al otro. Adicionalmente y con el fin de establecer una referencia que permita la comparación entre países y a la vez contar con valores económicos que representen el nivel de desarrollo y el capital real del país, se utiliza como valor económico físico expuesto, el stock de capital urbano descontando el valor del terreno. La Figura 2 ilustra un mapa de valor expuesto. Para el GAR15 se trabajaron pixeles de 5kmx5km excepto en las costas donde se realizó la exposición en pixeles de 1kmx1km.

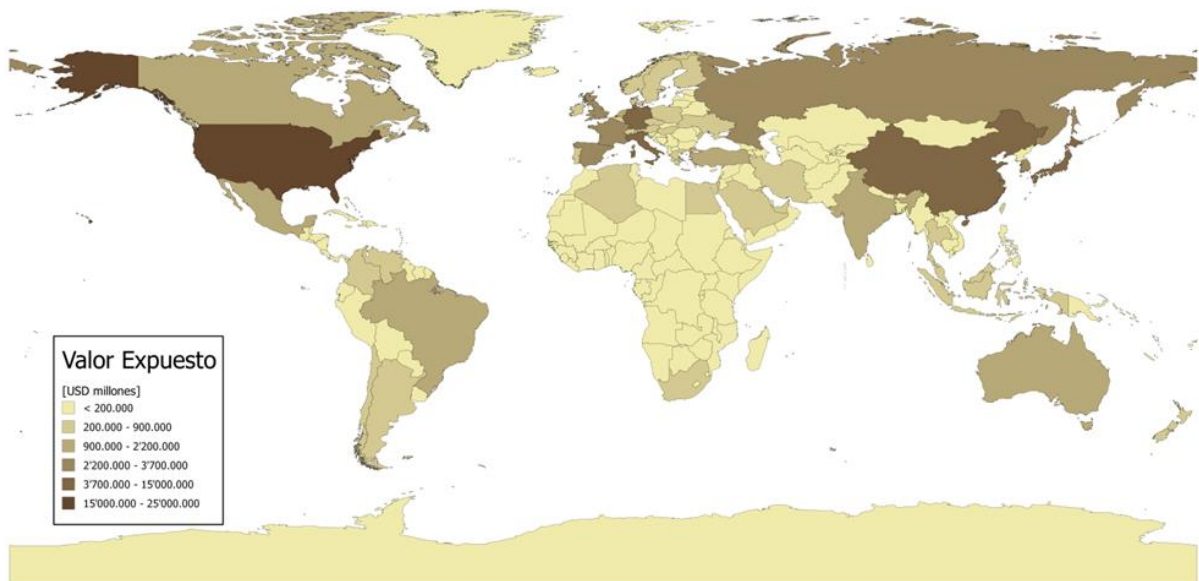


Figura 2: Ejemplo de mapa de valoración de la exposición a nivel de países.

4 FUNCIONES DE VULNERABILIDAD

Para efectos de la evaluación probabilista del riesgo de desastres, la vulnerabilidad de los elementos expuestos se representa mediante funciones que relacionan la intensidad del fenómeno que caracteriza de amenaza con el nivel medio del daño o afectación física directa relativa. Estas son las llamadas funciones de vulnerabilidad que se deben estimar para cada uno de los tipos constructivos, de manera que puedan asignarse a cada uno de los componentes de la base de datos de exposición. Cada función de vulnerabilidad está caracterizada por un valor conocido como relación media del daño, RMD, (o MDR por sus siglas en inglés *Mean Damage Ratio*) y su varianza correspondiente para cada nivel de intensidad de la amenaza. Con esto es posible estimar la función de probabilidad de la pérdida en cada nivel de intensidad de la amenaza considerada, que en general corresponderá a un escenario de amenaza específico de análisis. Para el GAR15 las curvas de vulnerabilidad fueron propuestas por regiones por grupos de especialistas según el conocimiento de los tipos estructurales de los países de cada región. La Figura 3 ilustra genéricamente varias funciones de vulnerabilidad para el caso sísmico.

