

Guía metodológica para la integración del análisis del riesgo en los proyectos de infraestructura pública vial

Diciembre 2024

Guía metodológica para la integración del análisis del riesgo en los proyectos de infraestructura pública vial, 2024

La formulación del presente documento fue liderada por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), la Fundación de la Universidad de Costa Rica, y la Acción Proyectiva, con el apoyo de diferentes entidades públicas y organizaciones del sector privado y de la sociedad civil, a quienes se les agradece profundamente por su colaboración.

Esta guía forma parte de la Acción Proyectiva: Fortalecimiento de capacidades para la utilización de información climática para robustecer los procesos de toma de decisiones, cuya finalidad es aportar a la ejecución de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC, por sus siglas en inglés) a partir de capacidades mejoradas de diferentes actores en el ámbito subnacional con el fin de robustecer la Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático.

Los fondos para la implementación de dicha Acción provienen de EUROCLIMA, programa de cooperación regional financiado por la Unión Europea que busca promover el desarrollo ambientalmente sostenible y resiliente al clima en América Latina.

El equipo profesional encargado de la elaboración de este documento fue coordinado por el Consorcio Consultores+DLZ+SismoCon y fue integrado por:

- Dr. Sergio Mora Castro, líder del equipo; ingeniero geólogo, especialista en gestión del riesgo.
- Dr. José Pablo Porras Velásquez, ingeniero civil especialista en hidráulica e hidrología.
- M.H. Gerardo Javier Soto Bonilla, geólogo, especialista en evaluación de amenazas naturales y vulcanología.
- M.Sc. Pío Miranda Jenkins, ingeniero civil, especialista en ingeniería sísmica y planificación.
- M.Sc. Oscar Jiménez, ingeniero civil, especialista en hidráulica.
- Dr. Paulo Ruiz Cubillo, geólogo, especialista en evaluación de amenazas naturales y vulcanología.

Equipos encargados de guiar y revisar el documento:

Por AECID

- Dra. Christine Follana

Por IMN

- MSc. Nazareth Rojas
- Lic. Ana Rita Chacón

Por Acción Proyectiva

- Dr. Javier Saborío Bejarano
- MSc. Cristina de San Román Aguilar
- MSc. Mariana Soto Ugarte

Diagramador

- Lic. Christian Mc Koy Carrillo

Forma de citar el documento:

Consorcio Consultores+DLZ+SismoCon-Proyectiva-Agencia de Cooperación Española para el Desarrollo (AECID), Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). 2024. Guía metodológica para la integración del análisis del riesgo en los proyectos de infraestructura pública vial. 108 p.

La presente publicación ha sido elaborada con la asistencia de la Unión Europea. El contenido de la misma es responsabilidad exclusiva del Instituto Meteorológico Nacional y en ningún caso debe considerarse que refleja los puntos de vista de la Unión Europea.

Resumen ejecutivo

Esta guía metodológica se presenta como un instrumento clave para la integración del análisis del riesgo en proyectos de infraestructura pública vial, con un enfoque integral en la resiliencia frente a amenazas naturales y climáticas, conforme a los lineamientos establecidos por el Decreto N.º 42465 - MOPT-MINAE-MIVAH (2020) "Lineamientos generales para la incorporación de las medidas de resiliencia en infraestructura pública". El documento desarrolla un proceso estructurado de evaluación del riesgo aplicable a corredores viales. Como ejemplo de aplicación, se considera en este caso particular la Ruta Nacional 32 (RN-32) de Costa Rica, expuesta a amenazas como la inestabilidad de laderas, la actividad sísmica, los lahares y las avenidas fluviales.

El análisis considera una metodología multicriterio para identificar y priorizar amenazas, cuantificar la vulnerabilidad e indicar las orientaciones necesarias, con el fin de definir medidas de mitigación y adaptación correspondientes que mejoren la resiliencia de la infraestructura vial. Entre las herramientas utilizadas se destacan las metodologías HAZUS (Natural Hazards Risk Assessment Program) y CIRIA (Construction Industry Research and Information Association) empleadas para evaluar las amenazas, la vulnerabilidad y el riesgo asociados con la sismicidad, así como los procesos hidrometeorológicos y climáticos, complementadas con datos de modelos geotécnicos y geológicos. Además, se integran los posibles efectos del cambio climático, en particular de su componente más influyente: el calentamiento global antropogénico (CGA). Este último, aparte de la variabilidad climática (VC, en el corto plazo) es el que interactúa más directamente con las amenazas hidrometeorológicas (avenidas fluviales) y de la geodinámica externa (inestabilidad de laderas, lahares) identificadas, sobre todo en el mediano y largo plazo.

La guía incluye, además, un documento complementario que presenta un ejemplo práctico mediante la aplicación de un análisis piloto. Este análisis aborda la amenaza de la inestabilidad de laderas en el sector montañoso, los lahares que afectan el puente de río Sucio, las amenazas sísmicas y las avenidas fluviales sobre una selección de puentes ubicados sobre la RN-32 de Costa Rica.

En la medida de lo posible, de la información y datos disponibles y confiables, así como del software accesible, fue realizado el análisis respectivo y preliminar de las amenazas, la vulnerabilidad y el riesgo de esos elementos expuestos de la RN-32. Los resultados han permitido estimar el orden de magnitud de las probabilidades de los daños y pérdidas. La dificultad de aplicar modelos de elevación digital precisos, información geológica, datos acerca de las lluvias y caudales y aceleraciones sísmicas precisas, no ha permitido ofrecer una mejor resolución de los resultados, por lo que la tarea queda pendiente para ser refinada cuando hayan mejorado esos insumos y sea posible reducir las incertidumbres epistémicas. A partir de esto, se podrán establecer las recomendaciones del caso para incorporar las estrategias de adaptación y mitigación correspondientes, con el fin de fortalecer la resiliencia de las infraestructuras ante eventos intensos y, eventualmente, extremos.

La idea central de la guía es permitir el apoyo a las decisiones técnicas, económicas y ambientales, según las realidades territoriales, y en consonancia con la normatividad, procedimientos, metodologías, recomendaciones técnicas básicas y buenas prácticas nacionales e internacionales. Sin embargo, es claro que no existe una única metodología para la gestión del riesgo en un corredor vial, ni para definir el tipo de medidas a aplicar en cada caso. Esto dependerá de la diversidad de los factores, causas y consecuencias del riesgo y de lo que deba ser protegido.

La guía no pretende ser un manual para la protección total de la infraestructura, ni tampoco para diseñar obras de protección. No recomienda tipos específicos de obras ni ofrece soluciones predefinidas, sino una serie de recomendaciones para abordar la integralidad de la gestión del riesgo, comenzando por conocer los aspectos básicos de las amenazas y de la vulnerabilidad. El documento ofrece un proceso estructurado que permite abordar la identificación de los problemas generales y básicos, y los elementos que deben tomarse en cuenta a la hora de concebir y aplicar las soluciones.

Es de considerar que, a partir de ciertos puntos y procesos, les corresponde a especialistas en geología, geotecnia, climatología, hidrología, ingeniería civil estructural e hidráulica, economía, entre otros, proceder según sus respectivas áreas de especialidades.

En síntesis, la guía no solo aporta un marco para apoyar el proceso de toma de decisiones informadas sobre la planificación y operación de la infraestructura vial en áreas expuestas a las amenazas naturales, sino que también ofrece un proceso metodológico replicable para otras líneas vitales en Costa Rica. De esta manera, se pretende reforzar la capacidad de los actores involucrados para gestionar el riesgo y adaptar las infraestructuras frente a los desafíos hidrometeorológicos, climáticos, sísmicos y geodinámicos presentes y futuros.

Tabla de contenidos

Contenido de figuras	6
Contenido de tablas	9
Acrónimos y siglas	11
1. Introducción	13
1.1 Antecedentes	13
1.2 Objetivo general	13
1.3 Objetivos específicos	13
2. Identificación y priorización de las amenazas	14
2.1 Aspectos básicos	14
2.2 Índice de Prioridad Calculada del Riesgo (CPRI)	14
3. Principios básicos del análisis del riesgo	17
3.1 Definiciones de conceptos	17
3.1.1 El riesgo	18
3.1.2 Evaluación del riesgo	18
3.1.3 Las amenazas y la vulnerabilidad	18
3.1.4 Análisis de los posibles encadenamientos de amenazas	20
3.1.5 La gestión del riesgo	20
4. Análisis de la amenaza de inestabilidad de laderas	22
4.1 Principios y fundamentos	22
4.2 Susceptibilidad litológica	23
4.3 El factor de susceptibilidad derivado del relieve (pendientes, Sr)	24
4.4 Aspectos climáticos y su influencia sobre la susceptibilidad a la inestabilidad de laderas	25
4.4.1 Las zonas de vida	25
4.4.2 La humedad prevalente en el terreno	25
4.5 Susceptibilidad intrínseca del terreno (SUC; combinación de Sp, Sh y SI)	26
4.6 Factor de disparo derivado de la intensidad de las lluvias (Dp)	27
4.7 Determinación del disparador sísmico en la macrozonificación de la amenaza de la inestabilidad de laderas	27
4.7.1 Influencia del relieve, la litología y la presencia de fallas tectónicas en el disparador sísmico	28
4.7.2 Estimación de los efectos del sitio	28
4.8 Determinación de la amenaza total a la inestabilidad de laderas (Ad)	30
5. Amenaza de las avenidas fluviales (crecidas)	32
5.1 Introducción	32
5.2 Inventario de la infraestructura	34
5.3 Amenaza de las avenidas fluviales	35
5.3.1 Aspectos hidrológicos	37
5.3.2 Aspectos hidráulicos	37
5.4 Análisis de la vulnerabilidad	38
5.4.1 Generalidades	38
5.4.2 Estimación de las pérdidas económicas	40
5.5 Limitaciones y estudios posteriores recomendados	40

Tabla de contenidos

6. La amenaza volcánica: el caso de los lahares	41
6.1 Introducción	41
6.2 Identificación de la amenaza	42
6.2.1 Generalidades	42
6.2.2 Caracterización de la amenaza de los lahares	44
6.2.3 Impactos y efectos posibles de los lahares	45
6.2.4 Lahares históricos en Costa Rica	47
6.3 Metodología para la evaluación de la amenaza de los lahares, la vulnerabilidad y el riesgo asociados	48
6.4 Determinación de la frecuencia de los lahares destructivos	49
6.5 Caracterización de la infraestructura; análisis de la exposición ante los lahares	50
6.5.1 Identificación	50
6.5.2 Caracterización de los puentes y su vulnerabilidad ante los lahares	50
6.6 Valoración del daño, según la modelación de lahares	51
6.6.1 Supuestos de trabajo para modelar la amenaza de los lahares	51
6.6.2 Modelación de los lahares con LAHARZ	53
6.6.3 Valoración del daño, según la modelación	54
6.6.4 Conclusiones y recomendaciones acerca de la evaluación de la amenaza de los lahares	56
7. Aspectos básicos para el análisis del riesgo sísmico en los puentes	57
7.1 Definición y contexto del riesgo sísmico	57
7.2 Metodología conceptual	57
7.3 Metodología recomendada para el cálculo del riesgo sísmico	58
7.3.1 Metodología Hazus para la evaluación del riesgo sísmico en los puentes	58
7.3.2 Niveles de información requerida	58
7.4 Análisis de la amenaza sísmica	59
7.4.1 Cuantificación de la amenaza sísmica	59
7.4.2 Representación de la amenaza sísmica	60
7.4.3 Efectos de falla cercana	61
7.4.4 Parámetros de amenaza como entrada para la metodología Hazus	62
7.5 Vulnerabilidad y análisis de daño (exposición y fragilidad)	63
7.5.1 Determinación de la exposición	64
7.5.1.1 Clasificación de los puentes según su tipología estructural	64
7.5.1.2 Sistema de clasificación de puentes del National Bridge Inventory (NBI)	68
7.5.2 Determinación de la fragilidad	69
7.5.2.1 Principios básicos	69
7.5.2.2 Desarrollo de las curvas de fragilidad	69
7.5.2.3 Procedimiento para la construcción de las funciones de fragilidad	70
7.6 Funciones de consecuencias y evaluación de las pérdidas	74

7.6.1 Costo de reposición según el nivel del daño	75
7.6.2 Pérdidas máximas probables (PMP o PML)	75
7.6.3 Pérdida anual esperada (PAE)	75
7.7 Limitaciones, conclusiones y recomendaciones acerca del análisis del riesgo sísmico	76
7.7.1 Limitaciones	76
7.7.2 Conclusiones	77
7.7.3 Recomendaciones	77
8. Cambio climático (CC) y calentamiento global antropogénico (CGA)	78
8.1 Definiciones	78
8.2 Influencia del calentamiento global antropogénico en la composición del riesgo	79
8.3 Influencia del CGA sobre el riesgo derivado de las avenidas fluviales	81
8.4 Posible influencia del CGA en la amenaza de la inestabilidad de laderas	83
8.5 Influencia del calentamiento global antropogénico (CGA) sobre la amenaza de los lahares	84
8.6 El calentamiento global antropogénico (CGA) y su relación con el riesgo sísmico	89
8.6.1 Generalidades	89
8.6.2 Factores del CGA que afectan la vulnerabilidad en las estructuras de los puentes	89
8.6.3 Modelos para la evaluación de la fragilidad sísmica considerando los efectos del CGA	91
8.6.4 Modelos de cálculo del riesgo bajo el efecto del CGA sobre las curvas de fragilidad, según Hazus	94
9. Referencias bibliográficas	95
9.1 Glosario	104

Contenido de figuras

Figura 1. Base conceptual para el cálculo del CPRI (Autores)	14
Figura 2. Las amenazas naturales, socio-naturales y antropogénicas (Mora, 2022)	18
Figura 3. Representación gráfica de la variable aleatoria que relaciona la probabilidad de excedencia de la materialización de la amenaza, con respecto a su intensidad	19
Figura 4. Representación gráfica de la variable aleatoria que relaciona la probabilidad de excedencia de las pérdidas potenciales (en este caso del costo del daño), causados por la intensidad de la intensidad de la amenaza.	19
Figura 5. Secuencia de encadenamiento de amenazas y sus consecuencias respectivas. En la Guía no se ha incluido el análisis de la licuefacción sísmica de suelos, la caída de cenizas y lluvia ácida, vientos intensos, ni las inundaciones en las planicies.	20
Figura 6. Procedimiento analítico para el análisis de la amenaza de la inestabilidad de laderas (Mora-Vahrson, 1993, 1994; Mora et al. 2013; Mora, 2022). SP: Susceptibilidad por la pendiente de la ladera; SL: Susceptibilidad litológica; SH: Susceptibilidad por la humedad prevalente en el terreno; DS: Disparo debido a la intensidad de un sismo; DP: Disparo debido a la intensidad de las lluvias; SUSC: Parámetro, compuesto, de la susceptibilidad intrínseca; Ad: Amenaza de la inestabilidad de laderas.	22
Figura 7. Indicadores morfodinámicos, “proxies” sustitutivos de los parámetros geotécnicos, topográficos hidrodinámicos y sismológicos, utilizados para caracterizar la susceptibilidad, los disparadores dinámicos y la amenaza de la inestabilidad de laderas, según la metodología Mora-Vahrson (1994). C: cohesión, Φ : ángulo de fricción interna, μ : humedad prevalente del terreno y su influencia sobre la presión hidrostática intersticial.	23

Contenido de figuras

Figura 8. Relación entre los grados y porcentajes de las pendientes del terreno (http://enriquemontalar.com/wp-content/uploads/Esquema-Talud-Grados-Pendiente-Porcentaje.pdf).	24
Figura 9. Clasificación de los ecosistemas de la región, aplicables por ejemplo al área que atraviesa el corredor vial de la RN-32 (elipse a trazos rojos), basada en los parámetros (latitud, humedad, precipitación y piso altitudinal) que definen las zonas de vida, según Holdridge (1967): Bosque húmedo a muy húmedo y secundariamente bosque pluvial.	25
Figura 10. Procedimiento analítico, para obtener el conjunto integrado de los parámetros de la susceptibilidad intrínseca (SUSC: $Sp \cdot SI \cdot Sh$) y los disparadores (DISP: $Ds \cdot Dp$), y estimar la amenaza "total" ($Ad = SUSC \cdot DISP$) de la inestabilidad de laderas. *: Algoritmos de combinación de los valores de los parámetros respectivos (Mora-Vahrson, 1994; Mora, 2022).	31
Figura 11. Determinación de la amenaza de la inestabilidad de laderas: a) En el escenario en que se dispara (A_p) por medio de las lluvias intensas, sin que se produzca un sismo en ese momento. b) En el escenario en que se dispara (A_s) por medio de un sismo intenso durante la estación seca o sin una lluvia reciente.	31
Figura 12. Esquema metodológico para evaluar la amenaza de avenidas fluviales, según HAZUS (FEMA, 2022): 1. Inventario de la infraestructura en el tramo de análisis. 2. Cuantificación y cartografía de la amenaza de avenida fluvial. 3. Estimación del daño físico a la infraestructura (puentes y tramos de vía). 4. Estimación de las pérdidas económicas directas.	33
Figura 13. Esquema metodológico para evaluar la amenaza de la socavación, según CIRIA (Sasidharan et al., 2023).	34
Figura 14. Niveles de análisis, de acuerdo con la metodología HAZUS (FEMA, 2022).	35
Figura 15. Tramo de la RN-32 en donde se analizará la amenaza de las avenidas fluviales. En azul se muestran las áreas en donde suceden, con frecuencia, desbordamientos del lecho menor hacia el lecho mayor y las llanuras, y por lo tanto se producen inundaciones (CNE).	36
Figura 16. Ejemplo que muestra los resultados de los niveles de agua (sobre el nivel del mar) para una crecida de 100 años de período de recurrencia, en un modelo hidráulico bidimensional del río Chirripó.	38
Figura 17. Flujograma general de la metodología planteada para la evaluación de las amenazas y del riesgo derivados de los lahares. En el diagrama se menciona la plataforma LAHARZ, aunque existen otras (e.g. Titan 2F, Flow2D, Flow-R, etc.) que también pueden permitir el análisis correspondiente. LAHARZ fue escogida por ser sencilla de aplicación. MDS: Modelo Digital de la Superficie (Sinónimo de Modelo Numérico del Terreno, MNT).	48
Figura 18. Frecuencia de eventos vs. nivel de daños esperados. Mientras más frecuente es el evento, mayor el número equivalente (QF) y menor es el nivel de los daños probables. Los lahares con mayor nivel de daños son menos frecuentes.	49
Figura 19. Perfil de un lahar típico y como los que se ha supuesto para la metodología propuesta. Modificado de Vallance & Iverson (2015).	52
Figura 20. Proporciones de las alturas H a las que podría llegar un lahar e impactar un puente. Se supone que el tirante del lahar modelado se relaciona con la posibilidad de impacto destructivo en la infraestructura.	53

