Geofísica Internacional (2026) **65-3**: 2239- 2250

Nota sobre la definición de demandas sísmicas para el diseño de edificaciones en Colombia

Julián Montejo[1,2,a], Helen Crowley[1,b], Vitor Silva[1,3,c], Catalina Yepes-Estrada[1,d], Daniela González[1,e] y Marco Pagani[1,4,f]

Abstract

The definition of seismic design parameters for all types of infrastructure is crucial to ensuring good performance in countries located in areas with significant seismic risk. The main objective of the codes or standards governing earthquake-resistant design is to protect life; however, the definition of the design coefficient (*cs*), which determines the lateral load resistance of a structure under seismic actions, also has an economic and social impact related to the construction cost, and the expected future losses. Seismic hazard focuses on the study of expected seismic intensity (PGA, PGV, among others) and its recurrence, while seismic risk is related to the study of the impacts generated due to seismic actions on a single element or a portfolio of exposed elements, usually expressed with different metrics, such as probability of collapse, number of fatalities, and economic losses. In this context, the definition of *cs*, often represented in parametric design spectra, should include both threat and risk analysis that allows for the integration of different approaches, always prioritizing safety aspects. This paper explores the most widely accepted methodologies worldwide for defining *cs* in earthquake-resistant standards and proposes the use of its envelope, justifying that the benefit in terms of collapse safety is much greater than the impact on the total expected cost over the useful life. To this end, Colombia was taken as a case study, a country that has various seismic hazard and risk studies, design codes, and openly and freely available information.

Key words: Seismic design, PSHA, Probability of collapse, Optimal design, RTGM.

Resumen

La definición de los parámetros de diseño sismorresistente de todo tipo de infraestructura resulta crucial para asegurar un buen desempeño en países ubicados en zonas con amenaza sísmica significativa. El objetivo principal de los códigos o normas que rigen el diseño sismorresistente es la protección de la vida; sin embargo, la definición del coeficiente de diseño (*cs*), que determina la resistencia a carga lateral de una estructura ante acciones sísmicas, tiene además un impacto económico y social, debido al costo de construcción y a las pérdidas futuras esperadas. La amenaza sísmica se centra en el estudio de la intensidad sísmica esperaba (PGA, PGV, entre otros), y su recurrencia, mientras que el riesgo sísmico se relaciona con el estudio de los impactos generados debido a las acciones sísmicas sobre un único elemento o un portafolio de elementos expuestos, usualmente expresado con diferentes métricas, como probabilidad de colapso, número de fatalidades y pérdidas económicas. En este contexto, la definición de *cs*, a menudo representada en espectros de diseño paramétrico, debería incluir un análisis tanto de amenaza como riesgo que permita integrar diferentes métricas como la probabilidad de excedencia, la probabilidad de colapso o las pérdidas futuras esperadas. En este trabajo se exploran las metodologías más aceptadas a nivel mundial para la definición de *cs* en normas sismorresistentes y se propone el uso de su envolvente, justificando que el beneficio en términos de seguridad de colapso es mucho mayor que el impacto en el costo total esperado a lo largo de la vida útil. Para ello, se tomó como caso de estudio a Colombia, un país que cuenta con diversos estudios de amenaza y riesgo sísmico, códigos de diseño e información disponible de manera abierta y libre.

Palabras clave: Diseño sismorresistente, PSHA, Probabilidad de colapso, Diseño Óptimo, RTGM.

Received: June 30, 2025; Accepted: April 21, 2026 ; Published on-line: July 1, 2026. https://doi.org/10.22201/igeof.2954436xe.2026.65.3.1899

Editorial responsibility: Dr. Mario Gustavo Ordaz-Shroeder, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería.

* Corresponding author: Julián Montejo Espitia
[1] Global Earthquake Model (GEM) Foundation, Pavía/Italia.
[2] Università degli Studi "Gabriele d'Annunzio" di Chieti e Pescara, Chieti/ Italia.
[3] Universidad de Aveiro/Departamento de Ingeniería Civil, Aveiro/Portugal.
[4] NTU / Institute of Catastrophe Risk Management, Singapur.
ORCID: [a]0000-0002-7393-4280, [b]0000-0002-1216-1245, [c]0000-0003-4408-3883, [d]0000-0001-8774-1466, [e]0009-0004-3866-3886, [f]0000-0001-8125-1925

CC BY NC SA

1. Introducción

Colombia es un país localizado en el noroeste del continente suramericano, en una zona geológicamente compleja debido a la interacción de las placas tectónicas de Nazca, Sudamérica y Caribe, las cuales generan sismos con diversas características (Sarria Molina, 2003; Vargas *et al.*, 2004). En el territorio nacional, es posible encontrar sismos corticales, sismos de subducción interplaca e intraplaca (Zona de Benioff), y eventos de sismicidad intermedia concentrados en el nido de Bucaramanga (Taboada *et al.*, 2000; Pulido, 2003).

Debido a estas condiciones, en el país se han registrado al menos 15 sismos con intensidad estimada IX o mayor en la escala EMS-98, clasificados como muy destructivos o catastróficos. La Tabla 1 presenta la magnitud y la máxima intensidad macrosísmica registrada para cada uno de los sismos (Sarabia Gómez *et al.*, 2022), siendo el más antiguo el evento ocurrido en 1644 en la zona de Pamplona, Norte de Santander.

La reconocida sismicidad en Colombia ha impulsado el desarrollo de diversos estudios y mapas de amenaza sísmica a escala nacional (Ramírez & Estrada, 1977; Sarria, 1978; AIS, 1984, AIS, 1996, AIS, 2010; Gallego, 2000; Salgado *et al.*, 2010; Salgado-Gálvez *et al.*, 2016; Arcila *et al.*, 2020), así como la estimación de riesgo tanto a nivel nacional (UNGRD *et al.*, 2018), como en áreas de gran interés (Yamin & Bernal, 2013; Salgado-Gálvez *et al.*, 2014; Acevedo *et al.*, 2020). Estos estudios buscan comprender cuantitativamente la sismicidad del territorio en términos de las intensidades sísmicas esperadas -amenaza-, o de sus afectaciones -riesgo-, y su probabilidad de ser excedidas.

La mayoría de estos estudios se enfocan en la evaluación probabilística de la amenaza sísmica (PSHA por sus siglas en inglés), cuya principal aplicación es en la formulación de normas de diseño sismorresistente. A nivel global, existe una estrecha relación entre los modelos PSHA y las normas sismorresistente (Esteva, 1970; Algermissen & Perkins, 1976, ATC3, 1978; Leyendecker *et al.*, 1995; García-Mayordomo *et al.*, 2004; Stucchi *et al.*, 2011; Khose *et al.*, 2012; Crowley *et al.*, 2021; Pavel *et al.*, 2024), y Colombia no es la excepción. Los modelos de amenaza sísmica formulados en el país han servido como base para el desarrollo de los distintos códigos de diseño sismorresistente, tales como el código colombiano de construcciones sismoresistentes (AIS, 1983; MOPT, 1984), la Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98 (MDE, 1998; AIS, 1998), y su actualización de 2010 (MAVDT, 2010), la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14 (AIS, 2014), y la próxima actualización de la NSR-10, en desarrollo desde la década anterior.

Como parte de las discusiones en torno a la actualización de la NSR-10, y en particular sobre la demanda sísmica de diseño, en esta nota se discuten diferentes metodologías para la definición de *cs*, y se justifica el uso de su envolvente.

Es importante aclarar que este trabajo no pretende recomendar el uso de un modelo de amenaza sísmica en particular, sino analizar las metodologías utilizadas para definir parámetros de

Tabla 1. Resumen de sismos registrados en Colombia con intensidad EMS-98 IX o mayor.