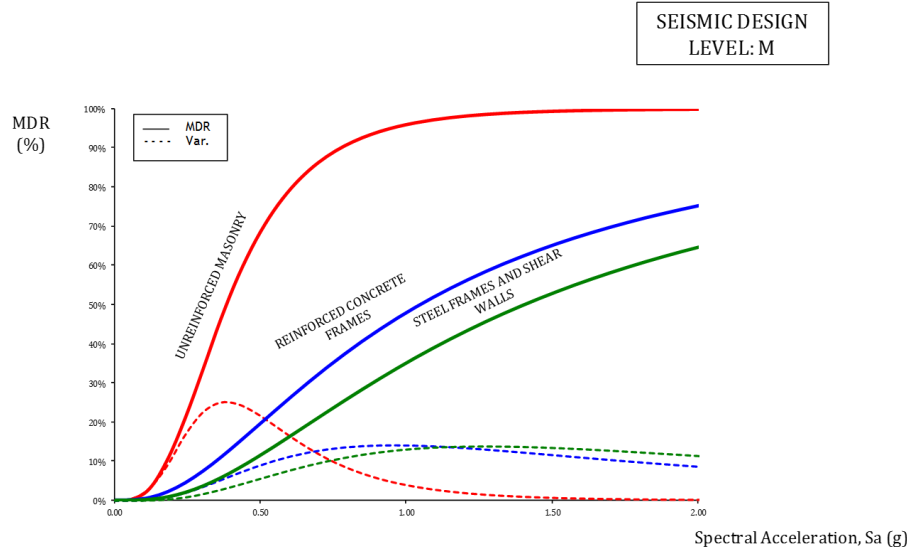


Figura 3: Ejemplo de funciones de vulnerabilidad para el caso sísmico en el modelo global.

5 EVALUACIÓN DEL RIESGO A NIVEL GLOBAL

El análisis probabilista de riesgo se fundamenta en determinar las funciones de densidad de probabilidad de pérdida en cada uno de los eventos de amenaza, para diferentes niveles de intensidad, estimando dicha pérdida en cada uno de los elementos expuestos por los eventos estocásticos incluidos en el conjunto con que se representan cada una de las amenazas. Las pérdidas sobre los elementos expuestos corresponden al grado de daño físico que se estima para los diferentes niveles de intensidad, dicho grado de daño constituye la pérdida económica relativa al valor total expuesto del elemento. Las pérdidas para un escenario particular se calculan como la suma probabilista de las pérdidas que se presentan en cada uno de los bienes expuestos, sumando estas de manera que se considere su carácter aleatorio. Una vez se cuenta con la distribución de probabilidad de las pérdidas para cada escenario estocástico, las pérdidas pueden agregarse con la matemática adecuada para de obtener diferentes métricas de riesgo. Utilizando la plataforma CAPRA se llevó a cabo la evaluación probabilista del riesgo de desastre para 216 países, tanto para el total de activos expuestos (nacional), como para los elementos cuya reposición sería de responsabilidad del gobierno en caso de un desastre (responsabilidad fiscal). Los resultados de esta evaluación de riesgo se presentan a partir de dos métricas de riesgo puntuales: La Pérdida Anual Esperada (PAE) o pérdida anual promedio en valor económico y en porcentaje con respecto al valor de los activos expuestos (también conocida como prima pura o prima técnica de riesgo). En términos probabilistas la PAE es la esperanza matemática de la pérdida anual, y la Pérdida Máxima Probable (PML por sus siglas en inglés) para diferentes períodos de retorno.

5.1 Procedimiento analítico

La evaluación del riesgo se obtiene como resultado de la convolución de la amenaza y la vulnerabilidad del inventario de los elementos expuestos, con el fin de calcular las frecuencias de ocurrencia de niveles específicos de pérdida en lapsos determinados de tiempo. El riesgo comúnmente es descrito mediante la *curva de excedencia de pérdidas*, que especifica las frecuencias, usualmente anuales, con las que ocurrirán eventos en que se exceda un valor especificado de pérdida. Esta frecuencia anual de excedencia se conoce también como tasa de excedencia y puede calcularse mediante la Ecuación (1), que es una de las múltiples formas que adopta el teorema de la probabilidad total:

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

donde $v(p)$ es la tasa de excedencia de la pérdida p y $F_A(\text{Evento } i)$ es la frecuencia anual de ocurrencia del evento i , mientras que $Pr(P > p | \text{Evento } i)$ es la probabilidad de que la pérdida P sea superior a p , dado que ocurrió el i -ésimo evento. La suma en la ecuación anterior se hace para todos los eventos potencialmente dañinos. El inverso de $v(p)$ es el período de retorno de la pérdida p , identificado como Tr .