Figura 21. En la imagen de la izquierda, se muestran el área de disparo del lahar, los límites laterales de la sección transversal (A) y el área de inundación planimétrica. En la figura de la derecha, se muestra un esquema del funcionamiento conceptual de LAHARZ, modificado de Iverson et al. (1998).	53
Figura 22. Proceso de análisis para la determinación del riesgo sísmico.	57
Figura 23. Diagrama metodológico para la determinación del riesgo sísmico de acuerdo con Hazus	58
Figura 24. Niveles de análisis, de acuerdo con la metodología HAZUS (FEMA, 2022).	59
Figura 25. Representación gráfica del efecto de amplificación de la intensidad sísmica por presencia de falla cercana. (modificado de https://www.i-fink.com/what-causes-earthquakes/)	61
Figura 26. Curvas de fragilidad para caracterizar la probabilidad de los niveles del daño de un puente, según la aceleración espectral escogida y de acuerdo con la metodología Hazus	73
Figura 27. Pérdida anual esperada debida a un sismo. Fuente: (FEMA, 2022)	76
Figura 28. Definiciones, conceptos asociados, influencias y relaciones recíprocas de los procesos hidrometeorológicos y climáticos derivados del tiempo meteorológico, la variabilidad climática (VC) y el cambio climático (CC). ENOS: El Niño-La Niña/Oscilación del Sur; ZCIT: Zona de Convergencia Intertropical, DANA: Depresión Aislada en Niveles [i.e. atmosféricos] Altos [i.e. elevados].	79
Figura 29. Variaciones en el riesgo derivado de la amenaza de la inestabilidad de laderas, la sismicidad los lahares y las avenidas fluviales, según la posible influencia del calentamiento global antropogénico (CGA) (Mora, S; 2022a).	81
Figura 30. Cambios en la variable de la precipitación máxima de 24 horas. Según los períodos históricos cercano (1981 a 2010) y futuro medio (2041 a 2070); cuencas hidrográficas de los ríos Barbilla y Chirripó, provincia de Limón, Costa Rica. Según diferentes escenarios climáticos (Fuente: https://centroamerica.aemet.es/index30.html).	83
Figura 31. Definición de un escenario hipotético para visualizar la influencia de la opción del incremento posible de la intensidad, duración y frecuencia de las precipitaciones pluviales, causado por el calentamiento global antropogénico. Para la referencia, se puede escoger entre la posibilidad del incremento del 5% o del 10%, con el objeto de analizar su influencia en los factores de la humedad prevalente (Sh) y del disparo pluviométrico (Dp) definidos por la metodología Mora Vahrson (1994). El escenario implica, ya sea una reducción del período de recurrencia (Tr) de las lluvias de una determinada intensidad y duración de las lluvias, o para un Tr constante, un incremento de la intensidad y duración respectivas (i.e. "delta amenaza").	84
Figura 32. Gráfico de correlación entre el tamaño del lahar, según su tirante en el sitio del puente, expresado en % de la altura del lahar desde el lecho del río a la altura del puente vs. el daño que se generaría en el puente. La curva roja simula el incremento supuesto de la capacidad destructiva de los lahares en caso de que el CGA incremente la intensidad, duración, frecuencia y volumen de las precipitaciones pluviales en alrededor de 5%. Nótese que LAHARZ no puede realizar, de manera directa, este tipo de modelos.	85
Figura 33. Gráfico de correlación entre el tamaño del lahar, según su tirante en el sitio del puente, expresado en % de la altura del lahar desde el lecho del río a la altura del puente vs. el daño que se generaría en el puente. Las curvas superiores simulan el incremento de la capacidad destructiva de los lahares en caso de que el CGA incremente la intensidad, duración, frecuencia y volumen de las precipitaciones pluviales en diferentes escenarios.	87
Figura 34. Ejemplos de la influencia del CGA en los puentes. Fuente: Nasr, et.al. (2019)	90
Figura 35. Variaciones en vulnerabilidad derivada de la amenaza sísmica en los puentes, bajo la influencia del calentamiento global antropogénico (CGA) (Mora, S; 2022a). Fuente: (Mortagi & Gosh, 2020).	91

Figura 36. Aumento en la vulnerabilidad de los puentes por la influencia del CGA.	91
Figura 37. Ejemplo de resultados de análisis no lineales Tiempo-Historia para determinar los parámetros de regresión para el cálculo de $\text{med}(t)$ y $\zeta(t)$, mediante modelos para puentes corroídos a edades as-built y de 75 años, considerando la exposición a salpicaduras marinas y efectos del CGA. Fuente: Chirdeep et.al. (2023)	93
Figura 38. Comparación de las curvas de fragilidad sísmica, dependientes del tiempo, para diferentes edades de la estructura (as built, 25, 50 y 75 años) y los estados de los daños completo (C) y ligero (S). Fuente: Chirdeep et.al. (2023)	93

Contenido de tablas

Tabla 1. Amenazas naturales y antropogénicas consideradas, inicialmente, para el análisis de sus características y prioridades	15
Tabla 2. Índices para la ponderación del riesgo asociado a cada tipo de amenaza	15
Tabla 3. Índice de prioridad del riesgo calculado (CPRI) y sus implicaciones para el análisis del riesgo.	16
Tabla 4. Factores característicos de la roca que influyen en la velocidad de onda cortante VS30 (NEHRP, 2012).	29
Tabla 5. Clasificación de suelos de acuerdo con el método AASHTO (AASHTO, 2020)	29
Tabla 6. Subclasificación de la VS30 propuesta.	29
Tabla 7. Descripciones para el Índice de Socavación según HAZUS (FEMA, 2022).	39
Tabla 8. Probabilidad de falla, según el tipo de puente y de su exposición a la amenaza de socavación (HAZUS; FEMA, 2022).	40
Tabla 9. Relaciones entre los procesos volcánicos amenazantes y los elementos (población, infraestructura/actividades) expuestos a daños y pérdidas (Modificado de Marzocchi et al., 2009).	43
Tabla 10. Descripción del origen de los lahares, transporte, composición, características principales de daño y métricas comunes que caracterizan la intensidad de flujos. Modificado de (Wilson et al., 2014).	46
Tabla 11. Resumen de eventos laháricos documentados en los alrededores de algunos volcanes de Costa Rica y que han dañado elementos de la infraestructura.	47
Tabla 12. Recurrencia de los eventos y su capacidad destructiva	49
Tabla 13. Indicadores utilizados para determinar la vulnerabilidad física de los puentes expuestos a la amenaza de los lahares (modificado de Kappes et al., 2012).	50
Tabla 14. Rangos de fragilidad de los puentes expuestos a la amenaza de los lahares.	51
Tabla 15. Relaciones entre el tamaño del lahar, modelado según su tirante y el % con respecto a la altura del puente específico, según su capacidad destructiva.	55
Tabla 16. Definición y descripción de los niveles de daños por lahares a puentes utilizada propuesta en esta metodología.	55
Tabla 17. Niveles de análisis para la cuantificación de la amenaza sísmica según la información disponible, de acuerdo con la metodología HAZUS (FEMA, 2022).	60

Tabla 18. Representación de la amenaza sísmica según el nivel de información disponible, de acuerdo con la metodología HAZUS (FEMA, 2022). **61**

Tabla 19. Formas de considerar los efectos de la presencia de falla cercana según el nivel de información disponible **62**

Tabla 20. Periodos de recurrencia de la sacudida sísmica para el análisis del riesgo **62**

Tabla 21. Equivalencia entre la nomenclatura de los tipos de suelo usados en la normativa estadounidense y la usada en la normativa costarricense **63**

Tabla 22. Niveles para la caracterización de la exposición y la fragilidad según Hazus (FEMA, 2020) **63**

Tabla 23. Esquema de clasificación de puentes según Hazus. Fuente: (FEMA, 2022). **65**

Tabla 24. Coeficientes para evaluar K3D. Fuente: (FEMA, 2022). **72**

Tabla 25. Intervalos de variación del índice del daño medio, para cada grado de daño **74**

Tabla 26. Fuentes de información para la determinación de los costos de reposición de los puentes **74**

Tabla 27. Porcentajes asociados a cada nivel de daño para determinar el costo de reposición del puente **75**

Tabla 28. Relaciones entre el tamaño del lahar, modelado según su tirante y el % con respecto a la altura del puente específico, según su capacidad destructiva y los diferentes escenarios considerando el calentamiento global antropogénico (CGA). *Valores donde se da un salto al siguiente nivel de daños y valor % de reposición del puente. **87**

Tabla 29. Mediana (med) y desviación estándar (ζ) de las curvas de fragilidad, en diferentes plazos (años), para salpicaduras marinas y exposición atmosférica, considera los efectos del CGA. Fuente: Chirdeep et.al. (2023). **94**

Acrónimos y siglas

A continuación, se presenta una lista de acrónimos utilizados en este documento, junto con sus significados. Esta referencia facilitará la comprensión y permitirá a los lectores seguir el contenido de manera más efectiva.

ACI	Instituto Americano del Concreto (American Concrete Institute)
ACI-CR	Capítulo Costarricense del Instituto Americano del Concreto
CGA	Calentamiento Global Antropogénico
CC	Cambio climático
CFIA	Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica
CIRIA	Asociación de Investigación e Información de la Industria de la Construcción
CPRI	Índice de Prioridad Calculada del Riesgo, por sus siglas en inglés
DP	Factor de disparo pluviométrico
FEMA	Agencia Federal de Manejo de Emergencias, por sus siglas en inglés
FHWA	Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos
GVP-EI	Gases, vapores y partículas a efecto invernadero
HAZUS	Herramienta para Análisis de Pérdidas y Amenazas, por sus siglas en inglés
HEC-RAS	Sistema de Análisis de Ríos del Centro de Ingeniería Hidráulica
IBER	<i>Software</i> para Modelización de Flujo Bidimensional
IDF	Intensidad, duración y frecuencia
ILWIS	Sistema Integrado de Información Geográfica y Análisis de Imágenes, por sus siglas en inglés
IMN	Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica
INDECOPI	Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, por sus siglas en inglés
ISO	Organización Internacional de Normalización
LANAMME	Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Acrónimos y siglas

Esta es la continuación de la lista de acrónimos y siglas relevantes para la comprensión clara del documento.

MERCI-CR

Metodología de Evaluación del Riesgo Climático para Infraestructura en Costa Rica

MNT

Modelo numérico del terreno

NEHRP

Programa Nacional de Reducción de Peligros Sísmicos de Estados Unidos

PGA

Aceleración pico del terreno, por sus siglas en inglés

PMP

Pérdida máxima probable

PSA

Pseudoaceleraciones espectrales

RN-32

Ruta Nacional 32

SEPSA

Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria

SIG

Sistema de Información Geográfica

SNIT

Sistema Nacional de Información Territorial

USACE

Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos

USGS

Servicio Geológico de los Estados Unidos, por sus siglas en inglés

VC

Variabilidad climática

1. Introducción

1.1 Antecedentes

El Decreto N.º 42465 de 2019 establece los lineamientos generales para la incorporación de las medidas de resiliencia de la infraestructura pública, a partir de los resultados de la evaluación del riesgo por exposición a las amenazas hidrometeorológicas y climáticas. Estas medidas buscan la reducción de los daños y las pérdidas, la recuperación después del desastre y los costos de construcción y reconstrucción de la infraestructura. Las medidas resultantes pueden aplicarse en todo el ciclo de vida de los proyectos de inversión pública, para reducir la vulnerabilidad y contribuir con el desarrollo socioeconómico y ambiental.

De acuerdo con el artículo 8 del decreto, el proceso analítico debe tomar en cuenta los pasos necesarios para garantizar:

- Identificación de las amenazas.
- Evaluación de la exposición.
- Evaluación de la vulnerabilidad.

Estimación del riesgo: Según la Ley Nacional de Emergencias define en el Art. 4 el riesgo como “Probabilidad de que se presenten pérdidas, daños o consecuencias económicas, sociales o ambientales en un sitio particular y durante un período definido. Se obtiene al relacionar la amenaza con la vulnerabilidad de los elementos expuestos”. El Decreto N.º 42465 establece la estimación del riesgo como “la ponderación matemática de las pérdidas probables de la infraestructura y otros elementos de los sistemas social y ambiental asociados, como resultado del impacto directo o indirecto de la materialización de la amenaza sobre los elementos expuestos y frágiles”.

Análisis de escenarios, para ilustrar las diversas probabilidades de la materialización de los sucesos y de sus impactos posibles.

Ponderación del riesgo y selección de las medidas de adaptación, mediante las herramientas y metodologías, las cuales deben incluir un procedimiento que permita ponderar y seleccionar la o las medidas más eficientes para enfrentar y mantener la operación de la infraestructura expuesta a las amenazas mayores y considerando sus factores de vulnerabilidad.

1.2 Objetivo general

El objetivo general de este documento es presentar las bases conceptuales para integrar el análisis del riesgo en las obras de infraestructura, según los lineamientos establecidos en el Decreto N.º 42465 MOPT-MINAE-MIVAH (2020), con el fin de identificar e incorporar medidas de resiliencia en la infraestructura pública.

1.3 Objetivos específicos

- Formular una guía metodológica, con un formato propicio para la sistematización de la información y para permitir su replicabilidad en las obras de infraestructura pública.
- Informar acerca de las bases conceptuales, del tipo de datos e información requerida, así como su aplicabilidad.
- Elaborar un estudio multicriterio piloto y demostrativo preliminar del riesgo en la RN-32 (considerando la disponibilidad de cartografía LiDAR y datos acerca de los casos e incidentes específicos), en los sectores con información adecuada y disponible, acerca de la incidencia de las amenazas de la inestabilidad de laderas y lahares en el sector montañoso, las avenidas fluviales en las áreas del piedemonte y la amenaza sísmica en general.

2. Identificación y priorización preliminar de las amenazas

2.1 Aspectos básicos

De acuerdo con el Decreto N.º 42465 ya mencionado, se recomienda identificar todas las amenazas que podrían afectar la carretera y priorizarlas de forma preliminar según la metodología del Índice de Prioridad Calculada del Riesgo (CPRI, por sus siglas en inglés). Este índice ponderado se usa cada vez más como una base para cuantificar el riesgo jurisdiccional y para la planificación de las medidas de mitigación del impacto de las amenazas. Incorpora la probabilidad de ocurrencia de la amenaza, su magnitud o severidad, el tiempo de reacción y su duración. Pero también incorpora la percepción social del riesgo en forma de factores de ponderación que asignan un mayor peso a los componentes de la amenaza cuya influencia en el nivel del riesgo se percibe como mayor. Estos componentes de la amenaza se combinan con los factores de ponderación y se deriva el CPRI para cada amenaza considerada. De esta forma, se obtiene una base común para su comparación y priorización.

2.2 Índice de prioridad calculada del riesgo (CPRI)

La Figura 1 resume las bases conceptuales del cálculo del CPRI.

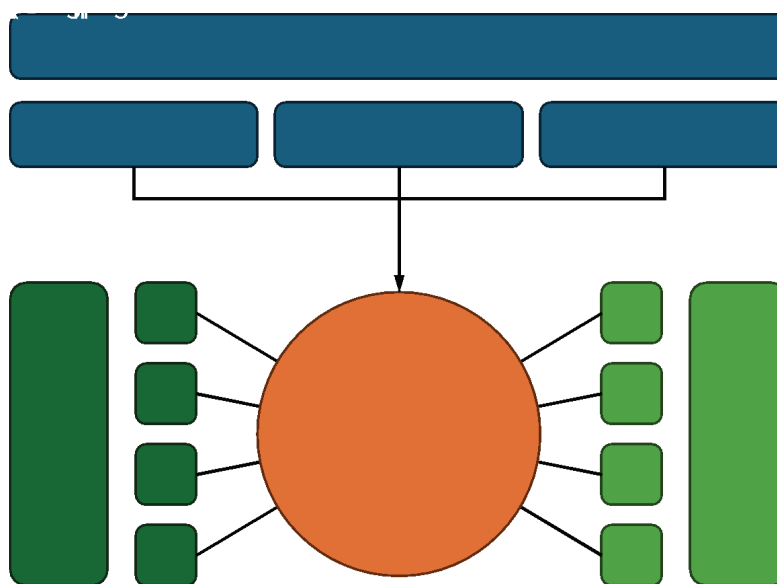


Figura 1. Base conceptual para el cálculo del CPRI (Autores)

Matemáticamente, el CPRI se define como sigue:

$$CPRI = P \times \gamma_P + M \times \gamma_M + W \times \gamma_W + D \times \gamma_D$$

...en donde:

P, M, W y D son los índices de probabilidad, magnitud, alerta y duración, respectivamente;

y los factores de ponderación (que suman 1,0) para cada una de las características de la amenaza son:

$$\gamma P = 0,45; \gamma M = 0,30; \gamma W = 0,15; \gamma D = 0,10$$

Para proceder con el cálculo de CPRI, todas las amenazas que podrían afectar el proyecto fueron identificadas y categorizadas según su origen (Figura 1). Estas pueden ser naturales, antropogénicas o socionaturales. Seguidamente, se presenta una lista no taxativa ni limitativa de las posibles amenazas a las que usualmente están sujetos los proyectos de infraestructura vial. Esta lista puede ser usada como referencia para otros proyectos, pero el profesional a cargo debe considerar que podría haber otras amenazas no indicadas en las listas de la Tabla 1.

Tabla 1. Amenazas naturales y antropogénicas consideradas, inicialmente, para el análisis de sus características y prioridades

Amenaza			Amenaza		
Clase	Grupo	Tipo	Clase	Grupo	Tipo
NATURALES	Geodinámicas	Sismicidad	SOCIONATURALES	Fuego	Incendio posterremoto
		Tsunami			Incendio urbano
		Erupción volcánica (ceniza, bloques, lava)			Incendio forestal/charral
		Inestabilidad de laderas		Biológicos	Patógenos que afectan humanos
		Licuefacción			Patógenos que afectan animales
		Lahares torrenciales			Patógenos que afectan plantas
		Impacto de asteroide			Plaga o Infestación
		Tormenta geomagnética			
	Hidrometeorológicas	Tormenta eléctrica	ANTROPOGÉNICAS	Intencionadas	Ataque terrorista
		Alta precipitación			Invación militar
		Fuertes vientos			Sabotaje
		Huracán			Espionaje
		Tornado			Huelga o Manifestación
		Inundación			Cambio en regulación / legislación
		Socavación en estructuras			
	Climáticas	Temperatura extrema - calor		Accidentales	Accidente de tránsito
		Sequía			Derrame de sustancias peligrosas
		Temperatura extrema - frío			Interrupción de servicios básicos
		Granizo/Hielo			Impacto de basura espacial
					Explosión
					Rotura de presa

Tabla 2. Índices para la ponderación del riesgo asociado a cada tipo de amenaza

Probabilidad de Ocurrencia	Altamente probable	4	Magnitud / Severidad	Catastrófico	4
	Probable	3		Crítico	3
	Posible	2		Limitado	2
	Poco probable	1		Despreciable	1
Tiempo de Alerta	Menos de 6 horas	4	Duración	Más de 1 semana	4
	Entre 6 y 12 horas	3		Menos de 1 semana	3
	Entre 12 y 24 horas	2		Menos de 1 día	2
	Más de 24 horas	1		Menos de 6 horas	1

Para cada una de las amenazas identificadas y según sus características, fueron aplicados los índices ponderados y sus combinaciones respectivas (Tabla 2). Los cálculos y resultados se resumen en la Tabla 3. Además de las amenazas consideradas, se muestra el resultado de identificación y priorización preliminar, con base en el CPRI. Lo usual es que el análisis del riesgo incluya al menos

Tabla 3. Índice de prioridad del riesgo calculado (CPRI) y sus implicaciones para el análisis del riesgo

Índice de Prioridad de Riesgo Calculado (CPRI)															Implicaciones para Análisis de Riesgo						
Amenaza			Probabilidad		+	Magnitud / Severidad		+	Tiempo de Alerta		+	Duración		=	Índice de Prioridad CPRI	Se incluirá?	Comentarios / Fundamentos				
Clase	Grupo	Tipo	P	x	γ _P		M	x	γ _M		W	x	γ _W		D	x	γ _D				
NATURALES	Geodinámicas	Sismicidad	3	x	0,45	+	4	x	0,30	+	4	x	0,15	+	1	x	0,10	=	3,25	SI	• alto impacto en infraestructura • disparador de otras amenazas
		Tsunami	1	x	0,45	+	2	x	0,30	+	4	x	0,15	+	1	x	0,10	=	1,75	NO	
		Erupción volcánica (ceniza, bloques, lava)	1	x	0,45	+	3	x	0,30	+	4	x	0,15	+	1	x	0,10	=	2,05	NO	• bajo impacto en infraestructura
		Inestabilidad de laderas	4	x	0,45	+	3	x	0,30	+	4	x	0,15	+	1	x	0,10	=	3,4	SI	• alto impacto en infraestructura
		Licuefacción	2	x	0,45	+	3	x	0,30	+	4	x	0,15	+	1	x	0,10	=	2,5	COND	• alto impacto en infraestructura • información y tiempo insuficientes
		Lahares torrenciales	2	x	0,45	+	3	x	0,30	+	4	x	0,15	+	1	x	0,10	=	2,5	SI	• alto impacto en infraestructura
		Impacto de asteroide	1	x	0,45	+	1	x	0,30	+	1	x	0,15	+	1	x	0,10	=	1	NO	
	Hidrometeorológicas	Tormenta geomagnética	1	x	0,45	+	1	x	0,30	+	1	x	0,15	+	2	x	0,10	=	1,1	NO	
		Tormenta eléctrica	4	x	0,45	+	1	x	0,30	+	2	x	0,15	+	1	x	0,10	=	2,5	NO	• bajo impacto en infraestructura
		Alta precipitación	4	x	0,45	+	2	x	0,30	+	2	x	0,15	+	2	x	0,10	=	2,9	SI	• alto impacto en infraestructura • disparador de otras amenazas
		Fuertes vientos	3	x	0,45	+	1	x	0,30	+	2	x	0,15	+	2	x	0,10	=	2,15	NO	• bajo impacto en infraestructura
		Huracán	1	x	0,45	+	1	x	0,30	+	1	x	0,15	+	3	x	0,10	=	1,2	NO	
		Tornado	2	x	0,45	+	2	x	0,30	+	2	x	0,15	+	1	x	0,10	=	1,9	NO	
		Inundación	4	x	0,45	+	3	x	0,30	+	3	x	0,15	+	3	x	0,10	=	3,45	SI	• alto impacto en infraestructura • disparador de otras amenazas
	Climáticas	Socavación en estructuras	3	x	0,45	+	3	x	0,30	+	4	x	0,15	+	2	x	0,10	=	3,05	SI	• alto impacto en infraestructura
		Temperatura extrema - calor	1	x	0,45	+	2	x	0,30	+	1	x	0,15	+	3	x	0,10	=	1,5	NO	
		Sequía	2	x	0,45	+	2	x	0,30	+	1	x	0,15	+	4	x	0,10	=	2,05	NO	• bajo impacto en infraestructura
		Temperatura extrema - frío	1	x	0,45	+	2	x	0,30	+	1	x	0,15	+	3	x	0,10	=	1,5	NO	
		Granizo/Hielo	1	x	0,45	+	1	x	0,30	+	1	x	0,15	+	1	x	0,10	=	1	NO	

aquellas amenazas que fueron identificadas y que presenten los valores de CPRI más altos. Cabe mencionar que el CPRI es una medida para comparación relativa entre los elementos individuales de una población. Esto quiere decir que su valor radica en la comparación relativa entre diversas amenazas que pueden afectar un sitio y no necesariamente como una medida absoluta de la importancia de las amenazas en el análisis del riesgo. El profesional responsable del estudio del riesgo debe también valorar cualquier otro criterio que le permita establecer aquellas amenazas que serán contempladas en el estudio. Es importante mencionar que el cambio climático (CC) no se considera como una amenaza particular, sino que, como se verá más adelante, se estudian sus efectos en el análisis de cada una de las amenazas que se incluyen en esta guía.