Fecha	Hora local	Mw	Autor Magnitud	Intensidad máxima (EMS-98)	Autor Intensidad
1644/01/16	05:00	6.5	(Sarabia, 2016)	9	(Cifuentes & Sarabia, 2007b)
1805/06/16	03:15	6.1	(Sarabia, 2016)	9	(Cifuentes & Sarabia, 2007c)
1827/11/16	18:00	7.1	(Gómez-Capera *et al.*, 2020)	10	(Sarabia *et al.*, 2006b)
1834/01/20	07:00	6.7	(Sarabia, 2016)	9	(Sarabia *et al.*, 2006a)
1875/05/18	11:15	6.8	(Sarabia, 2016)	10	(Cifuentes & Sarabia, 2006b)
1882/09/07	03:20	6.5	(Sarabia, 2016)	9	(Sarabia & Cifuentes, 2007a)
1906/01/31	10:36	8.4	ISC-GEM*	10	(Sarabia & Cifuentes, 2007d)
1917/08/31	06:36	7	ISC-GEM*	9	(Cifuentes & Sarabia, 2006a)
1923/12/14	05:31	6.2	(Beauval *et al.*, 2010)	9	(Sarabia & Cifuentes, 2007c)
1950/07/08	21:35	6.2	(Gómez-Capera *et al.*, 2020)	9	(Cifuentes & Sarabia, 2007a)
1967/02/09	10:24	7	ISC-GEM*	10	(Cifuentes & Sarabia, 2009c)
1979/12/12	02:59	8.1	ISC-GEM*	10	(Sarabia & Cifuentes, 2007b)
1983/03/31	08:12	5.6	ISC-GEM*	9	(Cifuentes & Sarabia, 2009b)
1992/10/18	11:12	7.1	ISC-GEM*	10	(Cifuentes & Sarabia, 2009a)
1999/01/25	13:19	6.1	ISC-GEM*	9	(Sarabia & Cifuentes, 2010)

*Hace referencia al catálogo ISC-GEM soportado por el International Seismological Centre (ISC, 2025)

diseño. Los hallazgos aquí expuestos muestran consistencia con estudios realizados en otras regiones del mundo, utilizando distintos modelos de amenaza y en diferentes ambientes tectónicos. Por lo tanto, las conclusiones presentadas en este documento pueden considerarse independientes del modelo de amenaza empleado.

2. Metodologías

En la práctica, los parámetros de diseño suelen definirse directamente de la amenaza sísmica; sin embargo, en los últimos años ha crecido la tendencia a incluir métricas de riesgo en este proceso. Esto se debe a que el parámetro de diseño de una estructura debe ser definido en función de su comportamiento y desempeño esperado. A continuación, se resumen brevemente los métodos más utilizados para la definición del coeficiente de diseño o de carga lateral (cs), orientados a la amenaza y el riesgo sísmico. No se detalla cada método en su totalidad, pues existen estudios específicos que los analizan y profundizan (Gkimprixis *et al.*, 2019; Ordaz *et al.*, 2023), o el lector puede remitirse directamente a la literatura en donde se desarrolla cada uno. Las metodologías seleccionadas son además presentadas en términos de aceleraciones espectrales (SA), la medida de intensidad sísmica más empleada para definir cs a nivel global.

2.1. Metodología orientada a la amenaza

Una curva de amenaza sísmica se puede entender como la probabilidad de excedencia en un periodo de tiempo T, o la tasa anual de excedencia de un valor determinado de SA en un sitio determinado. Asumiendo que la ocurrencia de sismos sigue una distribución de Poisson, la probabilidad de excedencia de un valor de SA igual a cs en T años se expresa como:

$$Pr(SA >= cs, T) = 1 - e^{-\lambda(cs)T} \tag{1}$$

El periodo de retorno (T_R) se define como:

$$T_R = \frac{1}{\lambda(cs)} \tag{2}$$

donde $\lambda(cs)$ representa la tasa anual de excedencia promedio dado un valor de SA igual a cs.

Las normas sismorresistentes que definen valores de cs basados en amenaza suelen emplear como input el concepto espectro de amenaza uniforme (UHS por sus siglas en inglés). En un UHS, para cada sitio se calcula el valor de aceleración como $Sa_{UHS}T_R$, que corresponde a la aceleración espectral esperada para un periodo de retorno T_R según el UHS.

En el caso de Colombia, la norma NSR-10 define un espectro de diseño paramétrico a partir del coeficiente A_a, que representa la aceleración pico del terreno y afecta los periodos cortos, y el coeficiente A_v que representa la velocidad pico efectiva y controla el diseño para periodos intermedios a largos (AIS, 2010). Estos coeficientes son estimados a partir de los resultados de un análisis probabilista de amenaza sísmica para PGA y Sa(1.0) asumiendo un periodo de retorno de 475 años, que corresponde a intensidades sísmicas con una probabilidad de 10% de ser excedidas en 50 años.

En consecuencia, en este trabajo se definió un valor de T_R de 475 años, para ser consistentes con el periodo de retorno de diseño definido en la NSR-10 para A_a y A_v. Así, la demanda sísmica para una determinada ordenada espectral puede ser definida como:

$$cs = Sa_{UHS475} \tag{3}$$

2.2. Metodologías orientadas al riesgo

Entre las metodologías basadas en riesgo, se seleccionaron los enfoques de "tasa de colapso uniforme" y "diseño óptimo". La primera se basa en la probabilidad de alcanzar un estado de colapso, mientras que la segunda optimiza el diseño en función del costo total esperado a lo largo de la vida útil de la estructura.

2.2.1. Tasa de Colapso Uniforme

Conocida como *Risk Targeted Design o RTGM*, esta metodología fue propuesta por primera vez por Luco (2006), y luego extendida por Luco *et al.* (2007), y busca definir valores de SA de manera que la probabilidad de colapso esperada sea uniforme para todos los sitios. Este enfoque reconoce que diferentes edificaciones diseñadas con similares valores de Sa_{UHS475} pueden tener riesgo de colapso muy diferente, debido a que el cálculo de riesgo probabilístico depende de la curva de amenaza en su totalidad, y no solo de un único punto en esta.

Para esta metodología, la probabilidad de colapso f_{Col} de una edificación sigue una distribución lognormal indexada a un valor de intensidad que, en este caso se identifica como c. De esta manera:

$$f_{Col}(c) = \phi\left[\frac{\ln(c) - (\ln(c_{10\%}) + 1.28\beta)}{\beta}\right]\frac{1}{c\beta} \tag{4}$$

A su vez, la probabilidad de colapso puede ser estimada a partir de f_{Col} y la curva de amenaza de tal manera que:

$$PCol[c,T] = \int_0^\infty \left[1 - e^{-\lambda(c)T}\right] f_{Col}(c)dc \qquad (5)$$

β representa la incertidumbre en la probabilidad de colapso, y en su formulación original asume un valor de $\beta = 0.8$, argumentando que luego de un análisis de sensibilidad con valores entre 0.6 y 1.0, es un parámetro que no afecta los resultados considerablemente. Además, se define el sismo máximo considerado como aquel que genera un valor de SA $c_{10\%}$ para el cual la probabilidad de colapso en 50 años es del 1%. Para motivos de esta nota, este valor está definido como Sa_{RTGM}.