La curva de excedencia 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 (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 (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.
- Un vez determinada la distribución de probabilidad de la suma de las pérdidas en este evento, calcular la probabilidad de que ésta 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 (1). Es interesante señalar también que en esta ecuación no se hace distinción entre eventos que pertenezcan a diferentes amenazas. En efecto, la suma en esa ecuación podría incluir, por ejemplo, sismos y huracanes o sismos y erupciones volcánicas. Esto puede hacerse porque se ha supuesto que tanto los eventos asociados a una misma amenaza como los eventos asociados a distintas amenazas no ocurren simultáneamente. Sin embargo, algunos fenómenos potencialmente dañinos sí ocurren simultáneamente, por lo que en estos casos hay que tomar provisiones especiales para la determinación de la distribución de probabilidad de p . Por ejemplo, el paso de un huracán genera tanto un campo de vientos fuertes, como inundaciones por aumento en los niveles de la marea y por las lluvias intensas asociadas; los daños por viento y por inundación, entonces, ocurren casi al mismo tiempo, y no pueden considerarse eventos independientes. En este caso se dice que las amenazas están asociadas a la misma *temporalidad*. De acuerdo con lo anterior, un terremoto, entendido como el movimiento del suelo debido al paso de ondas sísmicas, un tsunami y los deslizamientos de tierra que pueden inducirse por el terremoto ocurrirían en una misma temporalidad, pero en una temporalidad diferente, por ejemplo, a la que ocurrirían daños por viento, marea de tormenta e inundación. La evaluación de pérdidas durante un escenario se realiza entonces considerando que las amenazas que pertenecen a una misma temporalidad ocurren de manera simultánea. No existe una manera sencilla y libre de ambigüedades para evaluar las pérdidas en estas condiciones (varias amenazas ocurriendo simultáneamente). Para los fines de este enfoque se utiliza la siguiente expresión para evaluar la pérdida en cada uno de los bienes expuestos, que corresponde a un modelo de daño en cascada, en el cual el orden de exposición a las diferentes intensidades es irrelevante:

$$P_i = \prod_{j=1}^M (1 - P_{ij}) \quad (2)$$

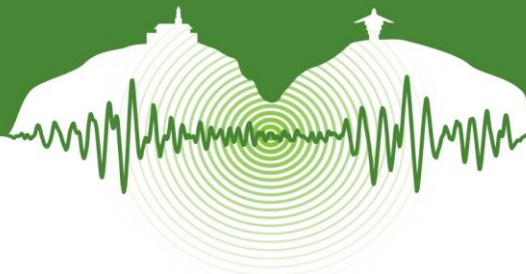
en donde P_i es la pérdida asociada al escenario i , P_{ij} es la pérdida asociada al escenario i por concepto de la amenaza j , y M es el número de amenazas simultáneas consideradas en la temporalidad a la que pertenece el escenario i . Conviene recordar que P_{ij} son variables aleatorias y, por tanto, P_i también lo es. Sin embargo, si las distribuciones de probabilidad de las P_{ij} son conocidas, y se hacen suposiciones razonables sobre su nivel de correlación (que están perfectamente correlacionadas, por ejemplo) los momentos de la distribución de probabilidad de P_i pueden determinarse a partir de la Ecuación (2).

Como se observa en la Ecuación (3), 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 una 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. Por razones metodológicas, la probabilidad de excedencia de la pérdida p , dado que ocurrió un evento, suele expresarse de la siguiente manera:

$$Pr(P > p | Evento) = \int_I Pr(P > p | I) f(I | Evento) dI \quad (3)$$

El primer término de la integral, $Pr(P > p | I)$, es la probabilidad de que la pérdida exceda el valor p dado que la intensidad local fue I ; este término, por tanto, toma en cuenta la incertidumbre que hay en las relaciones de vulnerabilidad. Por otro lado, el término $f(I | Evento)$ 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.