Para efectos de la confección de esta guía, que se basa en el estudio del riesgo piloto en la RN-32, las amenazas prioritarias por considerar son la inestabilidad de laderas, alta precipitación, inundaciones, socavación de estructuras y sismicidad. Los lahares torrenciales se incluyeron debido a que pueden generar un muy alto impacto. Esta guía contiene las metodologías específicas de cada una de estas amenazas.

3. Principios básicos del análisis del riesgo

3.1 Definiciones y conceptos

3.1.1 El riesgo

El Decreto N.º 42465 - MOPT-MINAE-MIVAH (2020) "Lineamientos generales para la incorporación de las medidas de resiliencia en infraestructura pública", la Ley N.º 8488 (2006, 2011) y la Política Nacional de Gestión del Riesgo (2016-2030) definen el riesgo como la "probabilidad de que se presenten daños y pérdidas, o consecuencias económicas, sociales o ambientales en un sitio particular y durante un período definido. Se obtiene al relacionar la amenaza con la vulnerabilidad de los elementos expuestos". A su vez, la amenaza se define como un "Peligro latente representado por la posible ocurrencia de un fenómeno [sic] peligroso, de origen natural, tecnológico o provocado por el hombre, capaz de producir efectos adversos en las personas, los bienes, los servicios públicos y el ambiente". La vulnerabilidad se define como la "Condición intrínseca [...] de un elemento...] de ser impactado por un suceso a causa de un conjunto de condiciones y procesos físicos, sociales, económicos y ambientales. Se determina por el grado de exposición y fragilidad de los elementos susceptibles de ser afectados -la población, sus haberes, las actividades de bienes y servicios, el ambiente- y la limitación de su capacidad para recuperarse. Las metodologías de evaluación de [sic] riesgo presentan diversos criterios para el análisis de la vulnerabilidad; en algunos casos el análisis de la vulnerabilidad se limita a solo determinar la exposición [sic] y en otros casos la exposición se analiza de manera separada respecto de las otras variables de vulnerabilidad que son [sic] fragilidad y capacidades...".

Si bien estas definiciones se aproximan a las condiciones descriptivas de los términos técnicos respectivos y forman parte del marco normativo nacional, por lo cual deben ser respetadas, es conveniente indicar que, a lo largo de esta guía, se ha considerado necesario y útil actualizarlas, completarlas y complementarlas con otros aspectos adicionales que permitan alcanzar un mayor grado de comprensión y precisión con respecto al estado actual del conocimiento y, por lo tanto, ofrecer un mejor ajuste epistemológico y científico.

Entonces, para los fines prácticos y el propósito de esta guía metodológica, es importante recalcar los siguientes aspectos complementarios sobre la definición semántica, literal y técnica del riesgo. De acuerdo con el Diccionario de la Real Academia Española (DRAE), del vocablo "riesgo" en su acepción más cercana al objetivo de esta guía describe "...la contingencia o proximidad de daños y pérdidas..." (ver el Glosario, Anexo 2), según las características (intensidad, distribución espaciotemporal) "...y la probabilidad de la materialización de una amenaza, según las características de la vulnerabilidad, situación, condiciones y contexto espaciotemporal, social, económico, ambiental y cultural de los elementos expuestos...". Adicionalmente, puede indicarse que las causas y consecuencias no son siempre predecibles y dependen de la probabilidad combinada de ocurrencia de la materialización de una amenaza, en un espacio y tiempo específicos, con suficiente intensidad para producir daños y pérdidas, debido tanto a la intensidad del acontecimiento como a la fragilidad de los elementos expuestos: economía, vida humana, ambiente, etc. El acontecimiento puede provenir de una amenaza natural o antropogénica.

En el Glosario del Anexo 2 se ofrecen otros detalles complementarios acerca de estos términos y conceptos. La cuantificación del riesgo, mediante los procedimientos matemáticos y estadísticos (i.e. teorema de la probabilidad total de Bayes), se discutirán en el apartado 3.1.2.

3.1.2 Evaluación del riesgo

La evaluación del riesgo consiste en el análisis y la cuantificación de la probabilidad de los daños y pérdidas que pueden producirse, sobre los elementos vulnerables, sobre lo cual deben tomarse en cuenta sus grados de exposición y fragilidad, su impacto posible sobre la vida humana y la calidad de la vida, sobre el ambiente y los recursos naturales y el valor de las pérdidas económicas posibles. El riesgo se describe, principalmente, mediante la función de excedencia de las pérdidas $v(p)$, definida por el número de eventos, por unidad de tiempo que en determinado espacio producirá un valor específico, igual o mayor, de pérdidas probables P ; $v(p)$ es el producto de una convolución de dos probabilidades condicionadas: la amenaza y la vulnerabilidad, ambas representadas por una variable aleatoria establecida por la relación entre la intensidad (incluyendo la magnitud y duración) de la amenaza y la probabilidad de que se produzcan daños y pérdidas. El método estándar internacional para la estimación del riesgo comienza mediante el cálculo de la probabilidad anual de los daños y las pérdidas, conocida como la tasa de excedencia, y se puede calcular mediante el teorema de la probabilidad total, tal y como se indica en la ecuación siguiente y según el análisis y evaluaciones (Cardona et al., 2023a; 2023b):

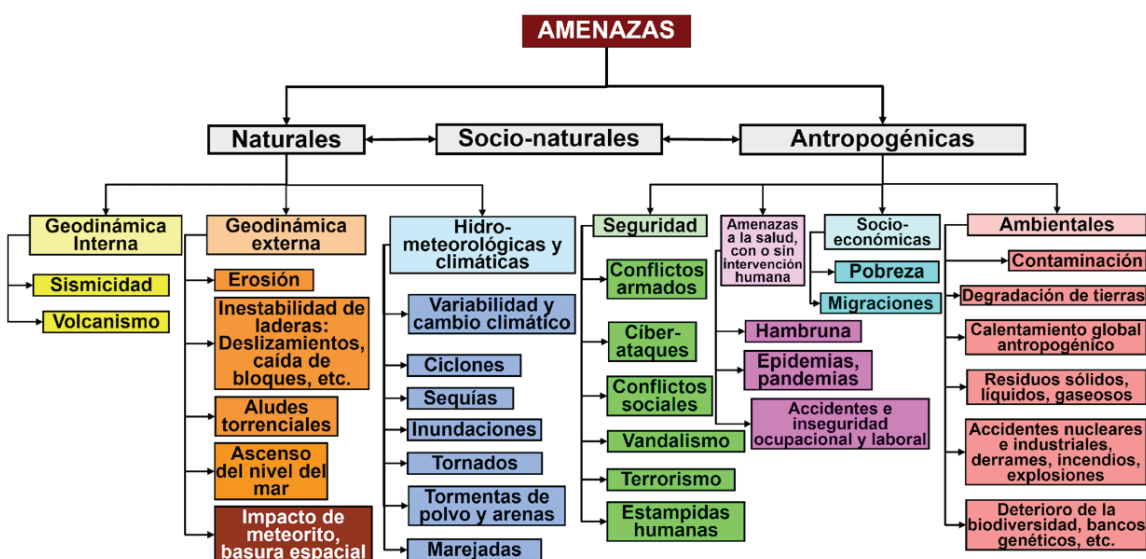
$$FEP = v(p) = \sum_{i=1}^{n \text{ eventos}} Pr(P > p | \text{Evento } i) \cdot FA(\text{Evento } i)$$

... en donde $v(p)$ es la tasa de excedencia de la pérdida P ; $FA(\text{Evento } i)$ es la frecuencia anual de materialización del evento i , mientras que $Pr(P > p | \text{Evento } i)$ es la probabilidad de que la pérdida sea mayor que P (i.e. en el i -ésimo evento), Tr es el período de recurrencia de la pérdida P (es decir, el inverso de la tasa de excedencia anual). La tasa de excedencia $v(p)$ es, en realidad, la suma de las pérdidas de todos los elementos expuestos al conjunto de escenarios en los escenarios estocásticos de la amenaza considerada.

3.1.3 Las amenazas y la vulnerabilidad

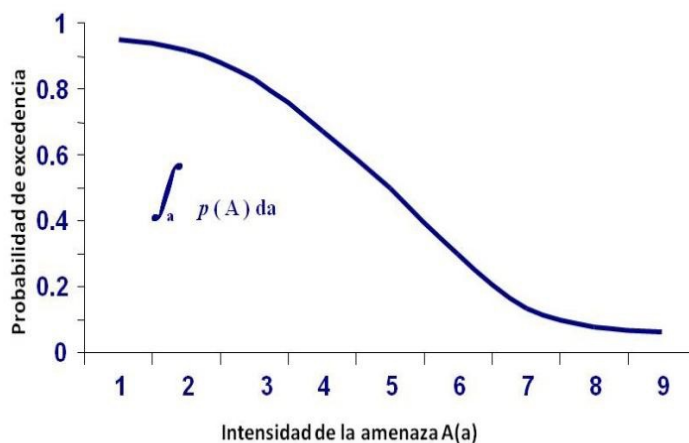
Las amenazas pueden generarse a partir de procesos estrictamente naturales, como también por la actividad humana (i.e. antropogénicas); o en una combinación de ambas (socionaturales), según se representa en la Figura 2.

Figura 2. Diagrama de las amenazas naturales, socionaturales y antropogénicas (Mora, 2022)



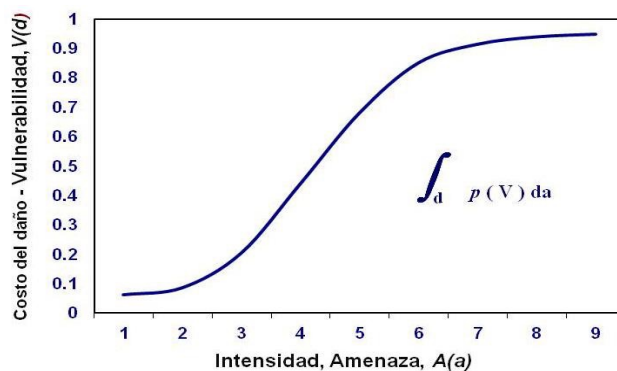
De manera resumida, las amenazas pueden caracterizarse, según su origen, mediante los criterios y parámetros que definen la distribución espacial y temporal de su intensidad, su recurrencia (i.e. frecuencia) y celeridad de materialización, siempre tomando en cuenta que pueden materializarse de manera individual o combinada, dos o más simultáneamente, o en secuencias de encadenamiento (Figura 3).

Figura 3. Representación gráfica de la variable aleatoria que relaciona la probabilidad de excedencia de la materialización de la amenaza, con respecto a su intensidad



Por su parte, la vulnerabilidad (Figura 4) se define por medio del grado de exposición de los elementos frágiles, del valor económico, social, patrimonial y cultural de las pérdidas potenciales, del impacto sobre la vida humana (muertos, heridos, trauma, pérdida de acceso a los servicios básicos y medios de subsistencia) y del impacto sobre el ambiente y los recursos naturales. La vulnerabilidad es una precondition derivada de la debilidad, desorganización, pobreza, inestabilidad política y ausencia o insuficiencia de resiliencia de las comunidades y países. Está socialmente construida. Es específica para cada tipo de amenaza, dinámica y latente, y también es exacerbada por aspectos políticos de la gobernabilidad, institucionalidad, organización, educación, ideología y cultura, entre otros aspectos.

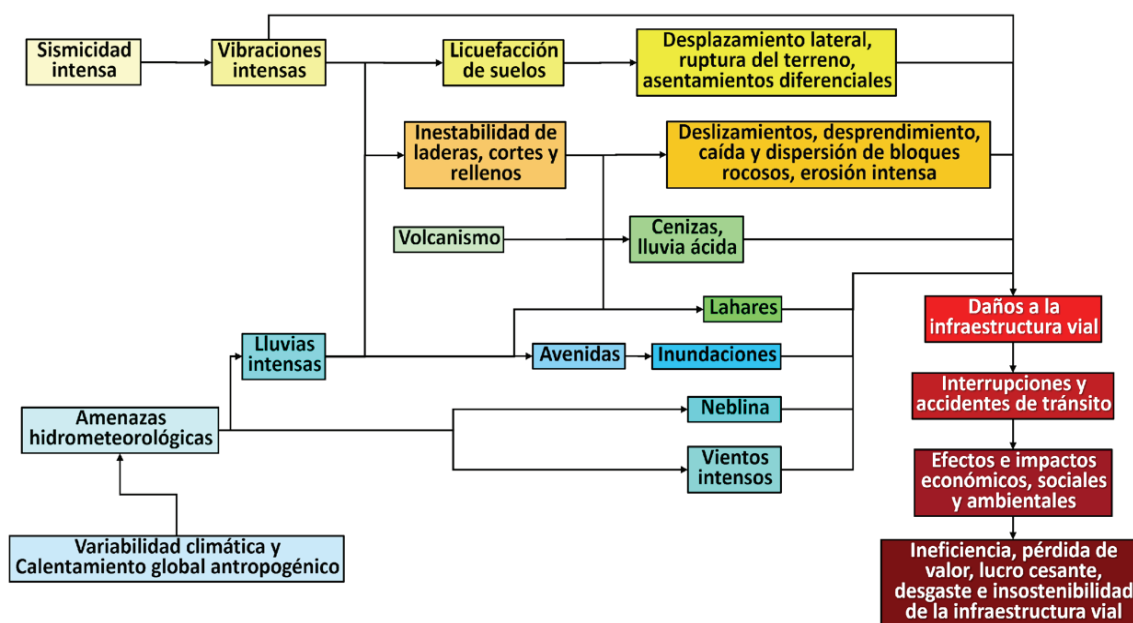
Figura 4. Representación gráfica de la variable aleatoria que relaciona la probabilidad de excedencia de las pérdidas potenciales (en este caso del costo del daño), causados por la intensidad de la intensidad de la amenaza.



3.1.4 Análisis de los posibles encadenamientos de amenazas

Es usual el hecho de que cuando las amenazas naturales (sismicidad, volcanismo, eventos hidrometeorológicos) se materializan intensamente, pueden desencadenar una reacción de disparos de otras amenazas asociadas (efectos, impactos, daños, pérdidas) o derivadas (Figura 5). Más adelante se presentarán algunos ejemplos de estos tipos de funciones y curvas, cuando se analice la exposición a la amenaza sísmica de los puentes y de la influencia del calentamiento global antropogénico. Por tanto, se debe considerar que las amenazas y las vulnerabilidades pueden encadenarse en secuencias y escalonamientos, frecuentemente incrementales, cuando se materializa una serie de procesos vinculados que se disparan unos a otros, como por ejemplo en la ilustración representada en la Figura 5. A este tipo de escenarios se le denomina multiamenazas.

Figura 5. Secuencia de encadenamiento de amenazas y sus consecuencias respectivas. En la Guía no se ha incluido el análisis de la licuefacción sísmica de suelos, la caída de cenizas y lluvia ácida, vientos intensos, ni las inundaciones en las planicies.



No fue incluido en este documento ni en la aplicación del estudio piloto de la RN-32 el análisis de las amenazas de la licuefacción sísmica de los suelos granulares, la caída de cenizas volcánicas, la lluvia ácida, los vientos intensos, ni inundaciones en las planicies. Su inclusión en la Figura 5 se mantiene como recordatorio y para efectos de indicar que deberán ser tomados en cuenta en el futuro.

3.1.5 La gestión del riesgo

La Comunicación Nacional sobre la Adaptación, incorporada en la NDC de Costa Rica, evidencia la necesidad de disponer de información climática asociada a los procesos de la geodinámica externa y contar con capacidades institucionales y locales para impulsar procesos de evaluación del riesgo (amenaza, exposición, vulnerabilidad) en la infraestructura existente o nueva, para formular y proponer la realización de acciones para orientar el proceso de toma de decisiones vinculadas al desarrollo sostenible e inspiradas en la gestión del riesgo. Los insumos para el análisis del riesgo deben ser accesibles para actores con perfiles diferentes (e.g., gobierno central y gobiernos locales, instituciones descentralizadas y ciudadanía en general) y utilizados en forma oportuna, confiable y suficiente para apoyar los procesos de toma de decisiones y así aumentar la resiliencia ante los efectos de la variabilidad climática (VC) y del calentamiento global antropogénico (CGA). Su enfoque debe ser transdisciplinario.

Los procesos analíticos se inspiran en el Decreto N.° 42465-MOPT-MINAE-MIVAH, el cual propone orientar las acciones y fortalecer capacidades para evaluar las amenazas múltiples a las que se exponen los elementos vulnerables. En el caso de este proyecto, la prioridad se concentrará en el análisis de las amenazas de la geodinámica externa, influenciada por las características geológicas y geomorfológicas del terreno, la sismicidad, el clima y sus respectivas variables. Durante el transcurso de la consultoría, el equipo de consultores ofrece algunas aclaraciones, sugerencias y propuestas con respecto a las definiciones, términos y conceptos relacionados con los procesos de la geodinámica externa y la gestión del riesgo, según sea considerado oportuno y adecuado.

Desde la perspectiva del equipo consultor, la gestión del riesgo se fundamenta en los siguientes cinco pilares principales, cuyos componentes y significados pueden complementarse con el contenido de las definiciones incluidas en el Glosario (ver el Anexo 1):

Identificación y comunicación del riesgo:

- Conocimiento, percepción y cuantificación: Distribución espacio-temporal de la intensidad de amenazas y de la vulnerabilidad; evaluación de la incertidumbre de los cálculos.
- Transferencia de la información: Asistencia al proceso de toma de decisiones políticas, empresariales y comunales; educación y ciencia.

Reducción del riesgo:

- Acciones y medidas: i) prevención, ii) mitigación, iii) adaptación, para disminuir los factores que causan o intensifican los daños y las pérdidas.
- Medidas estructurales y/o no-estructurales, para disminuir la vulnerabilidad: ordenamiento territorial, gestión del ambiente y los recursos naturales, respeto a los códigos de diseño, construcción y operación de las obras civiles y de las viviendas, etc.

Financiamiento del riesgo:

- Instrumentos para reducir el impacto económico: Se diseñan ex ante, según los umbrales del riesgo “aceptado” vs. “aceptable”.
1. Retención: Manejo del presupuesto fiscal, fondos de emergencia y contingencia, reservas...
 2. Transferencia: Hacia otros actores y a plazos más largos (seguros, reaseguros, endeudamiento contingente, colocaciones en el mercado de valores, etc.).
 3. Cuantificación y planificación de la cobertura del riesgo residual y de los pasivos contingentes.

Gestión de las emergencias y los desastres:

- Instrumentos y acciones preparadas y articuladas ex ante a partir de los planes, protocolos y preparación para enfrentar las crisis:
4. Observación, vigilancia, alerta, alarma, advertencia, respuesta.
 5. Rehabilitación, continuidad operativa y funcional; recuperación sin reproducir los factores previos de la vulnerabilidad.
 6. Preparación para enfrentar la próxima crisis.