Los parámetros descritos previamente fueron definidos para Estados Unidos, con base en la probabilidad de colapso promedio estimada para edificaciones diseñadas en California. Con lo anterior, si Sa_{RTGM} es compatible con el sismo máximo considerado orientado a riesgo (MCE_R por sus siglas en inglés), la aceleración de diseño debe incluir un factor de reducción de 1.5 (NEHRP, 2003). De esta manera, se obtiene que:

$$cs = Sa_{2/3RTGM} = \frac{2}{3} Sa_{RTGM} \qquad (6)$$

El factor de 1.5 (2/3) representa el límite inferior de margen con respecto a la probabilidad de colapso definida para el MCE_R, pero a su vez se ha encontrado que representa de manera aproximada la relación entre los valores de Sa(0.2s) con una probabilidad de 2 y 10% de ser excedidos en 50 años en algunos sitios en California (Leyendecker *et al.*, 2000). Si bien, la introducción de un factor de 2/3 hace que la probabilidad de colapso varíe espacialmente, se ha demostrado que $PCol\left[2/3\, Sa_{RTGM}, 50\right]$ es mucho más uniforme que $PCol\left[Sa_{UHS475}, 50\right]$ (Luco, 2006).

Esta metodología ha sido ampliamente replicada en diferentes regiones debido a que el estado de daño de colapso está directamente relacionado con la seguridad esperada en términos de fatalidades. Algunos ejemplos de mapas de coeficientes utilizando esta metodología se encuentran para Europa (Silva *et al.*, 2016), México (Sandoval & Ordaz, 2025), Irán (Taherian & Kalantari, 2019) y Nueva Zelanda (Horspool *et al.*, 2021). Dentro de los países que han adoptado esta metodología oficialmente para el diseño de edificaciones se encuentra Indonesia (National Standardization Agency, 2019) y Estados Unidos (BSSC, 2020), mientras que países como El Salvador la han incluido en borradores de actualización (López Menjivar *et al.*, 2021).

2.2.2. Diseño Óptimo

Según esta metodología, el riesgo esperado durante el ciclo de vida de una estructura debería incluirse en la definición de la demanda de fuerza lateral por sismo, aceptando un cierto umbral considerado como admisible (Wiggins, 1972; Wiggins & Moran, 1970). El diseño óptimo se basa principalmente en los trabajos de Rosenblueth (1976a, 1976b), con el objetivo de definir *cs* a partir de un proceso de optimización del costo de una edificación, incluyendo su construcción y sus pérdidas asociadas en su vida útil.

El diseño óptimo ha sido la metodología propuesta para la actualización de la norma NSR-10 (Bernal & Cardona, 2021, 2024), con base en trabajos previos realizados para Colombia y México (Ordaz *et al.*, 2017). La metodología se basa en la optimización del costo total (CT) de una edificación a lo largo de su vida útil, incluyendo su costo inicial de construcción (CI) y pérdidas futuras por sismo (CFL). Las funciones de costo normalizadas en términos del costo esperado de una edificación diseñada para soportar únicamente cargas gravitacionales, C_0, y su resistencia lateral, c0, se presentan a continuación en términos de *cs*:

$$C_I(c_s) = \frac{C_I(c_s)}{C_0} = \begin{cases} 1 & , \quad \text{si } c_s < c0 \\ 1 + \varepsilon\left[\dfrac{c_s - c_0}{c_0}\right]^\alpha & , \quad \text{si } c_s >= c0 \end{cases} \qquad (7)$$

$$CFL(cs) = \frac{C_{FL}(cs)}{C_0} = \frac{C_I(cs)}{C_0}(1 + S_L)\frac{\lambda(cs)}{\gamma} \qquad (8)$$

$$CT(cs) = CI(cs) + CFL(cs) \qquad (9)$$

Este método, también conocido como diseño de mínimo costo, requiere la calibración de diversos parámetros. En este trabajo se utilizaron los mismos parámetros que Ordaz *et al.* (2017) propusieron para Colombia. En los parámetros requeridos destaca S_L, que representa las pérdidas secundarias o indirectas por sismo, y puede variar dependiendo de las condiciones socioeconómicas. Para el presente estudio, S_L se fijó en un valor de 12, utilizado previamente para Colombia (Ordaz *et al.*, 2017), con base en análisis realizados previamente para el terremoto de 1985 que afectó Ciudad de México (Ordaz *et al.*, 1989). En este trabajo no se consideraron las variaciones locales de S_L propuestas para Colombia (Bernal & Cardona, 2021) en zonas específicas del país.

La definición de *cs* en esta metodología se obtiene mediante la optimización de CT(*cs*), buscando el valor óptimo Sa_{OPT} que minimiza los costos.

3. Resultados y comparaciones

Para comparar las metodologías presentadas, se utilizó el modelo de amenaza probabilista de Arcila et al (2020) para calcular curvas de amenaza en roca (Vs30 = 760 m/s) para Sa(0.2s) y Sa(1.0s) utilizando OpenQuake (Pagani *et al.*, 2014) en 1,103 sitios correspondientes a las cabeceras municipales definidas por el Departamento Nacional de Estadística de Colombia (DANE, n.d.). Es importante aclarar que la propuesta de actualización de la norma NSR-10 utiliza un modelo de amenaza diferente.

Debido a que todas las diferentes metodologías expresan el coeficiente de diseño en términos de aceleración espectral, podría compararse directamente el cambio relativo o absoluto de estos valores, sin embargo, no es una métrica que permita conclusiones profundas. Una segunda opción sería comparar los resultados en términos de su probabilidad de ser excedidos (asociada a un periodo de retorno) haciendo uso de las curvas de amenaza. De manera similar al trabajo realizado por Ordaz *et al.* (2023), en su sección 3 (figura 2 del artículo original), decidimos estimar y comparar la de colapso asociadas a los coeficientes de diseño definidos por cada metodología, y además añadimos los costos totales normalizados a la comparación.

Si bien la función de costo total utilizada para la definición de Sa_{OPT}, y los parámetros asociados para el cálculo de Sa_{RTGM} deberían ajustarse para diferentes tipologías estructurales, las dos metodologías comparten algunas suposiciones como la no inclusión de acumulación de daño o el continuo deterioro de las estructuras. Además, si bien el diseño óptimo podría incluir pérdidas económicas asociadas a la pérdida de vidas, con el debate ético y moral que esto conlleva (Keller *et al.*, 2021), no incluir estas pérdidas permite consistencia entre las dos metodologías (Ordaz *et al.*, 2023).

Bajo este enfoque, con el objetivo de comparar las diferentes metodologías, se realizó el siguiente procedimiento:

1. Estimación de coeficientes siguiendo las diferentes metodologías.
2. Estimación de la probabilidad de colapso, $PCol[cs, 50$ años$]$. Con la ecuación (5) se estimó la probabilidad esperada de colapso para cada valor de *cs*. Esto permite comparar el impacto de los diferentes valores de *cs* en cada sitio, bajo el supuesto —coherente con el método RTGM— de que la fragilidad depende únicamente de *cs* y β.
3. Estimación del costo total normalizado esperado, CT(*cs*). Mediante la ecuación (9) se calculó el costo total esperado en cada sitio. En un escenario en el que un nuevo reglamento colombiano se derive de esta función de costo generalizada para todo el territorio y todas las tipologías, esta comparación permite evaluar el impacto de diseñar con un valor de *cs* distinto bajo las mismas condiciones de amenaza. Con ello es posible comparar, de manera simplificada, las implicaciones económicas de distintos valores de *cs* para cada sitio de interés.

La comparación de pérdidas económicas y probabilidad de colapso esperadas utilizando diferentes valores de aceleración y bajo las mismas suposiciones permiten comparar la implicación de diferentes valores de *cs* utilizando métricas asociadas al riesgo esperado.

3.1. Ejemplos de resultados

A modo de ilustración, se seleccionaron 4 diferentes ciudades en condiciones de amenaza sísmica diferentes. La Figura 1 presenta los valores de *cs* y CT(*cs*) y la Figura 2 presenta los valores de *cs* y PCol[*cs*, 50 años] obtenidos para las diferentes ciudades.