Como se indicó anteriormente, la curva calculada aplicando la Ecuación (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 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 cantidad P_{AE} anualmente. En un sistema simple de seguro, la pérdida anual esperada sería la prima pura anual justa. La P_{AE} puede obtenerse por integración de $\nu(p)$ o mediante la siguiente expresión:

$$P_{AE} = \sum_{i=1}^{Eventos} E(P|Evento i)F_A(Evento i) \quad (4)$$

La P_{AE} se calcula como la suma del producto entre las pérdidas esperadas para determinado evento y la probabilidad de ocurrencia de dicho evento en un período de un año, para todos los eventos –estocásticos– considerados. En términos probabilistas, la P_{AE} es la esperanza matemática de la pérdida anual. La P_{AE} considera las pérdidas de cada elemento expuesto debidas a todos los eventos que se presentan durante su vida útil y considera además su recurrencia cuando se calcula el promedio anual de éstas.

Pérdida máxima probable (PMP) o PML, por las iniciales en inglés de Probable Maximum Loss. Se trata de una pérdida que ocurre con muy poca frecuencia; 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 “con muy poca frecuencia”. De hecho, la elección de un periodo de retorno u otro para tomar cierta decisión depende de la aversión al riesgo de quien lo está tomando. La PML representa el valor esperado de la distribución de pérdidas agregadas para una frecuencia anual de excedencia dada, o su inverso, el periodo de retorno. Es decir, la probabilidad de que las pérdidas igualen o excedan un umbral para un periodo de retorno dado. La estimación de la PML es sólo una aplicación de la curva de excedencia de pérdidas.

5.2 Resultados de la evaluación

Aplicando la formulación analítica descrita utilizando la plataforma CAPRA-GIS se llevó a cabo la evaluación probabilista del riesgo de desastre de 216 países, considerando las diferentes amenazas consideradas (ver Cardona et al. 2014). El informe tuvo como propósito obtener los resultados de riesgo en cada país para el total de elementos expuestos en el país, lo que incluye los activos del sector público y el sector privado (riesgo total o nacional). En otras palabras es importante evaluar el riesgo de responsabilidad fiscal (riesgo soberano fiscal), que debe ser un referente para, por ejemplo, ministros de economía y finanzas, entre otros interesados. Este informe aporta información útil del pasivo contingente no explícito que implican los desastres para el balance de cada nación. La Figura 4 presenta el resultado absoluto de la pérdida anual esperada para los diferentes países. La Figura 5 presenta el valor de la pérdida anual espera al millar, normalizada por el valor de la exposición.