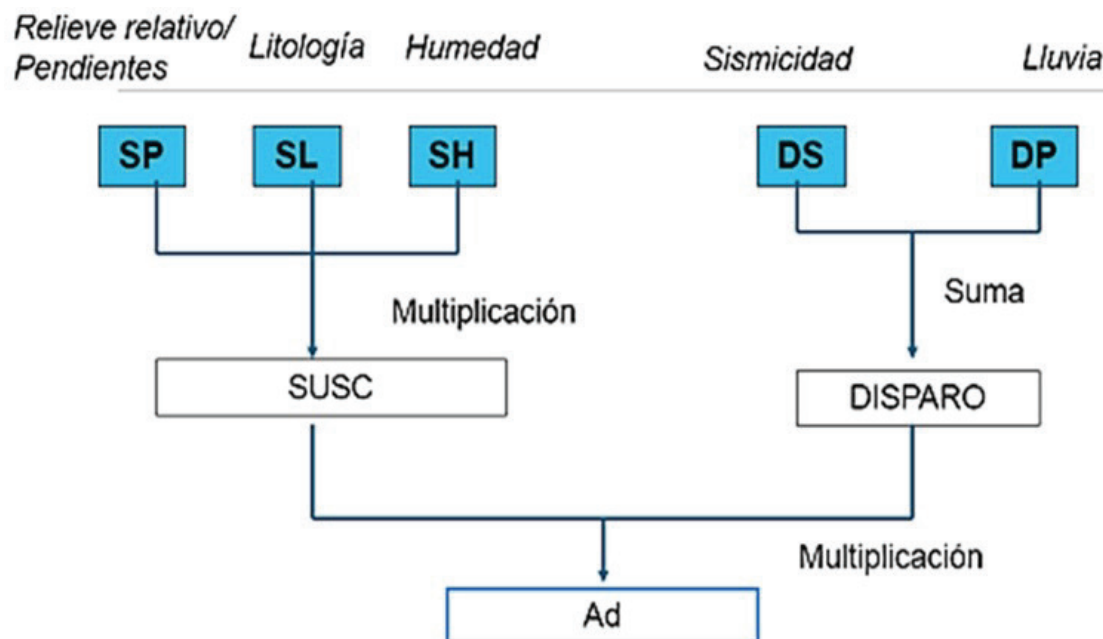
4. Análisis de la amenaza de inestabilidad de laderas

4.1 Principios y fundamentos

Existen diversas metodologías aplicadas en diferentes partes del mundo. Por su experiencia positiva en Costa Rica a lo largo de varias décadas, así como en otros países tropicales, a partir de su publicación internacional en 1994, la metodología aplicada para este análisis es la denominada Mora-Vahrson, que ha sido actualizada con el correr del tiempo, sobre todo con el uso de los sistemas de información geográfica (SIG) (1994; Mora, 2022; Mora, Saborío, Soto, en preparación), de características heurísticas. Esta metodología se aplica a los casos donde se requiere realizar la macrozonificación de los procesos de desprendimiento, deslizamiento y caída de bloques de rocas y suelos, en regiones extensas y donde no existe una base de datos geotécnicos suficientemente completa y densa, como para que la información sea representativa e interpolable en un corte o una ladera específica. Además, según la escala a la cual se desea representar el resultado, esta metodología permite generalizar y extrapolar los factores mediante el criterio espaciotemporal de la amenaza.

En la Figura 6 se ilustran los pasos metodológicos para procesar la información y combinar los indicadores morfodinámicos, mediante la conjugación de los parámetros y la aplicación de un SIG. Es importante agregar que este método utiliza y aplica algunos factores comunes con el análisis de las otras amenazas naturales, por lo que se evita la duplicación del esfuerzo y de los recursos analíticos: amenaza sísmica, balance hídrico, intensidad de las lluvias, bases cartográficas, modelos numéricos de elevación del terreno, información geológica y geotécnica, entre otros.

Figura 6. Procedimiento analítico para el análisis de la amenaza de la inestabilidad de laderas (Mora-Vahrson, 1993, 1994; Mora et al. 2013; Mora, 2022). SP: Susceptibilidad por la pendiente de la ladera; SL: Susceptibilidad litológica; SH: Susceptibilidad por la humedad prevalente en el terreno; DS: Disparo debido a la intensidad de un sismo; DP: Disparo debido a la intensidad de las lluvias; SUSC: Parámetro, compuesto, de la susceptibilidad intrínseca; Ad: Amenaza de la inestabilidad de laderas.



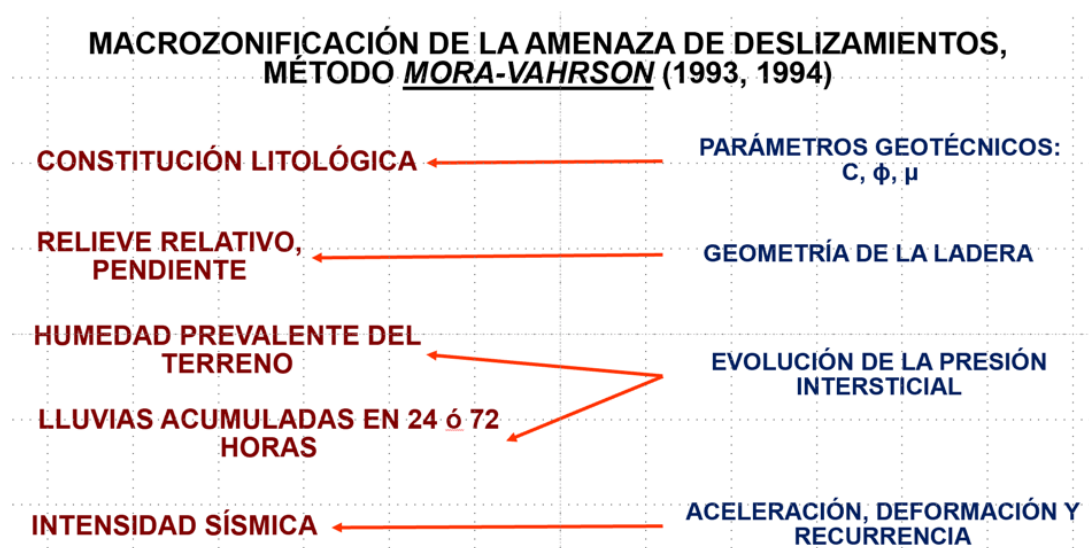
Los datos básicos recopilados para el análisis se fundamentan en las características topográficas y geológicas del terreno, las condiciones pluviométricas y la amenaza sísmica, utilizando un modelo numérico de elevación del terreno (MNT). El procedimiento requiere un conjunto integrado de datos y parámetros, con los cuales se determina la susceptibilidad intrínseca ($SUSC: Sp*SI*Sh$) y los disparadores ($DISP: Ds*Dp$). A partir de estos, se estima la amenaza “total” ($Ad = SUSC*DISP$) de la inestabilidad de las laderas, mediante un algoritmo que combina los valores y parámetros respectivos (Mora-Vahrson, 1994; Mora, 2022). Esta combinación toma en cuenta los parámetros de susceptibilidad del terreno: relieve (pendientes, Sp), litología (SI) y humedad prevalente (Sh), y los “disparadores externos”, dinámicos: intensidad pluviométrica (Dp) y sísmica (Ds). El procedimiento se realiza según los pasos descritos a continuación. Para el cálculo de Ad , se toma en cuenta (Figura 6) la distribución espacial de las propiedades intrínsecas del terreno, las condiciones de temporalidad-estacionalidad, recurrencia y celeridad de la materialización de los procesos de la geodinámica externa y de los sucesos detonadores (disparadores) hidrometeorológicos y sísmicos.

4.2 Susceptibilidad litológica

Este parámetro corresponde con la representación de las propiedades intrínsecas de cada tipo de litología (suelos, rocas), es decir, la composición geológica, el estado actual de los terrenos y los factores que las caracterizan como más o menos susceptibles a la inestabilidad de laderas, tanto cuando se encuentran en sus condiciones naturales y “estáticas” (i.e. laderas), como cuando han sido intervenidas por la actividad humana (i.e. cortes).

El procedimiento se realiza mediante la aplicación de la metodología para la macrozonificación de la amenaza de la inestabilidad de laderas (Mora-Vahrson, 1993b, 1994; modificada por Mora, Saborío y Soto, 2024, en proceso de edición). La inestabilidad de las laderas (e.g., deslizamientos, desprendimiento y caída de bloques rocosos), disparada por la sismicidad y las lluvias intensas, a veces combinadas, se fundamenta en la interpretación de las condiciones y susceptibilidad derivadas del relieve (i.e. pendientes de las laderas), la composición litológica del terreno y de la humedad prevalente del terreno (Mora, 2022). Estos elementos se caracterizan y cuantifican por medio de indicadores morfodinámicos que sustituyen los parámetros geotécnicos típicos con los que se analiza, de manera cuantitativa, la estabilidad (o inestabilidad) de una ladera (Figura 7).

Figura 7. Indicadores morfodinámicos, “proxies” sustitutivos de los parámetros geotécnicos, topográficos hidrodinámicos y sismológicos, utilizados para caracterizar la susceptibilidad, los disparadores dinámicos y la amenaza de la inestabilidad de laderas, según la metodología Mora-Vahrson (1994). C : cohesión, ϕ : ángulo de fricción interna, μ : humedad prevalente del terreno y su influencia sobre la presión hidrostática intersticial.



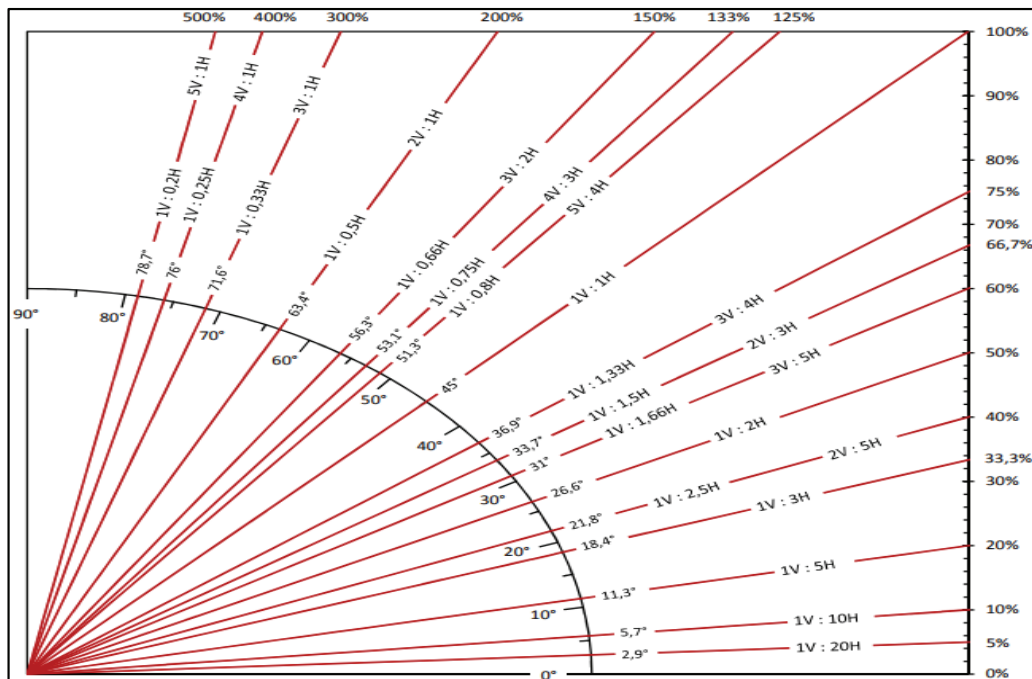
En este análisis se aplicarán los modelos y escenarios determinísticos o probabilísticos más pertinentes. Los pasos metodológicos, criterios, parámetros e información requeridos para analizar la amenaza de la inestabilidad de laderas se fundamentan en la metodología para la macrozonificación de la inestabilidad de laderas propuesta por Mora y Vahrson (1993, 1994), la cual ha sido empleada en diversos países de América Latina, el Caribe (Mora et al. 2013; Mora, 2013; Mora, 2022b) y otras regiones del mundo.

4.3 El factor de susceptibilidad derivado del relieve (pendientes, S_r)

La susceptibilidad a la inestabilidad de laderas también depende de la pendiente (medida a partir del ángulo con respecto a la referencia horizontal) del terreno, así sea en las laderas naturales como en los cortes artificiales. Con todos los demás factores constantes, el terreno será más susceptible a medida que su pendiente sea más empinada. Para pendientes iguales, el terreno será más susceptible si está compuesto por litologías con resistencia débil, fracturados, o si existe un grado de humedad prevalente elevado. Adicionalmente, intervienen los disparadores derivados de la intensidad de la sismicidad y la precipitación para definir el grado total de la amenaza a la inestabilidad de laderas. La combinación de estos factores se analizará más adelante. Por ahora, se analizará la manera cómo interviene el relieve del terreno, expresado en términos del ángulo de su pendiente, en la definición de su susceptibilidad. Para ello y, a partir del MNT, pueden estudiarse sus formas características, rangos de elevación sobre el nivel del mar, pendiente (en grados) y, luego, reclasificando esta última, la susceptibilidad a la inestabilidad de laderas correspondiente.

El factor de las pendientes se calcula mediante la relación entre la elevación máxima del terreno, menos la mínima, circunscritas dentro de una cuadrícula móvil con centro en un píxel rodeado por un número determinado de otros pixeles a su alrededor. El nomograma de la Figura 8 permite comparar las pendientes en porcentaje (%), con su equivalente en grados (°).

Figura 8. Relación entre los grados y porcentajes de las pendientes del terreno .
[Tomado de (<http://enriquemontalar.com/wp-content/uploads/Esquema-Talud-Grados-Pendiente-Porcentaje.pdf>).

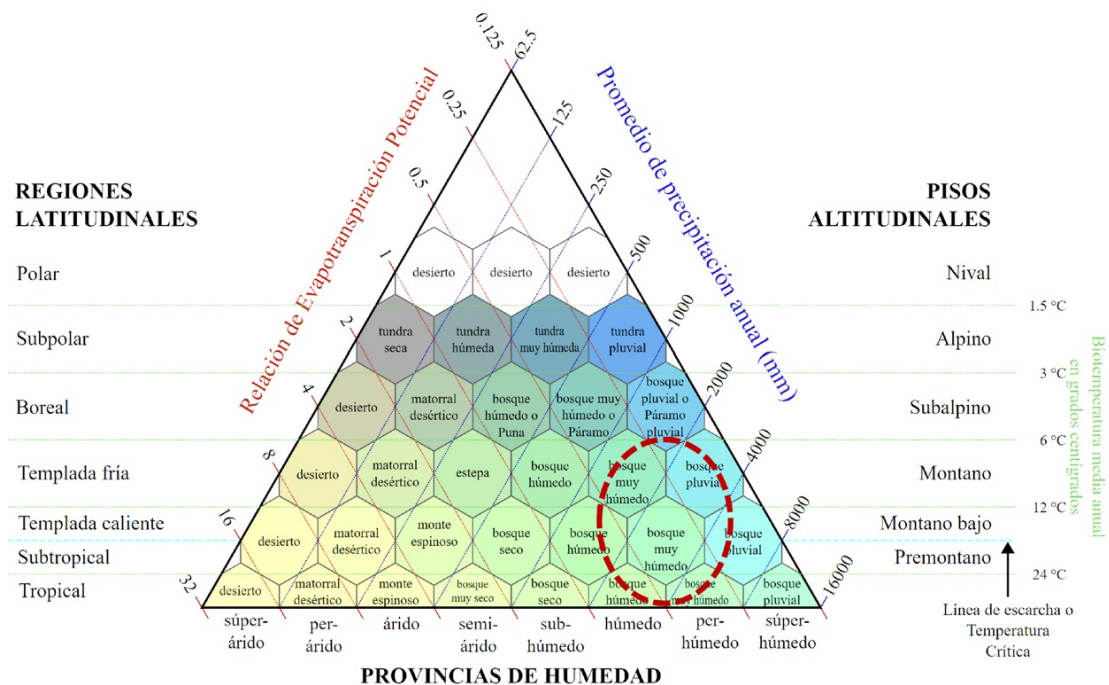


4.4 Aspectos climáticos y su influencia sobre la susceptibilidad a la inestabilidad de laderas

4.4.1 Las zonas de vida

El ecosistema y el clima de la región de Costa Rica pueden clasificarse como tropicales, por su posición geográfica, sus contrastes de temperaturas cálidas/templadas, el régimen de la amplitud biotérmica, las condiciones desde costera a premontana y montaña, elevaciones desde de 0 m s.n.m. hasta > 3000 m s.n.m. en las partes superiores de las cuencas y por su régimen pluviométrico, en casos como la parte de montaña de la RN-32, desde húmedo a perhúmedo (promedios de precipitación anual de 2000 hasta alrededor de 4000 mm/año, vistos en el diagrama de zonas de vida de Holdridge (1967) (Figura 9). Desde el punto de vista de la vegetación, se trata de una región con bosque húmedo a muy húmedo en la parte superior de las cuencas.

Figura 9. Clasificación de los ecosistemas de la región, aplicables por ejemplo al área que atraviesa el corredor vial de la RN-32 (elipse a trazos rojos), basada en los parámetros (latitud, humedad, precipitación y piso altitudinal) que definen las zonas de vida, según Holdridge (1967): Bosque húmedo a muy húmedo y secundariamente bosque pluvial.



4.4.2 La humedad prevalente en el terreno

Uno de los postulados de la metodología aplicada (Mora-Vahrson, 1994) indica que el terreno, por lo general y de manera cuasi-permanente, posee cierta cantidad de humedad en su interior acumulada a partir de las lluvias previas. Esta humedad genera la presión hidrostática, que, al incrementarse, podría conducir eventualmente hacia la inestabilidad de la ladera durante la lluvia intensa siguiente.

Esa humedad corresponde con la lluvia precipitada, menos la porción perdida por evapotranspiración y escorrentía superficial, cuyo

residuo se infiltra hacia el terreno. Este proceso constituye la base sobre la cual las lluvias intensas incrementarán la presencia del agua, provocan las variaciones de los niveles capilar y freático, y generan la evolución de las presiones intersticiales dentro del terreno.

La humedad previa o prevalente es entonces aquella que ya se encuentra presente dentro de los intersticios y discontinuidades de la estructura del suelo (poros) y de las rocas (fisuras, diaclasas, estratificación, foliación, arcilla). Es la que agrega susceptibilidad a la inestabilidad de las laderas que disparará la "próxima" lluvia intensa.

Sin embargo, la cantidad de humedad contenida por el terreno se deduce por medio de ensayos de campo. En un área extensa como la cubierta por el corredor vial de la RN-32 es complicado técnica y financieramente disponer de los datos medidos y cuantificados con una densidad suficiente como para que sean representativos y extrapolables. Para compensar esta situación, se utiliza un indicador aproximado, derivado del balance hídrico para cada localidad "tipo".

En tal caso, el procedimiento para estimar la cantidad aproximada de agua que queda retenida en la estructura del terreno toma en cuenta que, a partir de la precipitación total (PPT), una fracción de la lluvia es devuelta a la atmósfera por medio de la evapotranspiración (ET), otra porción escurre y transita por la superficie del terreno (ESC) y una tercera se infiltra hacia el interior del terreno (INF):

$$PPT = ET + ESC + INF$$

Este balance hídrico permite deducir que, para determinar la infiltración, se requiere despejar INF de la ecuación, de la manera siguiente:

$$INF = PPT - ET - ESC$$

La evapotranspiración potencial (ETP) puede derivarse de una relación empírica como la siguiente, obtenida luego del análisis de casi 200 estaciones en Centroamérica (Hancock & Hargreaves, 1997; en Mora y Vahrson, 1994):

$$ETP \text{ (mm/año)} = 1.721 - (0,177 \times \text{Elevación en m.s.n.m.})$$

Para valorar la influencia de la humedad prevalente en los procesos de inestabilidad de las laderas, se recurre a los datos mensuales de lluvia disponibles en las estaciones meteorológicas de la región.

4.5 Susceptibilidad intrínseca del terreno (SUSC; combinación de Sp, Sh y SI)

La combinación ponderada ($Sp \cdot Sh \cdot SI$) de los valores paramétricos de la influencia del relieve (Sp), la presencia y variaciones de la humedad prevalente (Sh) y la susceptibilidad litológica (SI), permite analizar las condiciones de la susceptibilidad intrínseca general (SUSC) de las laderas internas y aledañas al corredor vial. El concepto de "susceptibilidad intrínseca" se define como el conjunto de condiciones que hace que el terreno (relieve, litología y contenido de humedad), ya por sí solas pueden llegar a ser desfavorables y, por lo tanto, al recibir la influencia de un disparador (lluvias o sismos intensos) se pueden desencadenar los procesos de inestabilidad.