En términos de costo total (Figura 1), es posible observar cómo el costo total estimado para las demandas sísmicas en las diferentes metodologías toma valores estables en la vecindad de Sa_{OPT}, a pesar de que el valor de *cs* presenta variaciones considerables. En términos de la probabilidad de colapso (Figura 2), el efecto fue diferente, en donde cambios en *cs* afectan considerablemente el riesgo de colapso esperado.

El **anexo A** incluye la distribución de las diferentes métricas por metodología, en donde se evidencia la misma tendencia al comparar los 1,103 sitios de cálculo.

3.2. Comparación entre metodologías basadas en riesgo

La tendencia actual en las normas de diseño ha evolucionado hacia metodologías con base en riesgo sísmico; en este contexto, un mayor énfasis debe realizarse en la comparación entre Sa_{OPT} y $Sa_{2/3\ RTGM}$. Para esto, se calculó la diferencia relativa porcentual de $Sa_{2/3\ RTGM}$ con respecto a Sa_{OPT} en términos de costo total CT(cs) y la probabilidad de colapso en 50 años. La Figura 3 presenta la comparación de Sa_{OPT} y $Sa_{2/3\ RTGM}$ para Sa(0.2s) y Sa(1.0s) en términos de CT(*cs*) y la probabilidad de colapso en 50 años.

Para Sa(0.2s), el aumento porcentual de CT(*cs*) de $Sa_{2/3\ RTGM}$ con respecto a Sa_{OPT}, está concentrado en valores menores al 5%, con una mediana de 2.9%. Al comparar las probabilidades de colapso, los valores $Sa_{2/3\ RTGM}$ conducen a valores mucho menores con una mediana de -35.8%, implicando una disminución considerable.

En términos de Sa(1.0s), debido a que los valores de Sa tienden a ser numéricamente menores, los valores de CT(cs) y probabilidad de colapso estimados a partir de $Sa_{2/3\ RTGM}$, tienden

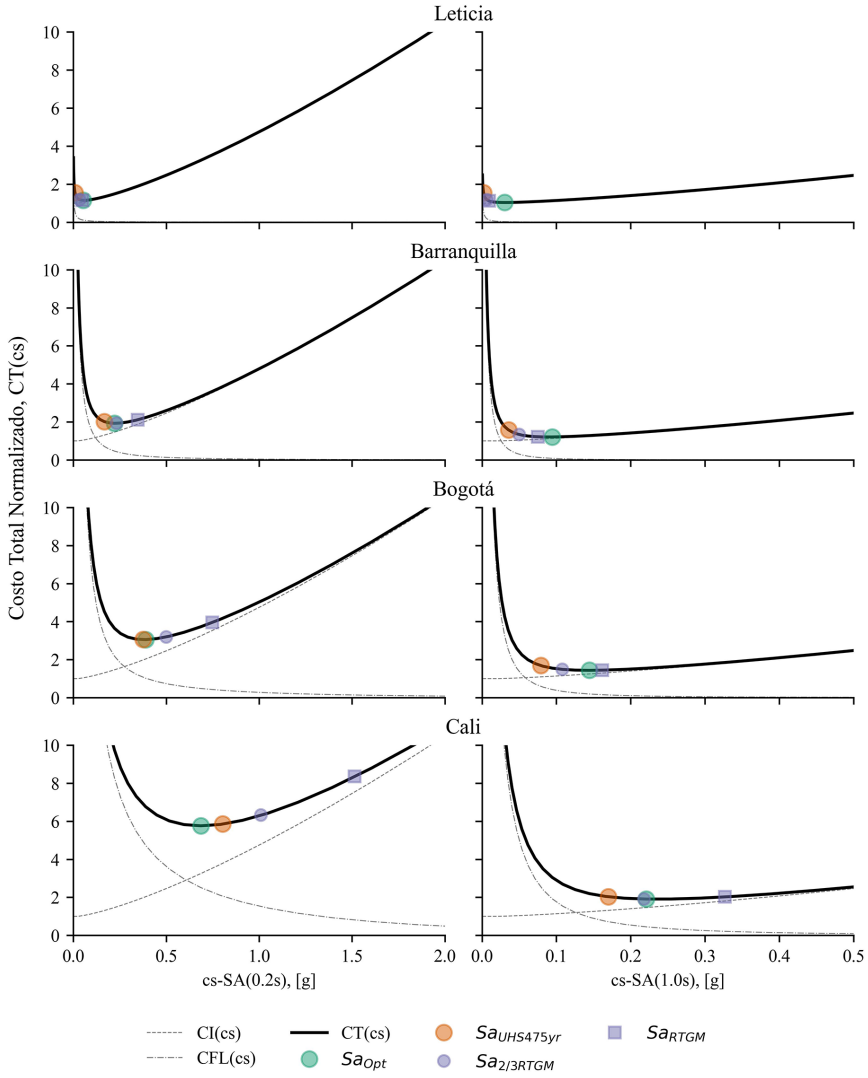

Figura 1. Costo total normalizado y *cs* calculados para las ciudades seleccionadas.

a ser menos conservadores. En este caso en particular, Sa_{OPT} de manera general, conduce a menores probabilidades de colapso y además menores valores de CT. Lo anterior puede observarse en que $Sa_{2/3\ RTGM}$ está asociado con valores mayores de CT(*cs*), con una mediana de 5.1%, y a probabilidades de colapso que superan 150%, con una mediana de 92.4%.

4. Conclusiones y discusión

Las metodologías basadas en riesgo para la definición coeficientes sísmicos de diseño, aunque son prácticas presentan diferentes desafíos en su implementación, como por ejemplo la definición de los diferentes parámetros requeridos en su formulación. Un ejemplo de ello es la función de capacidad a colapso necesaria para calcular $Sa_{2/3\ RTGM}$, o las funciones de costo utilizadas en la estimación de Sa_{OPT}, las cuales pueden ser específicas para determinadas tipologías estructurales o ajustarse a diferentes condiciones socioeconómicas. De hecho, al incorporar información particular sobre el comportamiento estructural o sobre funciones de costo para tipologías específicas, podría generarse una colección de mapas de *cs* en lugar de un único valor genérico. Asimismo, las funciones de costo pueden adaptarse a diferentes contextos socioeconómicos, por ejemplo mediante la consideración de distintos valores de S_L (Bernal & Cardona, 2021). A pesar de estas limitaciones, ambas metodologías han mostrado un buen desempeño en la estimación de *cs*.

Aunque la definición de *cs* mediante diseño óptimo y mediante RTGM responde a enfoques distintos, es posible comparar ambos métodos en un sitio con amenaza conocida en términos de métricas asociadas al riesgo. Al contrastar las probabilidades de colapso, se observó que $Sa_{2/3\ RTGM}$ tiende a ser más conserva-