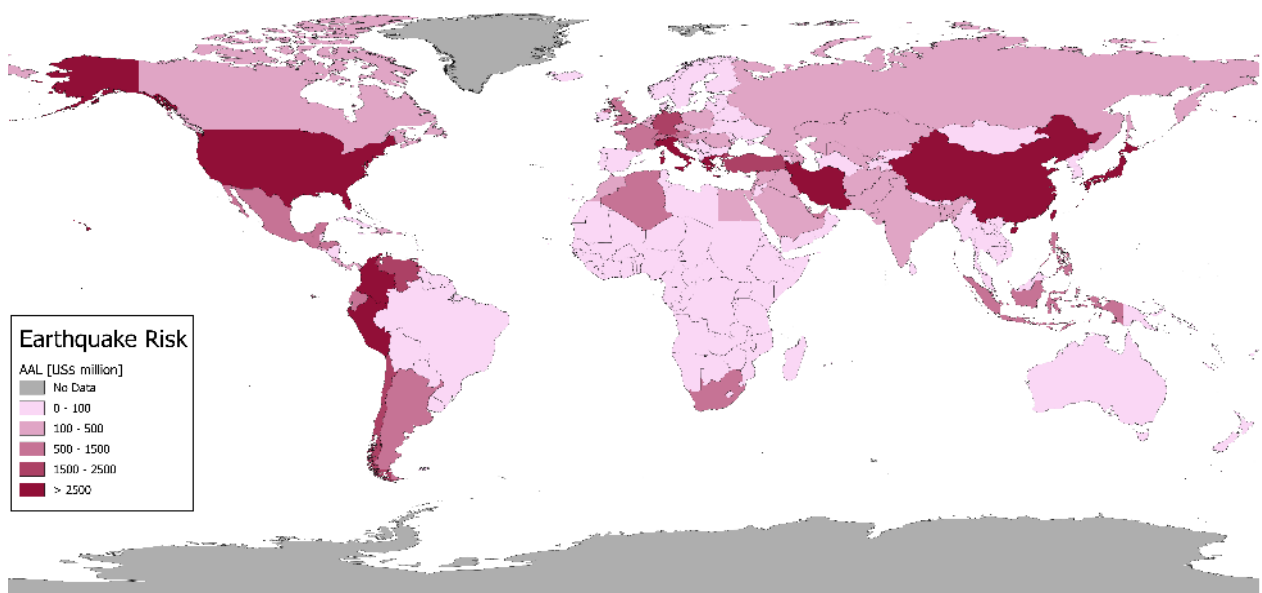


Figura 4: Pérdida anual esperada en millones de US dólares por terremoto por país.

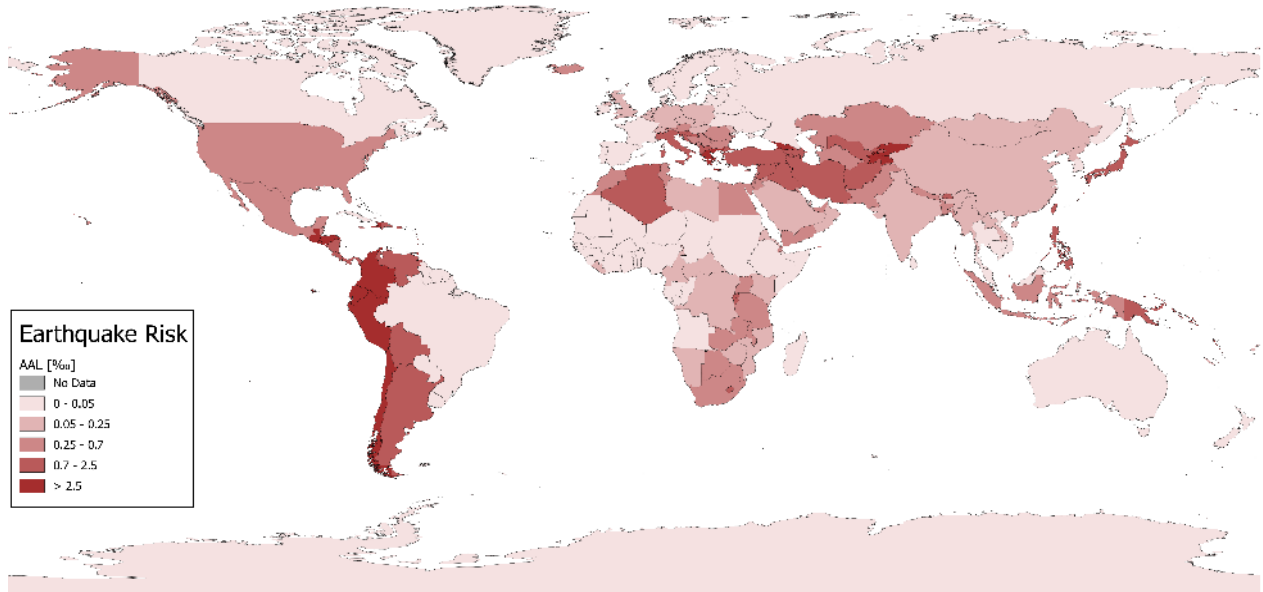


Figura 5: Pérdida anual esperada al millar, con respecto al valor expuesto, por terremoto por país.

Esta evaluación ha permitido hacer un ranking de los países a nivel global, por regiones y por nivel económico. Utilizando la pérdida anual esperada y relacionándola con el capital producido (o stock de capital), la formación fija de capital bruto, los ahorros y las reservas y el gasto social en salud y educación se ha creado una serie de indicadores que dan cuenta de las implicaciones del riesgo de desastres para el desarrollo. A manera de ejemplo, la Figura 6 ilustra a nivel global por regiones el absoluto valor de la pérdida anual esperada y normalizado con base en el capital producido o valor del stock de capital.