Este procedimiento se realiza por medio de la aplicación de un algoritmo que permite la superposición de las capas respectivas, dentro del SIG, a través de la aplicación del mecanismo asociado a la "calculadora espacial de ráster", píxel por píxel. El producto es un archivo final de salida, denominado Susceptibilidad o "susc". Posteriormente, los valores obtenidos se clasifican de acuerdo con los cinco rangos especificados, definidos en para calificar la variación, desde "muy baja" hasta "elevada".

4.6 Factor de disparo derivado de la intensidad de las lluvias (D_p)

Para analizar la incidencia de la intensidad de las lluvias en el proceso de inestabilidad de las laderas, se analizan las curvas de la intensidad, duración y frecuencia (IDF) y se calculan las lluvias máximas de 24 horas, para un período de recurrencia de $T_r = 100$ años, a lo largo del corredor vial y de sus áreas aledañas.

A partir de estos datos, se procede a interpolar los valores, para determinar su distribución espacial y de ahí, reclasificar los resultados para verificar su influencia sobre el factor de disparo pluviométrico D_p en toda la región analizada, con lo que se puede producir un mapa georreferenciado de isolíneas (isoyetas) de igual precipitación. La interpolación se puede realizar mediante el algoritmo Spline (ArcGis®), el cual permite mantener las tendencias de las isoyetas originales, con lo que se obtiene la distribución espacial continua de la lámina de lluvia acumulada en 24 horas, para el período de recurrencia $T_r=100$ años. Enseguida, para obtener el factor de disparo debido a las lluvias intensas, se toma como base la información de las tormentas máximas y pueden realizarse comparaciones para modelar otros valores máximos de intensidad de las lluvias, como, por ejemplo, los correspondientes con las lluvias 48 y 72 horas.

4.7 Determinación del disparador sísmico en la macrozonificación de la amenaza de la inestabilidad de laderas

La amenaza sísmica se toma en cuenta en términos de la aceleración pico del terreno (PGA) y/o la pseudo-aceleración (S_a) para un período estructural $T_e = 0,15$ s, de acuerdo con métodos apropiados y según la información disponible. La estimación del disparo derivado de la amenaza sísmica abarca los aspectos siguientes:

1. Evaluación probabilística de la amenaza sísmica en roca, asociada a la ubicación respectiva del corredor vial, tomando en cuenta las posibles fuentes generadoras de sismos que pueden afectar el área estudiada.
2. Selección de las funciones de atenuación con mejor predicción del movimiento para el área, considerando períodos de recurrencia, por ejemplo, de 475 o más años.
3. Evaluación determinística de la amenaza sísmica en roca, mediante la simulación de eventos discretos posibles para la región.
4. Determinación de los efectos de amplificación local, mediante una metodología apta para regiones montañosas (e.g. AASHTO, 2020), a fin de considerar las amplificaciones correspondientes.

Una vez recopilada la información general, se realiza una corroboración con el marco geológico, para tomar en cuenta la reacción de los tipos de litología, así como la presencia de fallas tectónicas, sectores fracturados, etc. A partir de toda la información recopilada, se realiza una reclasificación de cada sitio con base en su geología.

Por lo general, no es posible determinar el disparador sísmico contando simplemente las veces en que se han excedido algunos valores determinados de intensidad en un sitio, pues rara vez se dispone de un catálogo completo con las aceleraciones registradas. Entonces, es necesario calcular la amenaza sísmica bajo un enfoque probabilístico que involucre procesos estadísticos que permitan cuantificar y considerar las incertidumbres respectivas. Para ello, se evalúa primero la tasa de actividad sísmica en las fuentes sismogénicas regionales y locales con diagramas de magnitud-frecuencia y después se integran las aceleraciones que se producirían en el sitio, según la frecuencia de un evento con magnitud específica M_w , a la distancia R .

Las fuentes utilizadas, en el estudio, deben identificarse a partir del conocimiento del marco tectónico del país, la historia instrumental de los sismos registrados en el pasado y la zonificación propuesta en estudios previos. Una vez determinada la tasa de actividad de cada una de esas fuentes, es necesario evaluar los efectos, en términos de intensidad (e.g., aceleración, velocidad,

desplazamiento). Para ello, se requiere saber con qué intensidad se materializaría, en el sitio en cuestión, la i -ésima fuente, con un temblor de magnitud determinada. A las relaciones entre la magnitud, posición relativa fuente-sitio e intensidad, se les conoce como el modelo de atenuación (o GMPEs por sus siglas en inglés). Existen varias maneras para cuantificar la posición relativa fuente-sitio: distancia focal (R_f), distancia epicentral (R_{epi}), distancia Joyner & Boore (R_{jb}) y distancia a la ruptura (R_{rup}), u otras ecuaciones de atenuación definidas por programas específicos para el cálculo de la amenaza sísmica en un área, dependiendo de su entorno geotectónico. De acuerdo con los objetivos del proyecto en cuestión, pueden escogerse las que se consideren como más apropiadas. Para la selección de los epicentros correspondientes, se establece que cada escenario tenga su epicentro en las coordenadas más críticas para la vía y su posición crítica, con la máxima exposición posible para la inestabilidad de laderas.

4.7.1 Influencia del relieve, la litología y la presencia de fallas tectónicas en el disparador sísmico

A través de información pública disponible, es posible obtener el MNT, con una escala y resolución suficientes, para apreciar los efectos de amplificación topográfica correspondientes, por lo general en las áreas cercanas de las crestas de las colinas y montañas. En el caso de la influencia de la litología, esta se califica según su clasificación y el tipo de terreno, de acuerdo con lo indicado en el Código Sísmico de Costa Rica, así como con parámetros “proxies”, como el V_{s30} . Para tomar en cuenta la presencia y análisis de las fallas tectónicas, debe analizarse la información geológica disponible. Los datos deben incluir las estructuras observadas en el terreno, así como las documentadas por la Red Sismológica Nacional y fuentes bibliográficas confiables o nueva investigación local, anotando las que se encuentran sobre o cerca del trazo del corredor vial. Posteriormente, se revisa, en el catálogo de registros sísmicos, si entre los eventos históricos sucedidos en la región, pudiese verificarse si alguna de esas fallas ha tenido actividad sísmica reciente (neotectónica). Entonces, se procede a analizar esta información para correlacionarla con dos aspectos importantes:

- En el caso de que esas fallas hayan debilitado el terreno por medio de fracturación (reducción de la resistencia al corte), alteración hidrotermal (arcillas), presencia de aguas subterráneas, etc.
- Si pudiese presentarse algún proceso de liberación preferencial de la energía sísmica (directividad de ondas, etc.).

4.7.2 Estimación de los efectos del sitio

Se entiende, por efectos de sitio, a las modificaciones que sufren las ondas sísmicas cuando atraviesan depósitos blandos en el sitio analizado. Para estimar las modificaciones causadas al espectro de ondas sísmicas, se realiza una clasificación del terreno, en función de la información disponible y de las observaciones de campo. De manera indirecta puede estimarse, aproximadamente, la velocidad promedio de la onda de corte a una profundidad de 30 m (V_{s30} ; USGS, 2023), el cual es un parámetro aceptado en la práctica como indicador, correlacionable con las amplificaciones en el sitio.

Los valores puntuales obtenidos son útiles para estimar el comportamiento del corredor vial (1 km de ancho), utilizando información disponible en el Servicio Geológico de Estados Unidos. Estos mapas se basan en una estimación de la V_{s30} derivada de un algoritmo que utiliza las pendientes topográficas (Allen & Wald, 2007). Una vez estimadas las velocidades de la onda cortante, se aplica la metodología para la estimación de las amplificaciones por efectos de sitio, asociada al diseño de puentes según la normativa estadounidense (AASHTO, 2020; “método AASHTO”).

Las consideraciones geológicas son el fundamento de la clasificación del sitio, a través de la correlación entre la V_{s30} y las propiedades del suelo y de la roca (Tabla 4). Cuando no se dispone de datos específicos, se correlacionan las unidades geológicas con los valores estadísticos de V_{s30} de los sitios con unidades geológicas similares (Wair et al., 2012), sobre todo cuando se observa que los cortes fueron excavados en tipos diferentes de rocas y suelos. La dureza, susceptibilidad a la erosión de la roca, el nivel de fracturación y el espaciamiento entre fracturas contribuyen en el aumento o reducción de la V_{s30} .

Tabla 4. Factores característicos de la roca que influyen en la velocidad de onda cortante VS30 (NEHRP, 2012)

Parámetro en la roca	Influencia sobre V_{S30}
Espaciamiento de la fractura	Proporcional al espaciamiento fractura
Densidad de la fracturación	Inversamente proporcional a la densidad de la fracturación
Dureza	Proporcional a la dureza
Susceptibilidad a la erosión	Inversamente proporcional a la susceptibilidad a la erosión

Considerando los parámetros anteriormente descritos, la asignación de la VS30 se realizó de acuerdo con los rangos de velocidades establecidos en la clasificación de los tipos de suelos, según el método AASHTO (AASHTO, 2020). Esta los divide en seis categorías, presentadas en la Tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de suelos de acuerdo con el método AASHTO (AASHTO, 2020)

Clasificación	Tipo de suelo	V_{S30} (m/s)
A	Roca sana	> 1500
B	Roca	760 – 1500
C	Roca blanda o suelo muy denso	360 – 760
D	Suelo rígido	180 – 360
E	Suelo blando	< 180
F	Suelos especiales que requieren evaluación específica en el sitio	-

Sin embargo y debido a la ambigüedad que existe en los rangos de velocidad que proporciona la AASHTO (AASHTO, 2020), se propusieron subclases, con el fin de asignar un valor de VS30 más preciso en cada corte, según las propiedades y características particulares de cada tipo de roca y suelos; la subclasificación se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Subclasificación de la VS30 propuesta.

Clasificación	Tipo de suelo	V_{S30} (m/s)
A	Roca sana	> 1500
B-1	Roca	1500
B-2		1315
B-3		1130
B-4		945
B-5		760

Clasificación	Tipo de suelo	V_{s30} (m/s)
C-1	Roca blanda o suelo muy denso	760
C-2		660
C-3		560
C-4		460
C-5		360
D-1	Suelo rígido	360
D-2		270
D-3		180
D-1	Suelo rígido	360
D-2		270
D-3		180
E-1	Suelo blando	180
E-2		150
E-3		120
F	Suelos especiales	N/A

4.8 Determinación de la amenaza total a la inestabilidad de laderas (Ad)

La amenaza total a la inestabilidad de laderas (Ad) se obtiene mediante la combinación de los factores de la susceptibilidad intrínseca ($Susc$) y de disparo ($Disp$):

$$Ad = Susc * Disp$$

... en donde Ad es la amenaza "total" de la inestabilidad de laderas, " $Susc$ " representa la susceptibilidad intrínseca –i.e. natural– de los materiales que componen la ladera y " $Disp$ " indica la intervención de los factores externos dinámicos de disparo (detonadores transitorios). Tomando esto en cuenta, la relación puede expresarse como

$$Ad = (Sp * SI * Sh) * (Ds + Dp)$$

... en donde " $Susc$ " se compone de los indicadores de la susceptibilidad derivada del relieve (pendiente, Sp), la composición litológica (SI) y la humedad prevalente en el terreno (Sh). En el factor " $Disp$ " intervienen, agregados o por separado, la sismicidad (Ds) y las lluvias intensas (Dp). Cuando se desea analizar la intervención exclusiva de las lluvias intensas (Ap), sin sismo, la relación se expresa de la siguiente manera:

$$Ap = (Sp * SI * Sh) * Dp$$

... mientras que si lo que se pretende es analizar solamente la influencia de la sismicidad (As), la relación sería:

$$As = (Sp * SI * Sh) * Ds$$

Una vez determinados los factores e indicadores correspondientes y antes descritos, así como su distribución espacial y temporal, puede determinarse la amenaza de la inestabilidad de laderas, mediante la combinación de los valores paramétricos de la susceptibilidad litológica (SI), del relieve (Sp) y la humedad prevalente (Sh), y de los disparadores de la intensidad sísmica (Ds) y de las lluvias (Dp). Las Figuras 10 y 11 ilustran el proceso de combinación de las capas mediante el SIG, aplicando la “calculadora espacial”, píxel por píxel.

Figura 10. Procedimiento analítico, para obtener el conjunto integrado de los parámetros de la susceptibilidad intrínseca (SUSC: $Sp*SI*Sh$) y los disparadores (DISP: $Ds*Dp$), y estimar la amenaza “total” ($Ad=SUSC*DISP$) de la inestabilidad de laderas. *: Algoritmos de combinación de los valores de los parámetros respectivos (Mora-Vahrson, 1994; Mora, 2022).

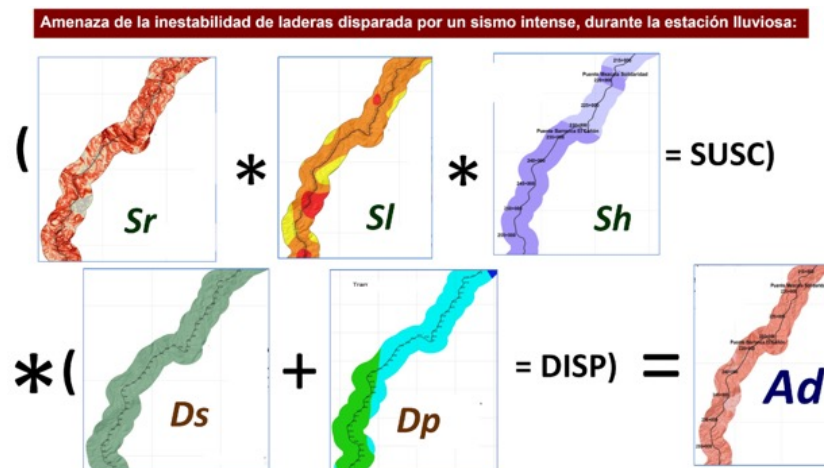
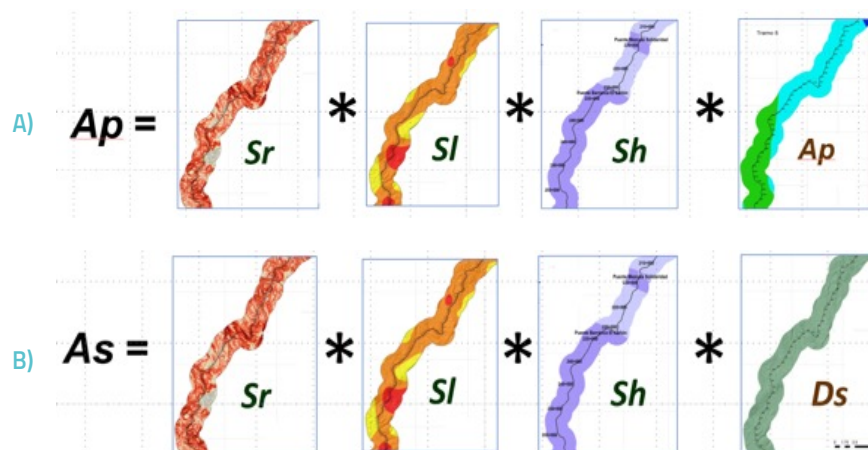


Figura 11. Determinación de la amenaza de la inestabilidad de laderas: a) En el escenario en que se dispara (Ap) por medio de las lluvias intensas, sin que se produzca un sismo en ese momento. b) En el escenario en que se dispara (As) por medio de un sismo intenso durante la estación seca o sin una lluvia reciente.



Susceptibilidad; Sr : Derivada del relieve (pendiente de las laderas); SI : Litología; Sh : Humedad prevalente en el terreno; $SUSC$: Parámetro de susceptibilidad compuesto. Disparo; Ds : Sísmico; Dp : Lluvias intensas; $DISP$: Parámetro de disparo compuesto; Ad : Amenaza total de la inestabilidad de laderas; Ap : Amenaza de la inestabilidad de laderas disparada por precipitación intensa, sin sismo; As : Amenaza de la inestabilidad de laderas disparada por la sismicidad intensa, sin lluvia.

Este análisis se aplicó en el tramo del sector montañoso de la RN-32 (Braulio Carrillo), el cual registra la mayor tasa de incidentes de inestabilidad de laderas y cierres consecuentes en los kilómetros 20+600 a 38+000, en el documento complementario a esta guía.

COSEVI, en la compilación de los datos de incidentes por inestabilidad de laderas y los cierres en la RN 32, en los períodos del 4 de marzo de 2022 al 20 de febrero del 2024, y del 10 de enero de 2008 al 15 de enero de 2021, de manera discontinua, dispone de 782 reportes de incidentes. De estos 581 (74,7 %) sucedieron entre los kilómetros 20+600 y 38+000. Los sitios de incidentes fueron registrados con coordenadas y graficados en los mapas producidos.

Además, para este tramo del corredor vial se cuenta con topografía LiDAR de calidad razonable, información geológica a una escala utilizable, observaciones complementarias de los consultores y datos disponibles de estaciones pluviográficas disponibles.

5. Amenaza de las avenidas fluviales (crecidas)

5.1 Introducción

El análisis del riesgo derivado de las avenidas fluviales (crecidas) en la infraestructura vial es un proceso crucial para garantizar la resiliencia y sostenibilidad de las inversiones en los sistemas de transporte. Las inundaciones pueden causar daños significativos a las carreteras, puentes y otras estructuras viales, lo cual resulta en interrupciones del tráfico, pérdidas económicas y, en casos extremos, hasta de pérdida de vidas humanas y de su calidad de vida.

Las avenidas fluviales se producen cuando aumenta el nivel del agua en un río, producto de eventos prolongados e intensos de precipitación. Cuando los caudales superan los bancos del cauce (i.e. lecho menor) y se desbordan hacia las planicies de inundación aledañas (i.e. lecho mayor), se producen las inundaciones.

Es importante señalar que las avenidas, como procesos fluviales, pueden interactuar de diversas maneras con la infraestructura vial. Por esta razón, es necesario contar con un conocimiento previo del contexto geomorfológico del sitio estudiado para definir dichas interacciones. En los tramos de montaña, las avenidas suelen caracterizarse por un flujo de alta velocidad y elevada capacidad erosiva. Por ello, la erosión y socavación son los procesos más importantes para considerar como amenaza para la infraestructura. En tramos de transición hacia el piedemonte, donde los ríos muestran formas de depositación, como barras y terrazas de grava, y donde los cauces suelen presentar patrones trenzados y brazos temporalmente inactivos, la migración de un cauce a otro, así como el movimiento del río dentro de su lecho mayor, predominan en la interacción del río con las estructuras. Finalmente, en tramos de llanura, la dinámica de migración lateral de los meandros y los desbordamientos desde el lecho menor, ocasionan la generación de inundaciones, las cuales tienen mayor relevancia espacial en las avenidas, sobre todo en aquellas de mayor período de recurrencia.