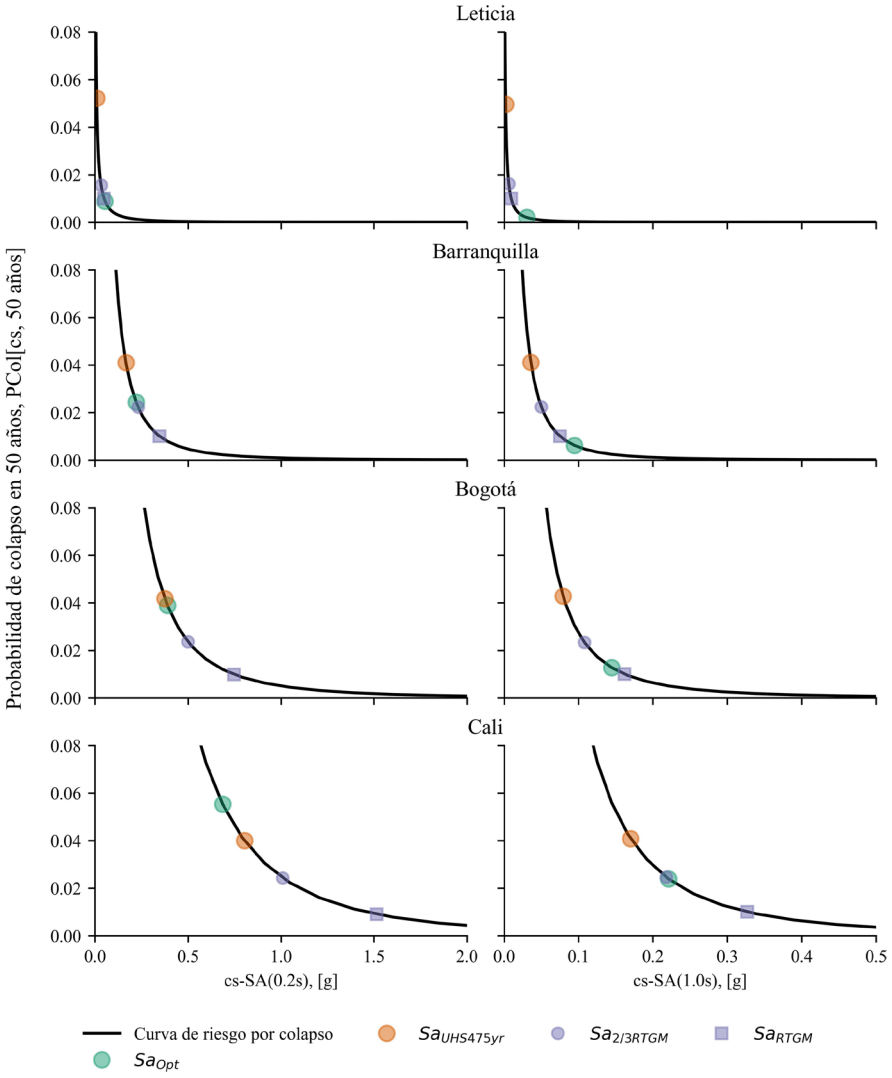

Figura 2. Probabilidad de colapso y *cs* para las ciudades seleccionadas.

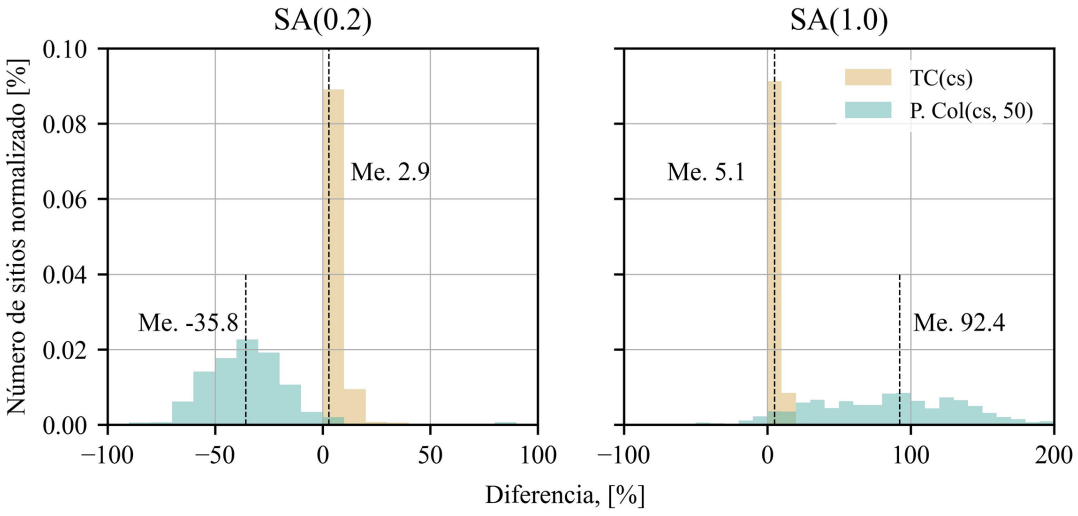

Figura 3. Comparación de metodologías basadas en riesgo para Sa(0.2s) y Sa(1.0s).

dor en zonas de mayor amenaza, mientras que Sa_{OPT} conduce a mayores *cs* cuando la amenaza es baja. Este comportamiento, ya documentado por Ordaz *et al.* (2017) mediante curvas de amenaza paramétricas genéricas y comparando Sa_{OPT} y Sa_{RTGM}, se evidencia también en la Figura 3, donde la diferencia en la probabilidad de colapso muestra tendencias opuestas para Sa(0.2s) y Sa(1.0s), reflejando sus distintos niveles de aceleración espectral (Sa(0.2s) >> Sa(1.0s)). Aunque no es correcto comparar directamente Sa(0.2s) y Sa(1.0s) por representar medidas de intensidad distintas, su inclusión permite explorar cómo las metodologías responden a valores aritméticamente diferentes de amenaza, dado que tanto CT(cs) como la fragilidad genérica utilizada en RTGM dependen únicamente del valor numérico de la intensidad y no de la ordenada espectral específica.

Adicionalmente, se observó que la probabilidad de colapso es altamente sensible al valor de *cs*, mientras que las variaciones en CT(*cs*), fueron mucho menores al comparar las distintas metodologías. Resultados similares han sido reportados para Europa (Gkimprixis *et al.*, 2020), principalmente debido a la forma relativamente plana de las funciones de costo en la vecindad de su valor mínimo. Este hecho sugiere que el diseño óptimo podría utilizarse para definir una "zona óptima" más que un valor óptimo único (Ordaz *et al.*, 2017).

Los resultados respaldan una estrategia en la cual *cs* se defina como la envolvente entre Sa_{OPT} y $Sa_{2/3\ RTGM}$, eligiendo siempre el valor mayor en cada sitio. Este enfoque reduce el riesgo de colapso esperado con un impacto mínimo en el costo total esperado, coherente con la existencia de una zona óptima en la función CT(*cs*). Incluir el análisis económico como variable secundaria permite aumentar la seguridad estructural en los casos en que Sa_{OPT} resulte más conservador, e incluso obtener beneficios económicos. En síntesis:

- $cs = Sa_{OPT}$ si $Sa_{OPT} > Sa_{2/3\ RTGM}$, lo cual incrementa la seguridad y reduce el costo total esperado.
- $cs = Sa_{2/3\ RTGM}$ si $Sa_{2/3\ RTGM} >= Sa_{OPT}$, lo que permite aumentar el nivel de seguridad con un incremento bajo en CT(*cs*).

Si bien los enfoques de costo óptimo y de tasa de colapso uniforme suelen considerarse excluyentes, los resultados muestran cómo pueden emplearse de manera complementaria para fundamentar normas sismorresistentes orientadas simultáneamente a la seguridad y la eficiencia. Bajo esta lógica, en zonas de amenaza alta tendería a seleccionarse $Sa_{2/3\ RTGM}$, aumentando la seguridad con un incremento relativamente menor de CT(*cs*) frente a Sa_{OPT}; mientras que en zonas de amenaza baja, Sa_{OPT} permitiría aumentar la seguridad y reducir CT(*cs*).

Desde el punto de vista del riesgo esperado, lo anterior es equivalente a sugerir que Sa_{OPT} debería ser seleccionada siempre que su probabilidad de colapso no sea superior a la obtenida por $Sa_{2/3\ RTGM}$, o de la metodología objetivo. Lo anterior permite optimizar la función de costo total (CT(*cs*)), siempre que el nivel de riesgo esperado no sea excedido.

Además, los resultados del **Anexo A** permiten incluir dentro de la envolvente el valor de Sa_{NSR10} cuando sea necesario bajo la misma precisa anterior. Esto responde a la preocupación existente sobre posibles disminuciones de la demanda sísmica en futuras actualizaciones normativas.