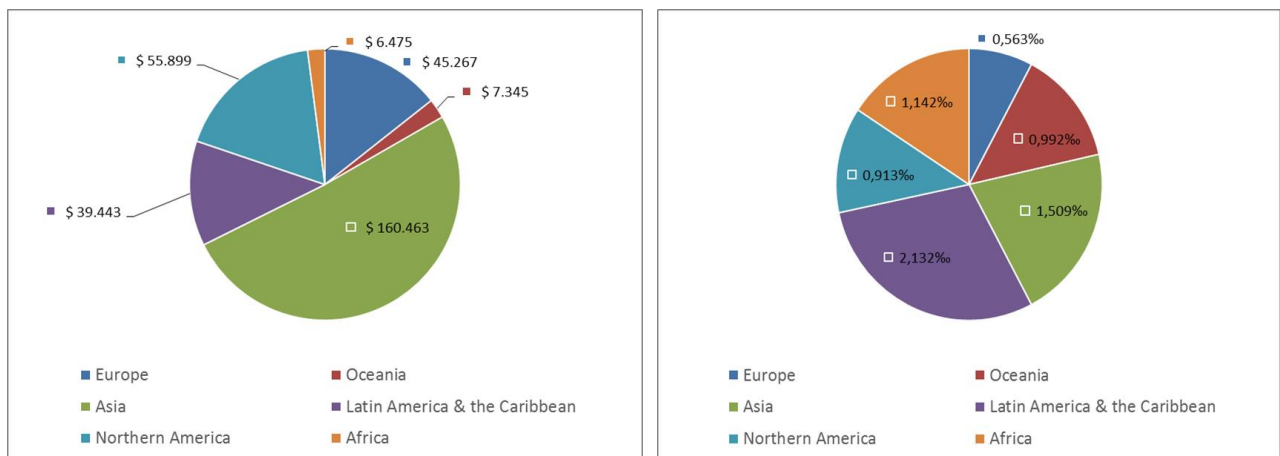


Figura 6: A la derecha la pérdida anual esperada en valor absoluto y a la izquierda al millar del valor expuesto.

Las evaluaciones se han realizado para las diferentes amenazas. La Figura 7 presenta un ejemplo de perfil de riesgo resumido para un país, el cual incluye los diferentes valores de pérdidas y de indicadores asociados. Con base en este perfil se han estado desarrollando otros perfiles de riesgo como los que se encuentran disponibles en la página web del GAR15 y la UNISDR y en la página www.preventionweb.net. Los informes de soporte técnico con toda la información acerca del enfoque metodológico y los resultados y rankings de los países están disponibles como *background papers* del GAR15. Esta evaluación de riesgo es la primera que se realiza a nivel global con una técnica totalmente probabilista y una metodología unificada para todos los países, que puede ser utilizada también a nivel local o subnacional en caso de que la información lo permita.



Belize

Latin America and the Caribbean

GART Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2015

Brief Country Risk Profile



National Information

Population (thous)	331 900
- Urban (%)	44.3
- Rural (%)	55.7
Land area (km ²)	22 810.0
Pop. Density (inhab./km ²)	14.6
GINI (value)	53.10
HDI (value)	0.73
Exposed Value (million USD)	5 995
- Fiscal (million USD)	326

Economic Indicators

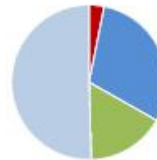
GDP Gross Domestic Product (million USD)	1 624.3
GDP per capita (USD)	4 893.9
GNE Gross National Expenditure (million USD)	1 713.1
SE Social Expenditure (million USD)	
GS Gross Savings (million USD)	200.1
GFCF Gross Fixed Capital Formation (million USD)	289.9
TR Total Reserves (million USD)	402.8
Public spending on education (% GDP)	6.6
Health Expenditure (% GDP)	5.8



National & Fiscal Portfolio

Hazard	Average Annual Loss		Probable Maximum Loss (mean return period)			
	Value (million USD)	Premium (%)	250	500	1000	1500
Earthquake (Fiscal)	3.0	0.49	44.8	93.6	152.5	237.9
Cyclonic Wind (Fiscal)	28.2	4.70	816.0	1 281.2	1 529.2	1 816.8
Storm Surge (Fiscal)	15.4	2.56	400.4	647.8	697.3	739.4
Tsunami (Fiscal)	—	—	—	—	—	—
Flood (Fiscal)	47.3	7.89	—	—	—	—
National	93.7	15.64	—	—	—	—
Fiscal	5.3	10.31	—	—	—	—