Se propone, para esta guía la aplicación de Hazus, una metodología estandarizada para modelar el riesgo, desarrollada por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos de América (FEMA, por sus siglas en inglés). Esta metodología permite la estimación de las pérdidas en la infraestructura, debido a las avenidas, además de anticipar las características de la respuesta para atender las emergencias asociadas con estos eventos. Además, facilita desarrollar planes para la recuperación y reconstrucción tras un desastre y mitigar las consecuencias posibles sobre la infraestructura (FEMA, 2022b). Cabe destacar que la propuesta metodológica cumple con los criterios básicos que se establecen en el Artículo 8 del Decreto N.º 42465-MOPT-MINAE-MIVAH “Lineamientos generales para la incorporación de las medidas de resiliencia en infraestructura pública”, ya que considera de forma explícita la identificación de amenazas, evaluación de la exposición, evaluación de la vulnerabilidad y estimación del riesgo”. La aplicación de la metodología se realiza en cuatro pasos (Figura 12):

1. **Inventario de la infraestructura en el tramo de análisis.** En este paso, se identifica y mapea la infraestructura vial crítica expuesta a la amenaza de las avenidas fluviales. Una vez determinado el tramo, el inventario de la infraestructura se basará en los planos de la carretera y el levantamiento, en sitio, de los elementos críticos. La metodología propuesta se enfoca en dos tipos específicos de infraestructura: puentes y los tramos aledaños de la carretera.
2. **Cuantificación y cartografía de la amenaza de las avenidas fluviales.** La variable hidrológica principal, para el análisis de las inundaciones será el caudal pico de las crecientes, asociado a los períodos de recurrencia determinados para cada curso fluvial mayor identificado. La inclusión de la variable del CGA se puede realizar a partir de este punto, bajo la hipótesis del incremento en la frecuencia, dada la magnitud determinada de un caudal específico. La determinación de los caudales pico de las crecientes se basa en el análisis probabilístico de los registros históricos disponibles en las estaciones de los ríos estudiados. La metodología se aplica mediante la estimación de los niveles de inundación y la cartografía de las áreas inundables para diferentes períodos de recurrencia y, eventualmente, considerando los escenarios plausibles del CC. El nivel de detalle de la cartografía depende de la información topográfica disponible para la modelización hidráulica, la cual se realiza según la información básica disponible, mediante el software HEC-RAS o IBER. Ambos de uso libre y que no requieren licencias.
3. **Estimación del daño físico a la infraestructura.** Para este estudio, la cuantificación del daño físico se enfoca en los puentes y tramos adyacentes de la carretera, expuestos a la amenaza de la avenida fluvial. La estimación del daño físico se realiza mediante la valoración del nivel de exposición y del resto de los aspectos que definen la vulnerabilidad. La exposición a la amenaza se cuantifica mediante dos criterios: i) el que el puente o tramo de la carretera quede o no bajo el impacto directo de la avenida y, ii) mediante el cálculo de un índice de socavación potencial para los pilares y bastiones de los puentes. El resto de la vulnerabilidad se evalúa en función de la tipología del puente, las condiciones físicas de los bastiones y pilares y de su estado actual, en cuanto a la posibilidad de socavación. Además, se pueden integrar elementos asociados al cálculo de la profundidad de socavación, comparándola con el nivel de las fundaciones. Esto último no es propio de la metodología Hazus, por lo que se recurre, hasta donde la información disponible lo permita, a la metodología de evaluación de la amenaza de la socavación propuesta por la Asociación de Investigación e Información de la Industria de la Construcción (CIRIA, por sus siglas en inglés), la cual se presentará más adelante. El cálculo del daño físico culmina con la estimación de una probabilidad de falla de la estructura.
4. **Estimación de las pérdidas económicas directas.** El último paso de la metodología permite llegar a una estimación del costo de las pérdidas. La estimación de las pérdidas económicas directas se realiza mediante la estimación del costo de reparación o reposición de la estructura que falla. Este costo se multiplica por la probabilidad de falla de la estructura, para estimar la pérdida económica directa. Es posible, además, incluir en la metodología una estimación de pérdidas económicas indirectas.

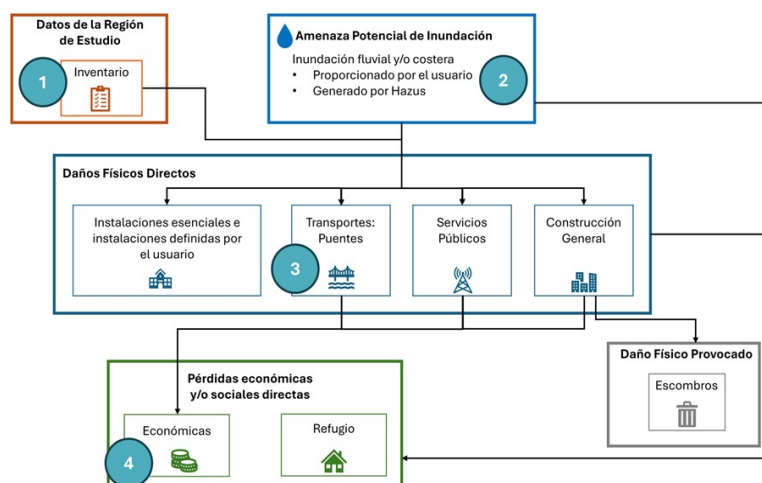
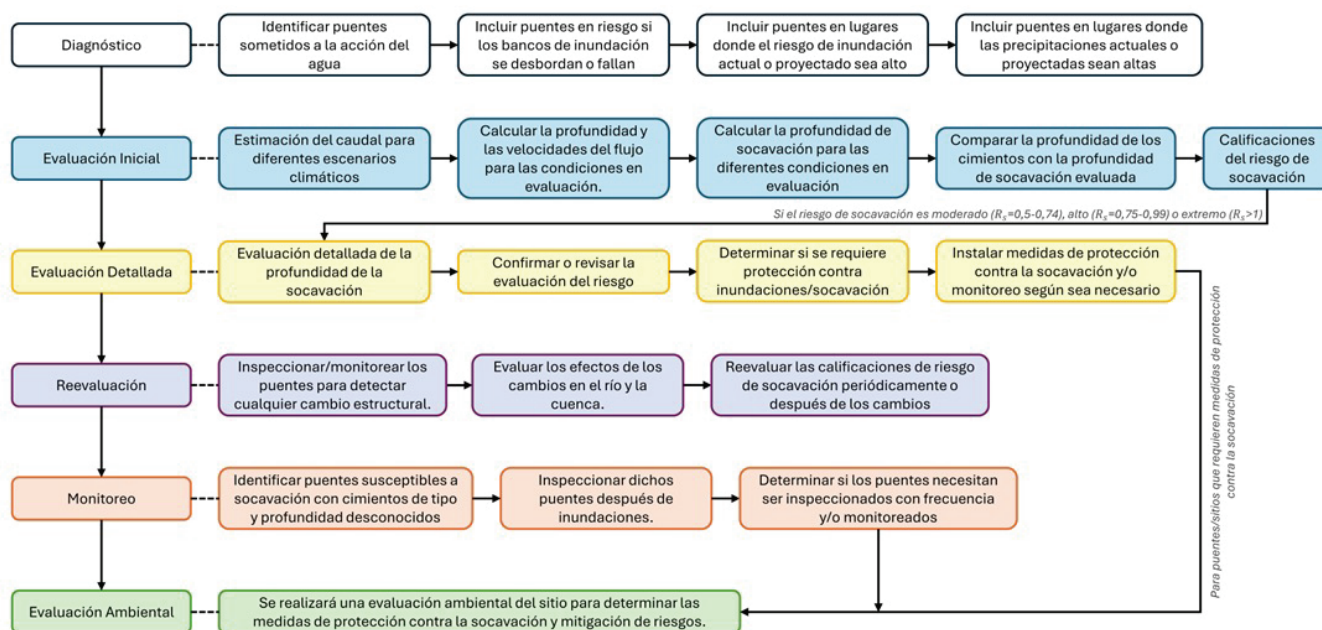


Figura 12. Esquema metodológico para evaluar la amenaza de avenidas fluviales, según Hazus (FEMA, 2022): 1. Inventario de la infraestructura en el tramo de análisis. 2. Cuantificación y cartografía de la amenaza de avenida fluvial. 3. Estimación del daño físico a la infraestructura (puentes y tramos de vía). 4. Estimación de las pérdidas económicas directas.

Tal y como se mencionó anteriormente, uno de los elementos más relevantes en la valoración del daño físico a la infraestructura vial, producto de las avenidas fluviales, es la socavación de los puentes. Debido a su importancia, se propone complementar la metodología Hazus con la propuesta de CIRIA, para cuantificar el riesgo mediante la definición de una calificación para cada puente que deba ser analizado.

La aplicación de la metodología CIRIA se muestra en la Figura 13, adaptada por Sasidharan et al. (2023). Esta propuesta se basa en la definición de niveles diferentes, de los cuales se considerarán, los dos primeros en esta guía. El primer nivel, de selección ("screening"), se basa en la identificación de todos los puentes del tramo y la selección de aquellos en donde la precipitación es intensa y la amenaza de avenidas es elevada. Esta selección se llevará a cabo simultáneamente a los dos primeros pasos de la metodología Hazus, con la misma base de información. El segundo nivel, la evaluación inicial ("initial assessment"), requiere de la estimación cuantitativa de los caudales bajo distintos escenarios climáticos, las profundidades y las velocidades del flujo, profundidades potenciales de socavación y comparación con los niveles de las fundaciones de los bastiones y pilares, para luego calcular la amenaza de la socavación. Esta calificación se asociará al índice de socavación potencial de Hazus y permitirá una valoración más robusta del proceso.

Figura 13. Esquema metodológico para evaluar la amenaza de la socavación, según CIRIA (Sasidharan et al., 2023)



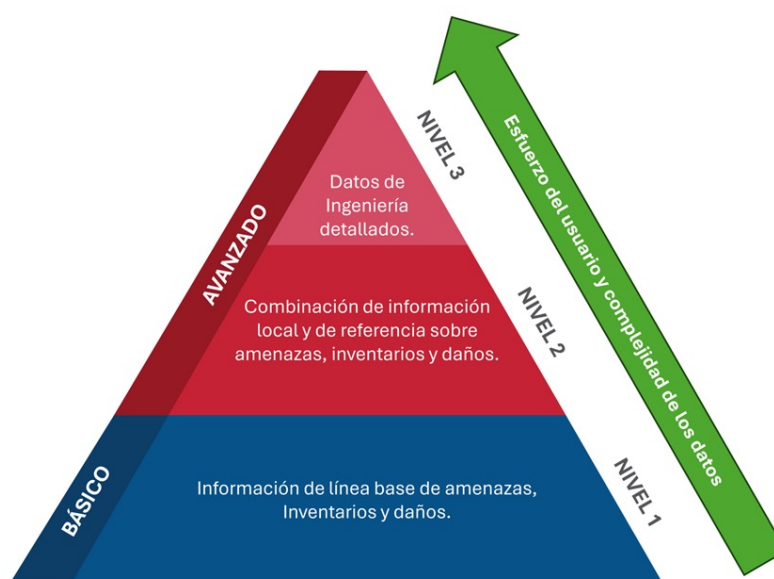
5.2 Inventario de la infraestructura

La metodología Hazus, tal y como ha sido desarrollada para los Estados Unidos, dispone de bases de datos muy completas que permiten realizar mediante una interfaz con SIG la selección de un área de interés y la identificación de la infraestructura presente dentro de dicha área. De acuerdo con FEMA (2022), las categorías de la infraestructura son las siguientes:

- Edificaciones generales
- Edificaciones esenciales
- Sistemas de transporte
- Sistemas de servicios públicos

Las bases de datos ubican los diferentes elementos de la infraestructura en el área geográfica de análisis, además de datos específicos, como por ejemplo el valor de la propiedad, costos de reparación, datos socioeconómicos y censales, entre otros. Estas bases de datos integradas permiten conducir un análisis básico, también definido por la metodología Hazus, como de “nivel 1”. Para realizar análisis avanzados, la base de datos predefinida debe complementarse con la información local que proveen las autoridades, e incluso los datos ingenieriles específicos, como los planos de obras y los costos detallados de construcción. La relación entre los niveles de análisis y el detalle del inventario de la infraestructura se puede apreciar en la Figura 14.

Figura 14. Niveles de análisis, de acuerdo con la metodología Hazus (FEMA, 2022)



Para la aplicación de la metodología Hazus fuera del contexto estadounidense, es necesario recurrir a las bases de datos que existen en el país. En el caso de Costa Rica, la información geográfica existe, aunque no necesariamente integrada en un solo sistema unificado y tampoco con un nivel adecuado de homogeneidad en cuanto a su actualización, escala y detalle. Esta situación conlleva el hecho de que un primer paso para la aplicación de la metodología sea la integración de la información disponible.

En el caso concreto de los sistemas de transporte e infraestructura vial, es imprescindible contar con un mapa base de la red vial (carreteras) a una escala adecuada para el análisis. Escalas como 1:50.000, 1:25.000 o 1:10.000 suelen ser suficientes para este propósito. En cuanto a la amenaza de avenidas fluviales, es necesario contar con un mapa de ríos cuya escala sea compatible con la del mapa vial, además de estar suficientemente actualizado para reflejar los cambios morfológicos de los cauces. Este mapa debe ser lo suficientemente detallado como para permitir la corroboración de la ubicación de los puentes.

A partir de esto es necesario generar las tablas de atributos para las bases geospaciales, con el fin de completar los elementos requeridos para un inventario completo. En el caso de las carreteras y puentes, al menos estos atributos deberían incluir el año de construcción (y/o ampliación), número de carriles y vanos (en el caso de puentes), tipología constructiva y materiales, según la estandarización definida por Hazus (FEMA, 2022).

5.3 Amenaza de las avenidas fluviales

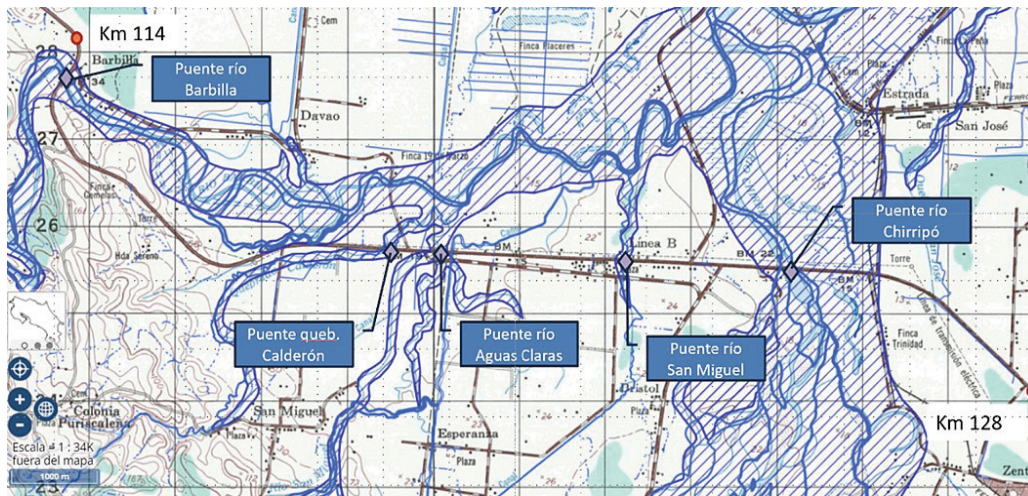
La amenaza de las avenidas fluviales se puede definir en términos de la probabilidad de que una cierta magnitud, de crecida, dañina, pueda ser excedida durante un año cualquiera. También podría darse una definición determinística de la amenaza, refiriéndose a

eventos pasados, históricos o recientes que hayan sido registrados y que hayan causado impactos. La definición probabilística es la que se utilizará en esta guía metodológica.

La magnitud de la inundación se puede expresar mediante diferentes parámetros físicos: energía cinética, velocidad del flujo, profundidad de lámina de la avenida (tirante), o algún otro parámetro hidráulico que permita caracterizarla específicamente.

Si bien esta guía pretende ser de aplicación y uso general, para su desarrollo se utilizó el caso de estudio de la RN-32, en la región Caribe de Costa Rica. Debe tomarse en cuenta que los procesos de inundación se desarrollan en las llanuras aluviales, al norte y noreste del piedemonte de la cordillera Volcánica Central (volcanes Irazú y Turrialba) y de las estribaciones de la cordillera de Talamanca, en los cantones de Siquirres, Matina y Limón. Los ríos principales que cruzan la carretera (Sucio, Toro Amarillo, Reventazón, Pacuare, Barbilla, Chirripó, Blanco, etc.) tienen áreas inundables aledañas, usualmente hacia al norte del corredor vial. En el cantón de Matina, la carretera atraviesa áreas expuestas a inundaciones frecuentes. Dada esta condición –para el análisis del riesgo asociado a las inundaciones– solo se analiza el tramo con mayor incidencia de las avenidas, pero no de las inundaciones, entre los km 114+00 y 128+000, es decir, entre los ríos Barbilla y Chirripó, tal y como se muestra en la Figura 15.

Figura 15. Tramo de la RN-32 donde se analiza la amenaza de las avenidas fluviales.
En azul se muestran las áreas donde frecuentemente suceden desbordamientos del lecho menor hacia el lecho mayor y las llanuras y, por lo tanto, se producen inundaciones (CNE).



El tramo escogido para el análisis de la amenaza de avenidas fue seleccionado a partir de la aplicación de criterios morfológicos fluviales de los ríos que cruzan la RN-32 y del análisis de la información disponible en las bases de datos cartográficas públicas, particularmente los mapas con las áreas de inundación, disponibles en la CNE y el SNIT. Asimismo, se consultó información histórica de incidentes de inundación elaborados por la CNE y los estudios sobre la condición de los puentes de la RN-32, elaborados por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME-UCR). La integración de toda esta información junto con el criterio de experto, desde el punto de vista de la morfología y la dinámica fluvial, llevó a la selección de este tramo.

La metodología Hazus para los Estados Unidos dispone de bases de datos integradas en SIG, usualmente en la forma de mallas de datos (tipo “ráster”), con la extensión y profundidad de inundación. Basta, en ese caso, con definir el área de interés y obtener la información sobre los elementos vulnerables expuestos a amenaza de avenidas fluviales, en un sitio determinado. Cuando no se dispone de este recurso, la cuantificación de la amenaza se lleva a cabo mediante la aplicación de metodologías de modelización hidrológica e hidráulica. Este documento no pretende convertirse en una referencia técnica específica y única de estas dos disciplinas, por lo que se incluirán a continuación las consideraciones y criterios más relevantes.

5.3.1 Aspectos hidrológicos

La variable hidrológica para el análisis de las avenidas es el caudal pico de las crecientes, asociado con sus períodos de recurrencia -o probabilidades de excedencia anual- determinados. Los valores de dicha variable deben obtenerse para cada curso fluvial identificado dentro del tramo correspondiente.

Existen diversas metodologías para obtener las relaciones del caudal pico y el período de recurrencia en un río, cuya elección depende de la información básica disponible. Si se dispone de registros del caudal instantáneo en el río y estos abarcan suficientemente largo (20-30 años), es posible llevar a cabo un análisis de frecuencias para realizar los ajustes probabilísticos de la variable. El objetivo de estos ajustes es asociar la magnitud del caudal pico con una probabilidad de excedencia. Esta metodología puede extenderse hacia sitios donde no exista una estación de medición de caudales, siempre que se encuentren aguas arriba o aguas abajo de una estación donde sí se cuenta con mediciones.

Cuando no se cuenta con mediciones de caudal en los ríos, es posible aplicar metodologías indirectas para estimar los caudales correspondientes a diferentes períodos de recurrencia. Una opción es el denominado método de crecientes índices, una técnica que permite estimar caudales máximos basada en la relación entre las características físicas de la cuenca y su respuesta hidrológica ante eventos de precipitación intensa. El proceso implica seleccionar la cuenca de referencia con datos de caudal conocidos y con características similares a las de la cuenca en cuestión; luego, se establece una relación entre el caudal máximo y el área de drenaje, pendiente y precipitación.

Otra metodología indirecta es la modelización precipitación-escorrentía, la cual busca representar, matemáticamente la relación entre la lluvia sobre una cuenca hidrográfica y el caudal resultante en su punto de control. Este enfoque utiliza modelos matemáticos que simulan los procesos hidrológicos, como por ejemplo la infiltración, evapotranspiración, almacenamiento superficial y subterráneo. Los insumos de estos modelos son los datos de precipitación y las características físicas de la cuenca, las cuales se ingresan al sistema, ya sea de forma agregada o distribuida. La lluvia se representa usualmente por su intensidad o su hietograma y se le asigna al evento un período de recurrencia determinado, el cual es heredado al hidrograma y caudal pico resultantes.

5.3.2 Aspectos hidráulicos

La determinación de la amenaza de las avenidas se realiza mediante el cálculo de la extensión del flujo, asociada a un caudal determinado y a un período de recurrencia definido. De esta forma, el resultado de los análisis hidrológicos (i.e. caudal pico) se usa como insumo para alimentar un modelo hidráulico, y que permita mapear y dar magnitud a la amenaza para un nivel de probabilidad dado. Las metodologías disponibles para este proceso son múltiples y están establecidas. Como parte de esta guía metodológica, se considera oportuno dar preponderancia a los modelos bidimensionales de flujo, ya que permiten simular de una manera más realista el flujo en cauces, sobre todo cuando se producen desbordamientos. Aun así, en ríos pequeños y encauzados, el uso de modelos unidimensionales es válido y puede proporcionar resultados adecuados sin la cantidad de información requerida por un modelo bidimensional.