Finalmente, aunque el uso de un modelo de amenaza distinto generaría valores de *cs* diferentes para cada metodología, la evidencia indica que los hallazgos principales deberían mantenerse: (1) CT(*cs*) es estable en la vecindad del valor óptimo, y (2) en sitios con mayor amenaza, RTGM tiende a estimar valores de *cs* mayores que el diseño óptimo, mientras que en sitios de baja amenaza ocurre lo contrario.

5. Limitaciones y trabajos futuros

Los resultados presentados se basan en metodologías simplificadas que emplean funciones de costo y modelos de fragilidad genéricos para Colombia. Por ello, futuros estudios deberían comparar las metodologías considerando la capacidad última de edificaciones diseñadas con los valores de *cs* derivados de cada enfoque. Trabajos como el de Parra García (2024), que evalúan el impacto de alternativas propuestas para la actualización de la NSR-10, permitirían obtener un panorama más detallado del efecto real del parámetro *cs* en una revisión normativa.

La evaluación realizada se fundamenta en supuestos adoptados por diversos autores, cuyas principales limitaciones incluyen:

- Aunque la función de costos utilizada fue desarrollada para el contexto colombiano y empleada en estudios nacionales, esta se construyó considerando únicamente edificios de concreto de dos pisos.
- Aunque la metodología RTGM ha sido adoptada en distintos países, los parámetros utilizados corresponden a la calibración realizada para Estados Unidos, basada en edificaciones en un contexto distinto al colombiano. Su regionalización podría lograrse mediante una reestimación del factor 1.5 para obtener la capacidad de diseño a partir del MCE_R, o mediante la definición de una probabilidad de colapso coherente con la capacidad de diseño sin un factor adicional, que permita mantener la premisa de una probabilidad de colapso esperada constante para todo el territorio.

Estas limitaciones abren la discusión sobre la necesidad de incorporar distintos arquetipos estructurales en la construcción de modelos de costo para la metodología de diseño óptimo, así como la importancia de regionalizar los supuestos del método RTGM al contexto colombiano.

Finalmente, aunque al utilizar modelos de amenaza diferentes se esperaría encontrar hallazgos similares, trabajos futuros podrían evaluar el impacto de diferentes modelos de amenaza en Colombia para la definición de coeficientes sísmicos de diseño utilizando las diferentes metodologías, reconociendo que son el principal input en el proceso.

6. Datos y recursos

Las curvas de amenaza calculadas para definir los parámetros de demanda sísmica siguiendo diferentes metodologías fueron calculadas utilizando el modelo de amenaza sísmica del Servicio Geológico Colombiano desarrollado en OpenQuake engine, disponible para libre descarga en el sitio web **https://amenazasismica.sgc.gov.co/**.

Los cálculos siguiendo la metodología RTGM fueron realizados utilizando la herramienta rtgmpy desarrollada por el USGS (Andrew J Makdisi *et al.*, n.d.), disponible en el sitio web: **https://code.usgs.gov/ghsc/erp/erp-rtgm-calculator**.

Los resultados obtenidos en términos de probabilidad de colapso, demanda sísmica y costo total normalizado se presentan en el archivo tipo excel **anexo**.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen al equipo de riesgo de la fundación GEM por su continuo soporte, así como a los profesores, estudiantes y colaboradores del proyecto TREAD. Un agradecimiento especial a Mónica Arcila y Héctor Pérez del Servicio Geológico Colombiano por su disposición, guía y discusión. Finalmente, un agradecimiento a Juan Andrés Oviedo, ex presidente de la Asociación de Ingeniería Sísmica de Colombia (AIS), quien generó el interés de la Fundación GEM en este tema en específico a nivel Colombia.

8. Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen ningún potencial conflicto de intereses con respecto a la investigación, autoría o publicación de este artículo.

9. Financiación

Este trabajo fue realizado con financiación del fondo europeo bajo el marco de la comisión DN-Marie Sklodowska-Curie y el proyecto TREAD (Acuerdo de financiación No. 101072699), que financia los estudios doctorales del primer autor, Julián Montejo bajo el proyecto #11-Assessment of the impact of advanced seismic hazard modelling approaches in earthquake risk.

10. Referencias

Acevedo, A. B., Yepes-Estrada, C., González, D., Silva, V., Mora, M., Arcila, M., & Posada, G. (2020). Seismic risk assessment for the residential buildings of the major three cities in Colombia: Bogotá, Medellín, and Cali. *Earthquake Spectra,* 36(1s), 298–320. **https://doi.org/10.1177/8755293020942537**

Algermissen, S. T., & Perkins, D. M. (1976). *A probabilistic estimate of maximum acceleration in rock in the contiguous United States* (Open-File Report 76-416). U.S. Geological Survey. **https://pubs.usgs.gov/publication/ofr76416**

Applied Technology Council. (1978). *Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings* (ATC 3-06). National Bureau of Standards. **https://doi.org/10.6028/nbs.sp.510**

Arcila, M., García, J., Montejo, J., Eraso, J., Valcárcel, J., Mora, M., Vigano, D., Pagani, M., & Díaz, F. J. (2020). *Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia*. Servicio Geológico Colombiano. **https://doi.org/10.32685/9789585279469**

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (1983). *Norma AIS 100-83, Requisitos sísmicos para edificaciones*. AIS.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (1998). *Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98*. AIS.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2014). *Norma Colombiana de Diseño de Puentes*. AIS.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Comité AIS-300. (1984). *Estudio general de amenaza sísmica de Colombia 1984*. AIS.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Comité AIS-300. (1996). *Estudio general de amenaza sísmica de Colombia 1996*. AIS.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Comité AIS-300. (2010). *Estudio general de amenaza sísmica de Colombia 2009*. AIS.

Beauval, C., Yepes, H., Bakun, W. H., Egred, J., Alvarado, A., & Singaucho, J.-C. (2010). Locations and magnitudes of historical earthquakes in the Sierra of Ecuador (1587-1996). *Geophysical Journal International,* 181(3), 1613–1633. **https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04569.x**

Bernal, G. A., & Cardona, O. D. (2021). Actualización de los coeficientes sísmicos de diseño estructural para la Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente NSR en *Investigaciones en gestión del riesgo de desastres para Colombia. Avances, perspectivas y casos de studio* (pp. 1-35). Comisión Nacional Asesora para la Investigación del Riesgo de Desastres.

Bernal, G. A., & Cardona, O. D. (2024). *Update of structural design seismic coefficients for the colombian building code (NSR)* [Conferencia]. 18th World Conference of Earthquake Engineering WCEE2024.