AAL Distribution by Hazard



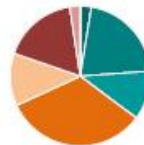
Disaster Risk Development Implications



Exposure & Risk Summary (Earthquake & Cyclonic Wind)

Sector	Exposed value (million USD)		Average Annual Loss (million USD) [%]	
	Low	High	Value	Loss
Residential (Income)	Low	High	164.9	0.8 4.76
	Middle low	High	1 273.3	6.6 5.20
	Middle high	High	688.4	3.5 5.14
Services	Commercial	High	1 942.0	10.2 5.27
	Industrial	High	724.6	3.8 5.18
Education	Private	High	1 039.3	5.4 5.18
	Public	High	157.6	0.7 4.72
Health	Private	High	1.4	0.002 1.64
	Public	High	3.3	0.01 1.66
Government Assets	High	—	—	—
National	—	—	5 994.8	31.1 5.18
Fiscal	—	—	325.8	1.5 4.71

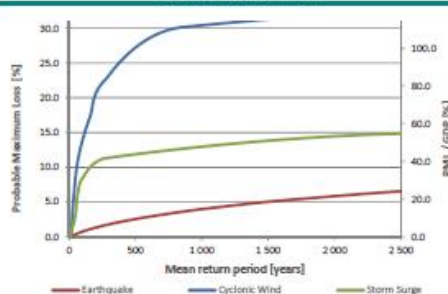
AAL Distribution by Sector



DRDI Components

Disaster Risk Social Implications	DRSI	71.4
Disaster Risk Growth & Financial Implications	DRGI	78.4
Disaster Risk Economic Implications	DREI	76.7

Probable Maximum Loss



Risk Indicators

	EQ	WD	SS	TSU	FL
AAU/GS	0.01	0.14	0.08		0.24
(Fiscal)	0.001	0.01	0.004		0.03
AAU/GNE	0.002	0.02	0.01		0.03
(Fiscal)	0.0001	0.001	0.000		0.00
AAU/TR	0.01	0.07	0.04		0.13
(Fiscal)	0.000	0.004	0.002		0.03
AAU/GCF	0.01	0.10	0.05		0.16
(Fiscal)	0.001	0.01	0.003		0.03
AAU/SE					
(Fiscal)					
PML/GNE	0.03	0.46	0.29		
(Fiscal)	0.002	0.03	0.02		
PML/GDP	0.03	0.50	0.30		
(Fiscal)	0.002	0.03	0.02		



International Centre for Numerical Methods in Engineering



INGENIAR Ltd



CAPRA Team

Figura 7: Ejemplo de perfil resumido de riesgo de desastres para un país.



CONCLUSIONES

Se ha realizado por primera vez la modelación de la amenaza y el riesgo sísmico de manera probabilista a nivel mundial a partir del catálogo mundial de sismos y de escenarios estocásticos derivados. Se ha realizado una definición y asignación de funciones de vulnerabilidad considerando diferentes niveles de complejidad (para los centros poblados) y niveles de desarrollo (para los países) de acuerdo con indicadores socio-económico de los países y con el aporte de especialistas de las diferentes regiones. El riesgo sísmico y en general multi-amenaza se ha cuantificado a partir de métricas probabilistas como la pérdida anual esperada y la pérdida máxima probable, las cuales normalizadas con diferentes variables de flujo económico permiten la comparación de niveles de riesgo entre los diferentes países. El marco conceptual asociado a la evaluación del riesgo que aquí se presenta, puede ser empleado para estimar el riesgo en otras escalas (nacional, subnacional, urbano, local) para cualquier portafolio de elementos expuestos. Es decir, que usando la misma “aritmética” es posible obtener resultados con mayores niveles de resolución que sean útiles para la toma de decisiones al nivel correspondiente.