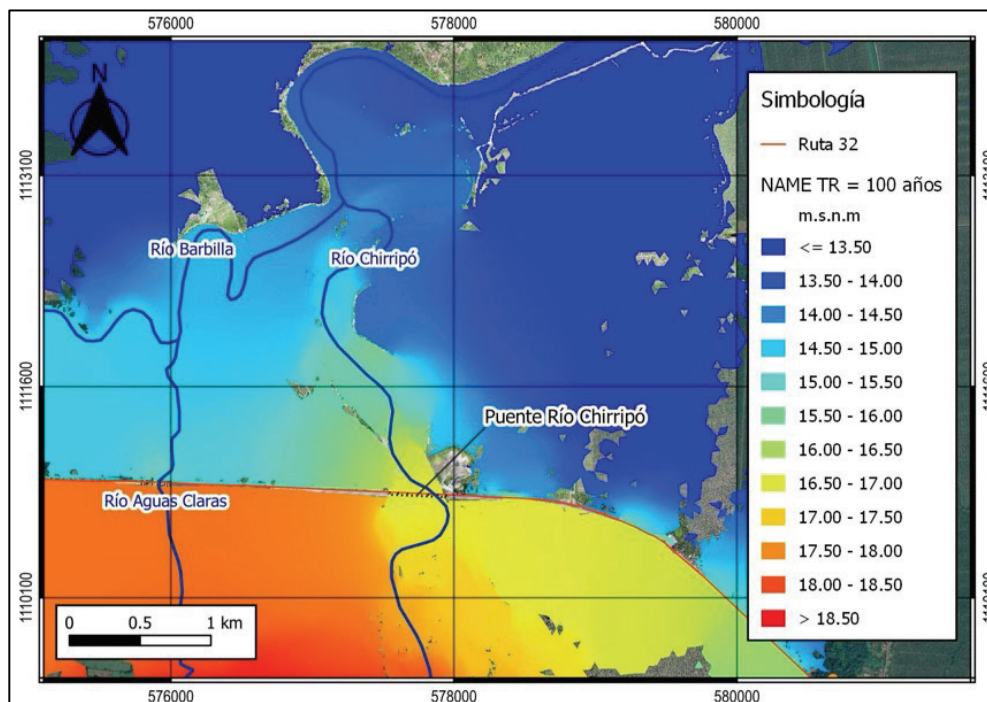
Si bien los modelos bidimensionales permiten simular hidrogramas, mediante la aplicación de métodos de cálculo hidráulicos, en régimen no permanente; para esta guía se plantea el caso de calcular las condiciones hidráulicas para el caudal pico, como representativas de lo que sucede para un evento con una probabilidad de excedencia determinada.

La aplicación de modelos hidráulicos para estudiar el comportamiento de los ríos requiere de mucha información de sitio. El insumo trascendental es la topografía y batimetría del cauce, información que muchas veces no está disponible en las bases de datos, pues se requiere de levantamientos específicos, los cuales no siempre son compatibles -por detalle y costos- con la evaluación preliminar del riesgo. Además, es necesario contar con estimaciones de los parámetros hidráulicos del cauce, como por ejemplo

la rugosidad, usualmente representada mediante el coeficiente “n” de Manning. Para esto es necesario inspeccionar el cauce, analizar las fotografías aéreas o imágenes satelitales y aplicar técnicas, muchas veces con criterio experto, para la asignación adecuada de los parámetros. Si no se cuenta con registros de niveles y caudales que permitan calibrar el modelo hidráulico, el criterio de experto y la revisión de eventos pasados se vuelven cruciales para contar con una representación racional de la situación hidráulica del río en cuestión.

El resultado final de la modelización hidráulica se presenta en forma de mapas que muestran las variables resultantes del cálculo: niveles del agua (Figura 16), tirantes máximos y velocidades del flujo, entre otras.

Figura 16. Ejemplo que muestra los resultados de los niveles de agua (sobre el nivel del mar) para una crecida de 100 años de período de recurrencia, en un modelo hidráulico bidimensional del río Chirripó.



5.4 Análisis de la vulnerabilidad

5.4.1 Generalidades

El siguiente paso metodológico de Hazus consiste en la estimación del nivel de daño físico directo y potencial a la infraestructura, producto de la amenaza analizada. En el caso de inundaciones fluviales, Hazus comienza por determinar el grado de exposición de la infraestructura ante la amenaza. En su versión actual, con Hazus es posible analizar solamente las estructuras de puentes, aunque podría ser ampliado, con insumos del usuario, para evaluar los tramos adyacentes de las carreteras que puedan ser cubiertas por el agua. Para el caso de los puentes, la exposición a la amenaza se cuantifica mediante dos criterios: i) si el puente o tramo de la carretera queda o no cubierto por la inundación y, ii) el cálculo de un índice de socavación potencial para los pilares y bastiones de los puentes. Para esto último, se pueden agregar elementos asociados al cálculo de la profundidad de socavación, comparándola con el nivel de las fundaciones. Para ello se propone complementar la metodología Hazus con la metodología CIRIA, descrita anteriormente, que permite estimar la exposición a partir de estimaciones cuantitativas del potencial de socavación. La vulnerabilidad se evalúa según la tipología del puente, las condiciones físicas de los bastiones y pilares, así como su estado actual frente a la acción de socavación. El índice de socavación potencial se puede estimar de acuerdo con los siguientes detalles (Tabla 7):

Tabla 7. Descripciones para el Índice de Socavación según Hazus (FEMA, 2022).

0	Puente identificado como estructuralmente deficiente; cerrado al tráfico.
1	Puente en estado crítico por socavación; la revisión de campo indica que la falla de los pilares/estribos es inminente; cerrado al tráfico.
2	Puente en estado crítico por socavación; la revisión de campo indica que se ha producido una extensa socavación en los cimientos.
3	Puente en estado crítico por socavación; cimentaciones determinadas como inestables para las condiciones de socavación evaluadas o calculadas.
4	Se determina que la cimentación del puente es estable para las condiciones de socavación evaluadas o calculadas; la revisión de campo indica que se requiere acción preventiva para proteger los cimientos expuestos.
5	Se determina que la cimentación del puente es estable para las condiciones de socavación evaluadas o calculadas.
6	No se ha realizado el cálculo/evaluación de la amenaza de socavación.
7	Se han instalado contramedidas para mitigar un problema existente de socavación y para reducir el peligro de falla del puente durante un evento de avenida intensa.
8	Cimentaciones del puente determinadas como estables para la condición de socavación evaluada o calculada.
9	Cimentaciones de puentes (incluyendo pilotes) en tierra seca muy por encima de las elevaciones de las aguas de inundación.
T	Puente sujeto a mareas que no han sido evaluado para socavación, pero que se considera de bajo nivel de amenaza
U	Puente con la situación de su cimentación desconocida, pues no ha sido evaluada para socavación. Categorizar como 1.
N	El puente no pasa por encima del cauce fluvial.

El cálculo del daño físico culmina con la estimación de una probabilidad de falla estructural, en donde la “falla” se refiere a la pérdida funcional del puente debido a la socavación. Para ello, según la clasificación del puente y su grado de exposición, se establecen los siguientes valores (Tabla 8):

Tabla 8. Probabilidad de falla, según el tipo de puente y de su exposición a la amenaza de socavación (Hazus; FEMA, 2022).

Período de recurrencia de la avenida	Probabilidad de falla		
	Índice de socavación 1	Índice de socavación 2	Índice de socavación 3
Puentes de un vano			
100 años	5%	2%	1%
500 años	10%	4%	2%
1000 años	15%	6%	3%
Puentes continuos			
100 años	1.25%	0.5%	0.25%
500 años	2.5%	1%	0.5%
1000 años	3.75%	1.5%	0.75%

Al asignar la probabilidad de falla, según el cuadro anterior, se calcula la probabilidad de la funcionalidad del puente:

$$\text{Probabilidad de funcionalidad} = 1 - \text{Probabilidad de falla}$$

5.4.2 Estimación de las pérdidas económicas

El modelo Hazus permite estimar las pérdidas económicas directas en los puentes, debido a las avenidas, mediante la probabilidad de falla como indicador del porcentaje de daño para calcular los costos de reparación y reposición.

$$\text{Costo de reparación y reemplazo} = \text{Probabilidad de falla} \times \text{Valor en inventario}$$

Esta metodología se basa en el inventario de la infraestructura y en el valor asignado a cada elemento, como, por ejemplo, los puentes. Ante la ausencia de un inventario, la aplicación de la metodología requiere conocer el costo más actualizado de cada estructura. De no contarse con esta información, deberá estimarse el costo, por metro, según la tipología de cada puente, y de ahí, asignar un valor de la estructura.

5.5 Limitaciones y estudios posteriores recomendados

Para la aplicación de la metodología propuesta, se identificaron algunas limitaciones que se puntualizan a continuación:

- **Batimetría de los cauces.** Una exitosa aplicación de la metodología dependerá de información detallada y de buena calidad de los cauces de los ríos involucrados. De no contarse con esta información, no se podrá hacer una estimación precisa de niveles de ríos o profundidades de socavación, limitando la aplicación cuantitativa de la metodología.

- **Detalle de infraestructura de drenaje pluvial de la carretera.** Sería posible realizar un análisis de mayor detalle si se contara con planos de cunetas y alcantarillas de las carreteras a evaluar, aunque un nivel de detalle así probablemente sería incompatible con la escala de trabajo para toda una ruta de decenas o cientos de kilómetros.
- **Modelo Numérico del Terreno (MNT).** Un MNT con suficiente extensión y resolución es requerido para el desarrollo y aplicación de modelos de flujo bidimensionales, lo cual permite un adecuado mapeo de zonas de inundación y una correcta estimación de los parámetros hidráulicos de interés (profundidades, velocidades). Un MNT de alta resolución, idealmente derivado mediante tecnología LiDAR podría ser de utilidad para obtener resultados más precisos.
- **Información hidrometeorológica actualizada y de extensión suficiente.** Para el estudio de caso se contó con información relativamente limitada en cuanto a la extensión temporal de los registros de caudales máximos instantáneos en los ríos del tramo en estudio. Esta es una limitación difícil de solventar, que en algunos casos de aplicación obligaría al uso de metodologías indirectas para la estimación de caudales. Esto es particularmente importante si se desea integrar la variable del cambio climático, puesto que es necesario primero tener una adecuada representación de la variabilidad climática natural, para lo cual se necesitan registros suficientemente largos y representativos de la zona de estudio.

Asimismo, se recomiendan los siguientes estudios para futuras aplicaciones de la metodología, que permitan ampliar la valoración del riesgo asociado al clima sobre la infraestructura vial:

- Determinación probabilística de incrementos (o disminuciones) en las magnitudes de lluvias extremas, para diferentes escenarios climáticos. Durante la aplicación de la metodología se contó con series de tiempo de diferentes variables climáticas, provenientes de diferentes escenarios climáticos y para tres períodos futuros: próximo (2015 a 2040), medio (2041 a 2070) y lejano (2071 a 2100). Un primer análisis de la variable precipitación máxima anual en 24 horas permitió identificar que el cambio futuro de esta variable no parece significativo para ninguno de los escenarios. Se recomienda realizar un estudio más exhaustivo sobre el comportamiento de esta variable, que permita cuantificar de una forma más precisa el cambio y justificar porcentajes de incremento (o disminución) de esta variable, que se pueda integrar en modelos de transformación precipitación-escorrentía cuando estos se utilicen para estimar los caudales pico para los análisis hidráulicos y de socavación.
- Desarrollo de relaciones regionalizadas para la estimación de caudales pico en cuencas sin medición, a partir de los registros de grupos de estaciones hidrológicas cercanas. Es posible, mediante el análisis de registros en varias estaciones en una cuenca o en cuencas vecinas, aplicar métodos de regionalización, que solventen las limitaciones de escasez o extensión de registros hidrológicos.

6. La amenaza volcánica: el caso de los lahares

6.1 Introducción

Costa Rica es parte del anillo de fuego del Pacífico, lo cual significa que su territorio se encuentra en una región tectónicamente compleja. En la costa Pacífica, al sur de la frontera entre Costa Rica y Panamá, se encuentra el punto triple entre las placas del Coco, Caribe y Nazca; mientras que, hacia el noroeste de la frontera, las placas tectónicas del Coco y Caribe presentan un movimiento convergente entre sí. Está introduciéndose la placa del Coco por debajo la placa del Caribe a una velocidad promedio de ~90 mm/año (DeMets, 2001). Este proceso de dinámica interna es el causante de la actividad sísmica por subducción del país y la generación de volcanes con sus respectivas amenazas, las cuales se manifiestan durante los procesos eruptivos. En algunos casos, como se verá más adelante, algunas de esas amenazas volcánicas se producen sin que sean simultáneas con las erupciones (i.e. el caso específico de los lahares secundarios). El conocimiento de las amenazas volcánicas y la exposición de los elementos humanos vulnerables –es decir, el riesgo asociado y su gestión–, es crucial por varias razones:

En zonas tropicales como Costa Rica y la región centroamericana, desde la época precolombina, la colonia y en la actualidad los humanos se han beneficiado de las ventajas que ofrecen los terrenos volcánicos activos (Alvarado & Soto, 2008; Ruiz et al., 2018). Entre los principales beneficios se pueden mencionar los suelos fértiles, producto de la meteorización de los materiales expulsados por los volcanes, la disponibilidad de recurso hídrico debido a la pluviosidad y presencia de acuíferos volcánicos, la cercanía de fuentes de materiales de construcción, la generación de energía geotérmica, minerales, fuentes termales y turismo, entre otros.

A pesar de todos esos beneficios, estas regiones, su población, infraestructura y actividades productivas también se caracterizan por estar expuestas a los diferentes procesos peligrosos asociados a la actividad volcánica (Ruiz et al., 2018). Estos tienen el potencial de generar impactos negativos en la economía del país y su desarrollo sostenible (Aguilar & Alvarado, 2014). Sin embargo, con el tiempo los beneficios obtenidos pueden superar las pérdidas, por lo que no es sorprendente que en Costa Rica y en otras regiones del mundo las áreas más densamente pobladas se ubiquen cerca de volcanes activos (CIESIN et al., 2011; Cottrell, 2015).

El conocimiento de las amenazas volcánicas y la exposición de los elementos humanos vulnerables –es decir, el riesgo asociado y su gestión–, es crucial por varias razones:

1. **Seguridad de las personas:** Proteger la vida de las personas es una de las prioridades de la gestión del riesgo. La infraestructura vulnerable en áreas volcánicas puede verse gravemente dañada por la caída de tefra (o piroclastos), corrientes de densidad piroclástica (CDP), lahares, lluvia ácida y otros procesos volcánicos. Comprender estas amenazas permite diseñar planes de evacuación y estrategias territoriales para reducir el riesgo y la pérdida de vidas.
2. **Protección de la infraestructura:** La infraestructura, como las carreteras, puentes y edificaciones, puede sufrir daños severos debido a los eventos volcánicos intensos. Conocer la vulnerabilidad (exposición, fragilidad, costos de reposición, etc.) de estas estructuras ante las diferentes amenazas permite aplicar medidas preventivas, como por ejemplo las restauraciones, refuerzos estructurales, reubicaciones estratégicas y el desarrollo de sistemas de observación, vigilancia y detección temprana de la actividad.
3. **Continuidad de operaciones:** En el caso de la infraestructura crítica, como por ejemplo las rutas logísticas, es esencial garantizar su funcionalidad, incluso durante los eventos volcánicos. Los puentes son uno de los eslabones más importantes y también más vulnerables a ciertos tipos de amenazas volcánicas como por ejemplo los lahares y la lluvia ácida. Con un buen conocimiento de las amenazas se pueden desarrollar planes de contingencia y rutas alternas, para asegurar la continuidad operativa y minimizar las interrupciones en el servicio brindado.

6.2 Identificación de la amenaza

6.2.1 Generalidades

Uno de los grandes desafíos para la evaluación del riesgo volcánico es que una erupción tiene la particularidad de generar, simultáneamente o casi, varias amenazas (Sparks et al., 2013). La caída de tefras (cenizas, piroclastos), corrientes de densidad piroclásticas, flujos de lava y lahares pueden producirse simultáneamente o de una manera secuencial, en diferentes escalas espaciales y temporales, con un potencial elevado para impactar negativamente a la sociedad.

Para resumir la complejidad, los procesos que suceden, en los volcanes activos, pueden agruparse en categorías, según la intensidad de la amenaza que representan y así asociarse con los elementos expuestos en las laderas y áreas circundantes (Tabla 9). Esta tabla se puede completar y adaptar según el uso y aplicación de las metodologías de estudio y de los casos específicos bajo consideración. Para este caso en particular, el análisis se concentrará, exclusivamente, en la amenaza de los lahares y su posible efecto sobre los puentes de la RN-32.

Tabla 9. Relaciones entre los procesos volcánicos amenazantes y los elementos (población, infraestructura/actividades) expuestos a daños y pérdidas (Modificado de Marzocchi et al., 2009).

Amenaza volcánica	Efecto en la población, infraestructura y/o actividades socioeconómicas
1. Caída de tefra/cenizas/ piroclastos	Quemaduras, golpes y enterramiento (personas y animales domésticos). Destrucción por colapso de techos de edificaciones e infraestructura. Interrupción del tráfico aéreo. Pérdida en los campos agrícolas y ganaderos. Contaminación de fuentes de agua. Daños e interrupciones de la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica.
2. Corrientes de densidad piroclástica (CDP)	Quemaduras, golpes, impactos y enterramiento (personas y animales domésticos) e infraestructura. Destrucción producida por el impacto en edificaciones e infraestructura.
3. Flujos (coladas) de lava	Quemaduras (plantaciones, animales domésticos y personas). Destrucción por incendio de edificaciones e infraestructura. Destrucción por enterramiento o empujes laterales en obras civiles.
4. Lahares	Arrastre y ahogamiento de personas y ganado. Destrucción de edificaciones, infraestructura y puentes, debido al impacto e inundación de los cauces por los que transitan. Procesos de erosión y socavación en bases, bastiones, fundaciones de pilotes, rampas de aproximación de los puentes. Enterramiento, por inundación, de edificaciones, infraestructura y campos de cultivo. Interrupción de la generación y transmisión hidroeléctrica y geotérmica.
5. Emisión y caída de gases y vapores	Toxicidad y quemaduras en humanos, ganado, agricultura y vegetación. Acidez y corrosión en estructuras metálicas. Impacto en el crecimiento de las plantas y áreas de cultivo.
6. Caída de proyectiles balísticos	Destrucción por impacto, golpes, muerte de personas y animales; daños a edificaciones e infraestructura.
7. Terremotos volcánicos	Colapso de infraestructura. Generación secundaria de otras amenazas, como por ejemplo deslizamientos y lahares.

Considerando sus diferencias, fragilidad y su ubicación, los elementos expuestos podrían ser más o menos dañados por las diferentes amenazas volcánicas. Su resistencia a los impactos se puede expresar a través de su resiliencia (inverso de la vulnerabilidad). Por ejemplo, una plantación de bananos tendría un impacto relativamente bajo a los sismos volcánicos (baja vulnerabilidad ante los sismos). Por el contrario, un puente no se vería directamente dañado por la caída de 10 cm de ceniza (excepto que fuese corrosiva), mientras que la plantación de bananos tendrá un impacto elevado (elevada vulnerabilidad a la caída de cenizas). El puente podría tener un elevado impacto (elevada vulnerabilidad) al ser impactado por un lahar muy voluminoso o una colada de lava grande.

En el ámbito mundial, los lahares son considerados como la segunda mayor amenaza volcánica destructiva (Baxter, 1983; Blong, 1984; Tilling, 1989) después de las corrientes piroclásticas de densidad. Los lahares representan 15 % de las muertes ocasionadas por la actividad volcánica histórica (Auker et al., 2013). Durante el siglo XX, decenas de miles de personas murieron debido a lahares y cientos de miles fueron forzadas a abandonar sus hogares (Tilling, 1996; National Research Council, 1991, 1994). Uno de los eventos más importantes sucedió en la localidad de Armero, en las faldas del volcán Nevado del Ruiz, Colombia en 1985; en la región centroamericana se puede mencionar el sucedido en el volcán Casitas en 1998 en Nicaragua (Sheridan et al., 1999) y en Taras de Cartago (1963).

En el contexto geodinámico de Costa Rica y con base en los datos de erupciones históricas disponibles (Alvarado, 2009, Aguilar & Alvarado, 2014 y Bronw et al., 2015), es más frecuente que se produzcan lahares, que transiten por los cauces de los ríos y causen algún impacto en la infraestructura y la población que las coladas de lava de alcance largo o corrientes de densidad piroclástica. Por ello, al realizar un análisis del riesgo, también debe tomarse en cuenta la frecuencia con la que pueden suceder las amenazas y, por supuesto, en este caso, sus propiedades reológicas e hidráulicas.

Como ya se definió previamente en el análisis del CPRI de este proyecto dentro del espectro de las amenazas volcánicas consideradas, solamente fue escogida la amenaza de los lahares, debido a su impacto elevado sobre la infraestructura vial y su mayor frecuencia de materialización (Irazú 1963, Rincón de la Vieja 1998, Poás 2009, Miravalles 2016). En el apartado siguiente se detallan las características de esta amenaza y se describen algunos casos históricos sucedidos en Costa Rica.