Building Seismic Safety Council. (2020). *NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures* (Vol. 1, Part 1 y 2). Building Seismic Safety Council. https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-10/fema_2020-nehrp-provisions_part-1-and-part-2.pdf

Cifuentes, H. G., & Sarabia, A. M. (2006a). *Estudio macrosísmico del sismo del 31 de agosto de 1917, Villavicencio (Meta)*. INGEOMINAS. https://recordcenter.sgc.gov.co/B6/21001000024413/documento/pdf/2105244131122000.pdf

Cifuentes, H. G., & Sarabia, A. M. (2006b). *Estudio macrosísmico el sismo del 18 de mayo de 1875, Cúcuta (Norte de Santander)*. INGEOMINAS. https://recordcenter.sgc.gov.co/B6/21001000024413/documento/pdf/2105244131115000.pdf

Cifuentes, H., G. & Sarabia, A. M. (2007a). *Estudio macrosísmico del sismo del 8 de julio de 1950, Arboledas (Norte de Santander)*. INGEOMINAS. https://recordcenter.sgc.gov.co/B6/21001000024413/documento/pdf/2105244131132000.pdf

Cifuentes, H. G., & Sarabia, A. M. (2007b). *Estudio macrosísmico del sismo del 16 de enero de 1644, Pamplona (Norte deSantander)*. INGEOMINAS. https://recordcenter.sgc.gov.co/B6/21001000024413/documento/pdf/2105244131101000.pdf

Cifuentes, H. G., & Sarabia, A. M. (2007c). *Estudio macrosísmico del sismo del 16 de junio de 1805, Honda (Tolima)*. INGEOMINAS. https://recordcenter.sgc.gov.co/B6/21001000024413/documento/pdf/2105244131110000.pdf

Cifuentes, H. G., & Sarabia, A. M. (2009a). *Estudio macrosísmico del sismo del 18 de octubre de 1992, Murindó (Antioquia)*. INGEOMINAS. https://recordcenter.sgc.gov.co/B6/21001000024413/documento/pdf/2105244131158000.pdf

Cifuentes, H. G., & Sarabia, A. M. (2009b). *Estudio macrosísmico del sismo del 31 de marzo de 1983, Popayán (Cauca)*. INGEOMINAS. https://recordcenter.sgc.gov.co/B6/21001000024413/documento/pdf/2105244131156000.pdf

Cifuentes, H. G., & Sarabia, A. M. (2009c). *Revisión de información histórica y reevaluación de intensidades del sismo del 9 de febrero de 1967, Colombia (Huila)*. INGEOMINAS. https://recordcenter.sgc.gov.co/B6/21001000024413/documento/pdf/2105244131143000.pdf

Crowley, H., Despotaki, V., Silva, V., Dabbeek, J., Romão, X., Pereira, N., Castro, J. M., Daniell, J., Veliu, E., Bilgin, H., Adam, C., Deyanova, M., Adembović, N., Atalic, J., Riga, E., Karatzetzou, A., Bessason, B., Shendova, V., Tiganescu, A., Toma-Danila, D., Zugic, Z., Akkar, S., & Hancilar, U. (2021). Model of seismic design lateral force levels for the existing reinforced concrete European building stock. *Bulletin of Earthquake Engineering,* 19(7), 2839–2865. https://doi.org/10.1007/s10518-021-01083-3

Departamento Nacional de Estadística de Colombia. (s.f.). *Geovisor de consulta de codificación de la Divipola*. Recuperado el 15 de mayo de 2024, de https://geoportal.dane.gov.co/geovisores/territorio/consulta-divipola-division-politico-administrativa-de-colombia/

Esteva, L. (1970). *Regionalización sísmica de México para fines de ingeniería*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Federal Emergency Management Agency. (2003). *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures* (FEMA 450).

Gallego, M. (2000). *Estimación de riesgo sísmico en la República de Colombia* [Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México].

García-Mayordomo, J., Faccioli, E., & Paolucci, R. (2004). Comparative study of the seismic hazard assessments in European national seismic codes. *Bulletin of Earthquake Engineering,* 2(1), 51–73. https://doi.org/10.1023/B:BEEE.0000039046.42398.9d

Gkimprixis, A., Tubaldi, E., & Douglas, J. (2019). Comparison of methods to develop risk-targeted seismic design maps. *Bulletin of Earthquake Engineering,* 17(7), 3727–3752. https://doi.org/10.1007/s10518-019-00629-w

Gkimprixis, A., Tubaldi, E., & Douglas, J. (2020). Evaluating alternative approaches for the seismic design of structures. *Bulletin of Earthquake Engineering, 18*(9), 4331–4361. https://doi.org/10.1007/s10518-020-00858-4

Gómez-Capera, A. A., Stucchi, M., Rodríguez, L., Arcila, M., Bufaliza, M., Choy, J., Minaya, E., Leyton, L., Pirchiner, M., Rendón, H., Sarabia, A., Tavera, H., & Yepes, H. (2020). Catálogo de terremotos de América del Sur homogéneo en Mw para el periodo pre-1964. *GEOS*, *40*(1).

Horspool, N., Gerstenberger, M. C., & Elwood, K. J. (2021). *Risk targeted hazard spectra for seismic design in New Zealand* [Conference paper] NZSEE 2021 Annual Conference.

International Seismological Centre. (2025). *ISC-GEM earthquake catalogue* [Dataset]. https://doi.org/10.31905/D808B825

Keller, E., Newman, J. E., Ortmann, A., Jorm, L. R., & Chambers, G. M. (2021). How much is a human life worth? A systematic review. *Value in Health,* 24(10), 1531–1541. https://doi.org/10.1016/j.jval.2021.04.003

Khose, V. N., Singh, Y., & Lang, D. H. (2012). A comparative study of design base shear for RC buildings in selected seismic design codes. *Earthquake Spectra,* 28(3), 1047–1070. https://doi.org/10.1193/1.4000057

Leyendecker, E. V., Hunt, R. J., Frankel, A. D., & Rukstales, K. S. (2000). Development of maximum considered earthquake ground motion maps. *Earthquake Spectra,* 16(1), 21–40. https://doi.org/10.1193/1.1586081

Leyendecker, E. V., Perkins, D. M., Algermissen, S. T., Thenhaus, P. C., & Hanson, S. L. (1995). *USGS spectral response maps and their relationship with seismic design forces in building codes* (Open-File Report 95-596). U.S. Geological Survey. https://pubs.usgs.gov/publication/ofr95596

López, M. A., Hernández, J., & Hasbun, J. C. (2021). *Modernización de las provisiones que rigen el diseño sísmico* (Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo). https://srt.snet.gob.sv/tallerdivulgacion/Documentos_t%C3%A9cnicos/Modenizacion%20de%20las%20provisiones%20que%20rigen%20el%20dise%C3%B1o%20sismico.pdf

Luco, N. (2006). Risk-targeted approach to selecting return periods for design maps. En *Proceedings of the 3rd ATC-35/USGS National*

Earthquake Ground-Motion Mapping Workshop.

Luco, N., Ellingwood, B. R., Hamburger, R. O., Gumpertz, S., Hooper, J. D., Kimball, J. K., & Kircher, C. A. (2007). *Risk-targeted versus current seismic design maps for the conterminous United States* [Convention proceedings] SEAOC 2007.

Makdisi, A. J., Luco, N., Clayton, B. S., & Kortum, Z. A. (s.f.). *Python source code for USGS risk-targeted ground motion calculator* [Software]. U.S. Geological Survey. **https://doi.org/10.5066/P9A2F2B8**

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10*.

Ministerio de Desarrollo Económico & Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (1998). *Decreto 33 de 1998, por medio del cual se adopta el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-98*.

Ministerio de Obras Públicas y Transporte y Sociedad Colombiana de Ingenieros. (1984). *Decreto 1400 de junio 7 de 1984, Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes*.

National Standarization Agency. (2019). *SNI 1726-2019 Procedures for planning earthquake resistance for non-building building structures*.

Ordaz, M., Jara, J. M., & Singh, S. K. (1989). Riesgo sísmico y espectro de diseño en el estado de Guerrero. En *Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*.