REFERENCIAS

- Cardona, O.D. 2009. *La Gestión Financiera del Riesgo de Desastres: Instrumentos Financieros de Retención y Transferencia para la Comunidad Andina*, PREDECAN. ISBN: 978-9972-787-79-9, Comunidad Andina, Lima.
- Cardona, O.D., Ordaz, M.G., Marulanda, M.C., and Barbat, A.H. 2008a. Estimation of Probabilistic Seismic Losses and the Public Economic Resilience—An Approach for a Macroeconomic Impact Evaluation. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol 12, N° S2, pp. 60-70. ISSN: 1363-2469 print / 1559-808X online, Taylor & Francis, Philadelphia, PA.
- Cardona, O.D., Ordaz, M.G., Yamín, L.E., Marulanda, M.C., and Barbat, A.H. 2008b. Earthquake Loss Assessment for Integrated Disaster Risk Management. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol 12, N° S2, pp. 48-59. ISSN: 1363-2469 print / 1559-808X online, Taylor & Francis, Philadelphia, PA.
- Cardona, O.D., Ordaz, M.G., Marulanda, M.C., and Barbat, A.H. 2008c. Fiscal Impact of future earthquakes and country's economic resilience evaluation using the disaster deficit index, Innovation Practice Safety: Proceedings *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.
- Cardona, O.D., Ordaz, M.G., Yamin, L.E., Arámbula, S., Marulanda, M.C., and Barbat, A.H. 2008d. Probabilistic seismic risk assessment for comprehensive risk management: modeling for innovative risk transfer and loss financing mechanisms, Innovation Practice Safety: Proceedings *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.
- Cardona, O.D., Ordaz, M.G., Reinoso, E., Yamín, L.E., and Barbat, A.H. 2010. Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment (CAPRA). International initiative for disaster risk management effectiveness. Procedures of the 14th European conference on earthquake engineering, Ohrid, Macedonia.
- Cardona, O.D., Ordaz, M.G., Salgado, M.A., Bernal, G.A., Mora, M., Zuloaga, D., Marulanda, M.C., González, D.M., y Yamín L.E. 2012. Evaluación probabilista y espectral de la amenaza y riesgo sísmico a nivel mundial para el GAR 2013. VI Congreso Colombiano de Ingeniería Sísmica, AIS, UIS, Bucaramanga.
- Cardona, O.D., Ordaz, M.G., Mora, M., Salgado, M.A., Bernal, G.A., Zuloaga, D., Marulanda, M.C., Yamín, L.E., and González, D. 2014. Global risk assessment: A fully probabilistic seismic and tropical cyclone wind risk assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*.
- Cardona, O.D., Ordaz, M.G., Reinoso, E., Yamín, L.E., Barbat, A.H. 2012. CAPRA – Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment: International Initiative for Risk Management Effectiveness. Procedures of the 15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon, Portugal.
- Cardona, O.D., Ordaz, M.G., Salgado, M.A., Bernal, G.A., Mora, M., Zuloaga, D., Marulanda, M.C., González, D.M., and Villegas, C.P. 2014. Update on the Probabilistic Modelling of Natural Risks at Global Level: Global Risk Model, GAR15, (CIMNE & INGENIAR) UNISDR, Geneva.
- CIMNE and Associates. 2013. Probabilistic Modelling of Natural Risks at the Global Level: Global Risk Model, GAR13, UNISDR, Geneva.
- Marulanda, M.C. 2013. *Modelación Probabilista de Pérdidas Económicas por Sismo para la Estimación de la Vulnerabilidad Fiscal del Estado y la Gestión Financiera del Riesgo Soberano*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Marulanda, M.C., Cardona, O.D., Ordaz, M.G., y Barbat, A.H. 2008a. *La gestión financiera del riesgo desde la perspectiva de los desastres: Evaluación de la exposición fiscal de los Estados y alternativas de instrumentos financieros de retención y transferencia del riesgo*. Monografía CIMNE IS-61, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Ordaz, M., Cardona, O., Salgado, M., Bernal, G., Singh, K., y Zuloaga, D. 2014a. Probabilistic seismic hazard assessment at global level. *International Journal of Disaster Risk Reduction*.
- United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR). 2013. Global Assessment Report for Disaster Risk Reduction, GAR2013. Geneva.
- United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR). 2015. Global Assessment Report for Disaster Risk reduction, GAR2015. Geneva.
- Woo, G. 1999. *The Mathematics of Natural Catastrophes*, Imperial College Press.