Ordaz, M., Salgado-Gálvez, M. A., & Cardona, O. D. (2023). Review and comparison of different strategies to define earthquake design accelerations. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics,* 52(13), 3945–3961. **https://doi.org/10.1002/eqe.3950**

Ordaz, M., Salgado-Gálvez, M. A., Pérez-Rocha, L. E., Cardona, O. D., & Mena-Hernández, U. (2017). Optimum earthquake design coefficients based on probabilistic seismic hazard analyses: Theory and applications. *Earthquake Spectra,* 33(4), 1455–1474. **https://doi.org/10.1193/110116eqs189m**

Pagani, M., Monelli, D., Weatherill, G., Danciu, L., Crowley, H., Silva, V., Henshaw, P., Butler, L., Nastasi, M., Panzeri, L., Simionato, M., & Vigano, D. (2014). OpenQuake engine: An open hazard (and risk) software for the Global Earthquake Model. *Seismological Research Letters,* 85(3), 692–702. **https://doi.org/10.1785/0220130087**

Parra Garcia, J. A. (2024). *Comparación del desempeño de edificaciones en concreto reforzado diseñadas con dos diferentes especificaciones de demanda sísmica* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNAL. **https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/87388**

Pavel, F., Crowley, H., Romão, X., Vladut, R., Pereira, N., & Ozsarac, V. (2024). Evolution of national codes for the design of RC structures in Romania. *Bulletin of Earthquake Engineering,* 22(3), 911–949. **https://doi.org/10.1007/s10518-023-01791-y**

Pulido, N. (2003). Seismotectonics of the Northern Andes (Colombia) and the development of seisic networks. *Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering,* (Special Edition), 69–76.

Ramírez, J. E., & Estrada, G. (1977). *Mapa de riesgo sísmico*. Universidad Javeriana.

Rosenblueth, E. (1976a). Optimum design for infrequent disturbances. *Journal of the Structural Division,* 102(9), 1807–1825. **https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0004431**

Rosenblueth, E. (1976b). Towards optimum design through building codes. *Journal of the Structural Division,* 102(3), 591–607. **https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0004298**

Salgado, M. A., Bernal, G. A., Yamín, L. E., & Cardona, O. D. (2010). Evaluación de la amenaza sísmica de Colombia. Actualización y uso en las nuevas normas colombianas de diseño sismo resistente NSR-10. *Revista de Ingeniería,* (32), 28–37. **https://doi.org/10.16924/revinge.32.3**

Salgado-Gálvez, M. A., Bernal, G. A., & Cardona, O. D. (2016). Evaluación probabilista de la amenaza sísmica de Colombia con fines de actualización de la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería,* 32(4), 230–239. **https://doi.org/10.1016/j.rimni.2015.07.001**

Salgado-Gálvez, M. A., Zuloaga-Romero, D., Bernal, G. A., Mora, M. G., & Cardona, O.-D. (2014). Fully probabilistic seismic risk assessment considering local site effects for the portfolio of buildings in Medellín, Colombia. *Bulletin of Earthquake Engineering,* 12(2), 671–695. **https://doi.org/10.1007/s10518-013-9550-4**

Sandoval, R., & Ordaz, M. (2025). Risk-targeted seismic design maps for Mexico. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 55(2), 336-349. **https://doi.org/10.1002/eqe.70089**

Sarabia, A. M. (2016). *Relación de atenuación de la intensidad sísmica para sismos corticales en Colombia. Método Bakun & Wentworth*. Servicio Geológico Colombiano.

Sarabia, A. M., & Cifuentes, H. (2007a). *Estudio macrosísmico del sismo del 7 de septiembre de 1882 en Colón (Panamá)*. INGEOMINAS. **https://recordcenter.sgc.gov.co/B6/21001000024413/documento/pdf/2105244131116000.pdf**

Sarabia, A. M., & Cifuentes, H. (2007b). *Estudio macrosísmico del sismo del 12 dediciembre de 1979 en el Océano Pacífico*. INGEOMINAS. **https://recordcenter.sgc.gov.co/B6/21001000024413/documento/pdf/2105244131154000.pdf**

Sarabia, A. M., & Cifuentes, H. (2007c). *Estudio macrosísmico del sismo del 14 de diciembre de 1923 en Cumbal (Nariño)*. INGEOMINAS. **https://recordcenter.sgc.gov.co/B6/21001000024413/documento/pdf/2105244131123000.pdf**

Sarabia, A. M., & Cifuentes, H. (2007d). *Estudio macrosísmico del sismo del 31 de enero de 1906, en el Océano Pacífico*. INGEOMINAS. **https://recordcenter.sgc.gov.co/B6/21001000024413/documento/pdf/2105244131120000.pdf**

Sarabia, A. M., & Cifuentes, H. (2010). *Estudio macrosísmico del sismo ocurrido el 25 de enero de 1999 en Armenia*. INGEOMINAS. **https://recordcenter.sgc.gov.co/B6/21001000024413/documento/**

pdf/2105244131163000.pdf

Sarabia, A. M., Cifuentes, H., & Dimaté, M. C. (2006a). *Estudio macrosísmico del sismo del 20 de enero de 1834, Santiago (Putumayo)*. INGEOMINAS. **https://recordcenter.sgc.gov.co/B6/21001000024413/documento/pdf/2105244131113000.pdf**

Sarabia, A. M., Cifuentes, H., & Dimaté, M. C. (2006b). *Estudio macrosísmico del sismo el 16 de noviembre de 1827, Altamira (Huila)*. INGEOMINAS. **https://recordcenter.sgc.gov.co/B6/21001000024413/documento/pdf/2105244131112000.pdf**

Sarabia Gómez, A. M., Barbosa Castro, D. R., & Arcila Rivera, M. M. (2022). Macroseismic intensity data and effects of significant earthquakes in Colombia based on historical seismicity studies. *Boletín Geológico,* 49(2). **https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.48.2.2021.638**

Sarria, A. (1978). *Revisión del mapa de riesgo sísmico de Colombia*. Universidad de los Andes.

Sarria Molina, A. (2003). Capítulo 4: Tectónica global y origen de los sismos. En *Terremotos e infraestructura.* Universidad de los Andes. **https://hdl.handle.net/1992/66716**

Silva, V., Crowley, H., & Bazzurro, P. (2016). Exploring risk-targeted hazard maps for Europe. *Earthquake Spectra,* 32(2), 1165–1186. **https://doi.org/10.1193/112514eqs198m**

Stucchi, M., Meletti, C., Montaldo, V., Crowley, H., Calvi, G. M., & Boschi, E. (2011). Seismic hazard assessment (2003-2009) for the Italian building code. *Bulletin of the Seismological Society of America,* 101(4), 1885–1911. **https://doi.org/10.1785/0120100130**

Taboada, A., Rivera, L. A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J., & Rivera, C. (2000). Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics,* 19(5), 787–813. **https://doi.org/10.1029/2000TC900004**

Taherian, A. R., & Kalantari, A. (2019). Risk-targeted seismic design maps for Iran. *Journal of Seismology,* 23(6), 1299–1311. **https://doi.org/10.1007/s10950-019-09867-6**

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, Cardona, O. D., Bernal, G. A., Marulanda, P., Villegas, C., González, D., Escovar, M. A., & Carreño, M. L. (2018). *Atlas de riesgo de Colombia: Revelando los desastres latentes*. Ingeniar Risk Intelligence. **http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/27179**

Vargas, C. A., Pujades, L., & Ugalde, A. (2004). *Propagación de ondas sísmicas y atenuación de ondas de coda en el Territorio colombiano* (Colección Jorge Álvarez Lleras no. 23). **https://repositorio.accefyn.org.co/entities/publication/ed27c48c-8335-418d-8570-64f02ffcf1cf**

Wiggins, J. H. (1972). Earthquake safety in the City of Long Beach based on the concept of balanced risk. En *Perspectives on benefit-risk decision making: Report of a colloquium* (pp. 87–95). National Academy of Engineering. **https://doi.org/10.17226/20454**

Wiggins, J. H., & Moran, D. F. (1970). *Earthquake safety in the city of Long Beach based on the concept of balanced risk*.

Yamin, L. E., & Guesquiere, F., Cardona, O. D., Ordaz, G. M. (2013). *Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastre: El caso de Bogotá, Colombia* (1a ed.). Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento / Banco Mundial Región de América Latina y el Caribe.