El primer paso de este análisis consiste en identificar las carreteras de la red vial nacional ubicadas en el área proximal de los edificios volcánicos o cerca del piedemonte y la zona de depositación de los lahares en los abanicos aluviales. Esta información se puede obtener al superponer el mapa de la red vial nacional y el mapa geomorfológico. En las rutas nacionales seleccionadas se ha realizado un inventario de los puentes que cruzan los principales sistemas de drenaje y de aquí se han seleccionado aquellos con potencial de cruzar cauces por donde transiten lahares. Para esto, se puede acceder al Visor Cartográfico de LanammeUCR (Lanamme, 2024) en el módulo de puentes de la red vial nacional y en donde también se pueden encontrar los datos sobre su estado, tránsito promedio diario (TPD).

El conocimiento de la posición topográfica y altura del puente, con respecto a los perfiles de la cuenca y del cauce, es fundamental para la caracterización. Las características de los lahares varían con su tránsito y la distancia hacia río abajo: variables del tirante, velocidad, cantidad y proporciones de sus materiales. Esto implica que su impacto sobre la infraestructura también podría variar dependiendo de su ubicación en la cuenca y su perfil topográfico (Vallance & Iverson, 2015).

6.2.2 Caracterización de la amenaza de los lahares

Lahar es un término indonesio que define una mezcla de bloques de rocas, escombros y agua proveniente de un volcán y que fluye rápidamente por sus laderas, impulsada por la gravedad (Tilling, 1996; Vallance & Iverson, 2015). El uso del término lahar se ha adoptado, en la mayoría de los idiomas, para referirse a este proceso.

Los lahares pueden incluir uno o más tipos de flujo, incluidos los flujos de escombros, flujos transicionales, hiperconcentrados,

hipoconcentrados y flujos de lodo. Las transiciones entre esos tipos de flujo se definen comúnmente en términos de la fracción de sólidos suspendidos en el agua; sin embargo, dichas transiciones son graduales y dependen de otros factores, como por ejemplo la distribución del tamaño de los sedimentos, mineralogía de las arcillas, la agitación de las partículas y la energía cinética del flujo (Vallance & Iverson, 2015).

Debido a que los lahares están saturados de agua, tanto las interacciones líquidas como las sólidas influyen en su comportamiento dinámico y los distinguen de otros procesos relacionados con los volcanes, como por ejemplo las avalanchas de detritos e inundaciones. Los fragmentos de roca transportados por los lahares los hacen especialmente destructivos; mientras que el abundante líquido que contienen les permite transitar sobre pendientes suaves e inundar áreas lejanas de sus fuentes (Vallance & Iverson, 2015).

Dependiendo de la pendiente del volcán y la energía potencial, los lahares pueden viajar más de 100 kilómetros, desde su fuente de origen hasta su depósito final; su velocidad puede variar entre 30 a 100 km/h dependiendo del porcentaje de agua y de la densidad de los materiales (Vallance & Iverson, 2015). Poseen elevada capacidad erosiva (abrasiva), por lo que incorporan sedimentos en su tránsito. Además, socavan las laderas y escarpes de las terrazas fluviales y arrastran cantidades importantes de biomasa. Sin embargo, su capacidad erosiva disminuye cuando se movilizan sobre terrenos rocosos resistentes y cuando el gradiente topográfico es bajo (Sigurdsson et al., 1999).

Los lahares pueden producirse tanto durante las erupciones (primarios, sin-eruptivos) como después del final de la erupción (secundarios, post-eruptivos). Los lahares sin-eruptivos también pueden generarse por la expulsión explosiva de un lago cratérico junto con tefra o sedimentos volcánicos, como ha sucedido en los volcanes Rincón de la Vieja (Soto, 2004) y Poás (erupción de abril del 2017; Ruiz et al., 2018).

En las regiones en donde hay glaciares en la cima de los volcanes (no es el caso de Costa Rica), los lahares primarios pueden suceder cuando las coladas de lava o los piroclásticos derriten la nieve y/o hielo –por ejemplo, volcán Villarrica en Chile, 1971; Castruccio, 2005; Nevado del Ruiz en Colombia, 1985 (Lowe et al., 1986)–. También pueden generarse durante las lluvias intensas que erosionan las cenizas recién depositadas, como en el volcán Pinatubo, Filipinas 1991, luego del paso de un tifón sobre el volcán durante la erupción de ese año (Vallance & Iverson, 2015). El caso del río Reventado en Taras, Cartago y el volcán Irazú (1963) puede también clasificarse dentro de estas características. Los lahares post-eruptivos se producen cuando ya no hay una erupción. Pueden generarse por la removilización de los depósitos de tefra (cenizas) debida a las lluvias intensas, como los eventos del volcán Irazú entre 1963 y 1965 (Aguilar & Alvarado, 2014), o por el colapso de laderas volcánicas alteradas hidrotermalmente durante lluvias torrenciales como las generadas por el huracán Mitch en 1998 en el volcán Casitas, Nicaragua (Scott et al., 2005).

Hay eventos de lahares que pueden ser generados por deslizamientos cosísmicos, como en las laderas del volcán Poás durante el terremoto de Cinchona (Mw 6,2) del 8 de enero de 2009 (Alvarado, 2010), por cuyas laderas descendieron lahares del material volcánico depositado desde hace miles de años.

El impacto y efectos de los lahares varían según diferentes variables, tanto del proceso volcánico en sí (origen, volumen), como de las características topográficas del volcán y de la humedad disponible. Sus efectos pueden ser puntuales, es decir, debido a un solo evento, o luego de una recurrencia casi permanente, durante años. Este tipo de situaciones, a largo plazo, puede dañar seriamente la infraestructura y actividades económicas y sus procesos de recuperación (Vallance & Iverson, 2015). En el siguiente apartado se describe el impacto y efecto de los lahares, de forma más detallada.

6.2.3 Impactos y efectos posibles de los lahares

Aunque las características reológicas de los lahares han recibido mucha atención en la literatura, los estudios detallados sobre sus impactos en edificios, infraestructura y agricultura son escasos (Vallance & Iverson, 2015). Su impacto en las estructuras es

potencialmente devastador, debido a su capacidad de transportar fragmentos de rocas de tamaño métrico, los cuales transitan a la densidad del lodo sobre el que “flotan”. Además, tienen gran capacidad erosiva-abrasiva, por lo que pueden dañar las fundaciones y bastiones de las obras civiles.

De acuerdo con sus densidades y velocidades de flujo, los lahares pueden destruir o enterrar estructuras y maquinaria ubicada en los cauces o cerca de ellos. La acumulación de escombros alrededor de puentes, particularmente aquellos con poca luz libre, puede causar desbordamientos e inundaciones de viviendas, negocios y tierras agrícolas cercanas (Vallance & Iverson, 2015) y elevar el nivel del cauce (agradación), con lo que paulatinamente puede reducirse la capacidad hidráulica bajo los puentes.

Las erupciones históricas, como la del Nevado del Ruiz en 1985 y la del Pinatubo en 1991, proporcionaron información sobre los daños posibles a los edificios causados por los lahares, durante la erupción y los años posteriores. Los daños a los edificios incluyen el enterramiento, erosión de cimientos, impacto de los escombros, transporte debido a la erosión del suelo y la licuefacción, fallas por cargas excesivas en las paredes o techos, colapso, socavamiento y corrosión debido a la naturaleza ácida del flujo y de sus materiales en suspensión (Lowe et al., 1986; Tilling, 1996). En la Tabla 10 se resumen algunos de los aspectos específicos que caracterizan a los lahares, los daños que pueden generar, la caracterización de la intensidad de la amenaza (MIA) y las definiciones asociadas. Las evaluaciones del riesgo derivado de los lahares son cruciales por las características de sus procesos y potencial destructivo, especialmente en las áreas con elementos expuestos y vulnerables en los alrededores de los volcanes.

Tabla 10. Descripción del origen de los lahares, transporte, composición, características principales de daño y métricas comunes que caracterizan la intensidad de flujos (Modificado de Wilson et al., 2014)

Características de la amenaza de lahares	Características dañinas primarias de los lahares	Definiciones y métricas de intensidad de la amenaza
• Origen y escenarios: (1) erupción de material piroclástico caliente sobre hielo o nieve, (2) erupciones a través de lagos de crátericos, (3) desbordamiento de lagos crátericos u otros cuerpos de agua, (4) lluvia después de erupciones de gran cantidad de tefra, (5) Deslizamientos cosísmicos en terrenos volcánicos y que sus depósitos entren en sistemas de drenaje. • Transporte: Flujos impulsados por la gravedad; transitan cuesta abajo a elevadas velocidades y recorrer grandes distancias. • Composición: Mezcla de material volcánico (tefra) y agua que podría ser más caliente y ácida que la de un río en condiciones normales. Los lahares de rebalse de lagos crátericos por erupciones explosivas pueden ser calientes y con aguas ácidas y sulfurosas.	• Velocidad: Pueden viajar a altas velocidades entre 30 a 100 km/h, lo que puede dañar parcialmente o destruir edificios e infraestructuras en su camino y en las riberas aledañas. • Erosividad: Comúnmente son erosivos, lo que puede desestabilizar estructuras (por ejemplo, pilares y estribos de puentes) ubicadas en o cerca de los canales-cauces de flujo. • Distancia de recorrido: Pueden viajar largas distancias (hasta 100 km) y cubrir áreas extensas. • Profundidad (altura del tirante): Comúnmente alcanzan hasta decenas de metros en los valles de la zona proximal y forman capas delgadas fuera de esos valles, lo cual es suficiente para enterrar infraestructuras y, a veces, inundar edificios y estructuras en la zona distal. • Temporalidad: los lahares pueden producirse después de la erupción (“secundarios”), luego de muchos años, cuando la lluvia removiliza el material piroclástico y los suelos residuales, con lo cual se prolonga el impacto potencial del peligro.	• Presión dinámica (unidad común: kPa): Energía cinética por unidad de volumen del flujo, la cual varía con la densidad y la velocidad del flujo (i.e. viscosidad cinemática). Se utiliza para estudiar los impactos laterales. • Velocidad (unidad común: m/s): Velocidad del lahar durante su depositación. Se puede utilizar en lugar de la presión dinámica, si se desconoce la densidad del lahar. • Espesor del depósito (unidad común: m): espesor del depósito del lahar restante después de su depositación. • Profundidad del flujo (unidad común: m): profundidad del lahar durante su depositación. La profundidad del flujo puede ser mayor que el espesor del depósito.

6.2.4 Lahares históricos en Costa Rica

En Costa Rica han sucedido lahares a lo largo de la historia, tanto primarios como secundarios, que han generado destrucción en infraestructura vial y ferroviaria, industrias y asentamientos humanos. A continuación, se mencionan algunos datos importantes acerca de estos eventos.

Durante la historia reciente de Costa Rica, varios poblados han sido impactados por lahares, lo que ha provocado problemas ambientales significativos y la destrucción de infraestructura (Aguilar & Alvarado, 2014). Entre los daños principales a la infraestructura se incluyen el corte de vías de comunicación, destrucción de puentes, inundación de carreteras y líneas férreas, y la interrupción de servicios básicos (agua potable, electricidad). En Tabla 11, se presentan los datos de algunos de los lahares históricos y de los eventos más recientes que han generado daños a parte de la red vial nacional e infraestructura.

Tabla 11. Resumen de eventos laháricos documentados en los alrededores de algunos volcanes de Costa Rica y que han dañado elementos de la infraestructura

Volcán y fechas y eventos	Tipo de evento	Datos sobre efectos y daños	Referencias
Irazú: 1952 terremoto de Patillos - Entre 1963 -1965, período eruptivo 1991, Deslizamiento, sector noroeste externo del cráter	- Lahares causados por deslizamientos cosísmicos - Lahares secundarios disparados por lluvias - Lahares por deslizamiento en sector noroeste del cráter.	Los lahares generados por lluvias en el período eruptivo de 1963-1965, generaron pérdida de vidas humanas, destrucción y daños en la infraestructura vial y ferroviaria. Destrucción y daños en viviendas, obras y servicios públicos e industriales en el sector de Taras.	- Montero & Alvarado 1995. - Mora 1993; Alvarado & Schminke 1994; Aguilar & Alvarado, 2014; - Fallas et al., 2018
Rincón de la Vieja: 1991 1995 1998 2011-2024	Lahares primarios generados por erupción freatomagmática y rebalse del lago cratérico.	- Daños en puentes de los ríos Pénjamo y Azul. - Puente en río Azul destruido. - Lahares en quebrada Azufrada.	Paniagua et al., 1996
Poás: 1912, 2009, 2017	- Lahares primarios (2017) por erupción freatomagmática y rebalse del lago cratérico por la proyección de agua debido a la erupción. - Lahares secundarios (2009) causados por deslizamientos generados por terremoto de Cinchona (Mw 6,2). - Lahares secundarios (1912) por deslizamientos generados por terremoto de Sarchí (Mw 5,5).	- Cierre preventivo de las plantas hidroeléctricas Toro I, II y III. - Destrucción y daños en la infraestructura vial, puentes y planta hidroeléctrica (Eventos del 2009)	Paniagua et al., 1996

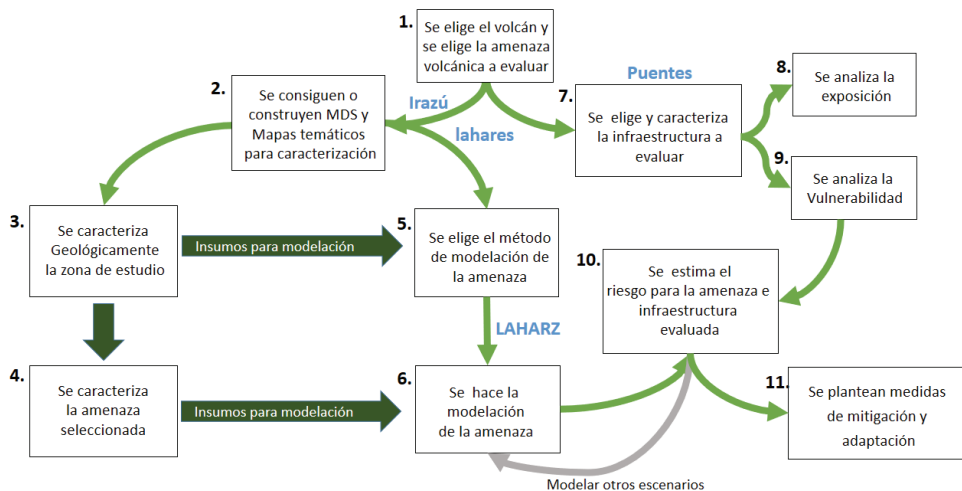
Miravalles

6.3 Metodología para la evaluación de la amenaza de los lahares, la vulnerabilidad y el riesgo asociados

Las evaluaciones del riesgo permiten identificar los elementos expuestos y vulnerables para planificar, de esta manera, las medidas para la gestión del riesgo, particularmente la protección de las vidas humanas y de sus bienes materiales. Estas evaluaciones pueden ser cualitativas (descriptivas) o cuantitativas (datos medibles), o una combinación probabilística o determinística de ambas, según la naturaleza de los datos disponibles y el propósito de la evaluación (Janda et al., 1996). En el siguiente apartado se define la metodología y los pasos planteados en este trabajo, para el caso estudiado.

En esta sección se describen los pasos más importantes de la metodología sugerida para realizar la evaluación del riesgo ante la amenaza de lahares en la infraestructura vial (Figura 17). Los pasos completos se pueden ver en los diagramas de flujo que ilustran el caso del río Sucio. Esta metodología se podría complementar con las de otras amenazas volcánicas e infraestructura, siempre y cuando existan los datos suficientes y los programas y plataformas necesarias para la modelación.

Figura 17. Flujograma general de la metodología planteada para la evaluación de las amenazas y del riesgo derivados de los lahares. En el diagrama se menciona la plataforma LAHARZ, aunque existen otras (e.g. Titan 2F, Flow2D, Flow-R, etc.) que también pueden permitir el análisis correspondiente. LAHARZ fue escogida por ser sencilla de aplicación. (MDS: Modelo Digital de la Superficie, sinónimo de MNT).



A continuación, se ofrece una indicación acerca del procedimiento de evaluación general de la amenaza volcánica y del proceso para proceder, luego, con la evaluación del riesgo derivado de los lahares.

6.4 Determinación de la frecuencia de los lahares destructivos

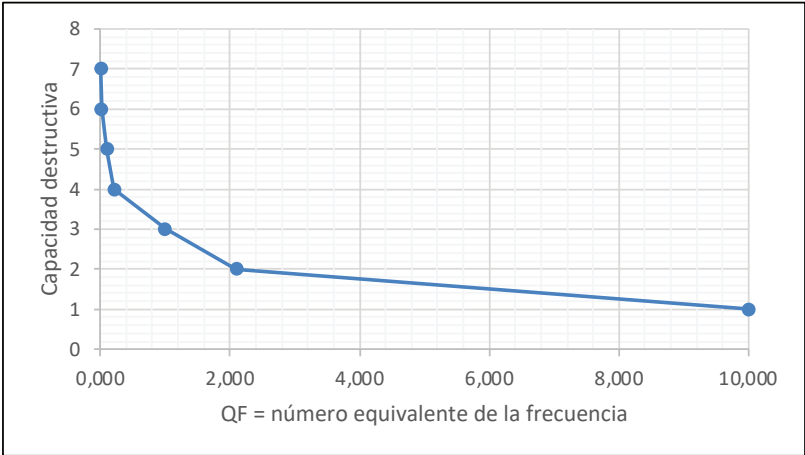
Con los datos de la altura del tirante del lahar, el nivel de los daños y, a partir de una línea base común, de frecuencia para todos los lahares (Tabla 12), se propone estimar la probabilidad de que sucedan (frecuencia, período de recurrencia estimado (Tr) de los eventos con las mismas características y en un sector específico. Estos datos pueden provenir de los registros históricos, evidencias geológicas y juicio de expertos. Para ello, se establece un equivalente numérico Qf, calculando el inverso del período de recurrencia máximo, para cada clase: $Qf = 1/T_{max}$. Para una mejor visibilidad del resultado, Qf puede multiplicarse por 100 y obtener QF. Al graficar los datos de QF vs. los daños generados por los lahares, se puede observar cómo los lahares más voluminosos se producen con menor frecuencia que los de menor volumen.

Tabla 12. Recurrencia de los eventos y su capacidad destructiva

Nivel de daños	Frecuencia y calificación del evento	Período de recurrencia para el tipo de actividad o proceso volcánico (lahares) (orden de magnitud)	Cuantificación de la frecuencia del proceso volcánico (lahares) (Qf)	Número equivalente $QF=(100*Qf)$
4	F0 - Extremadamente baja	5000 a 10 000 años	0,0001	0,01
4	F1 - Muy baja	1000 a 5000 años	0,0002	0,02
4	F2 - Baja	500 a 1000 años	0,001	0,10
3 y 4	F3 - Moderada	100 a 500 años	0,002	0,2
1 y 2	F4 - Elevada	50 a 100 años	0,01	1
0 y 1	F5 - Muy elevada	10 a 50 años	0,02	2
0	F5 - Casi permanente	1 a 10 años	1	10

Con estos datos se puede generar un gráfico de la frecuencia de eventos y los daños que se pueden asociar a eventos muy grandes o pequeños. Los eventos más grandes y destructivos se producen pocas veces (Figura 18).

Figura 18. Frecuencia de eventos vs. nivel de daños esperados. Mientras más frecuente es el evento, mayor el número equivalente (QF) y menor es el nivel de los daños probables. Los lahares con mayor nivel de daños son menos frecuentes.



6.5 Caracterización de la infraestructura, análisis de la exposición ante los lahares

6.5.1 Identificación

El primer paso de este análisis consiste en identificar las carreteras de la red vial nacional ubicadas en el área proximal de los edificios volcánicos o cerca del piedemonte y la zona de depositación de los lahares en los abanicos aluviales, como se explicó anteriormente.

6.5.2 Caracterización de los puentes y su vulnerabilidad ante los lahares

La evaluación de la vulnerabilidad (física, social, económica, etc.) en un territorio volcánico, es necesaria para planificar y ejecutar las acciones preventivas. Esta sección se enfocará en la vulnerabilidad física de los puentes ante la amenaza de lahares, siguiendo y adaptando la metodología propuesta por Kappes et al., 2012 y los datos disponibles en el Sistema de Gestión y Manejo de Puentes de COSEVI (SAEP; el acceso al sistema se puede hacer como invitado en la plataforma, sin necesidad de abrir una cuenta) y mediante su comprobación en el sitio.

Los puentes expuestos a la amenaza de lahares, identificados en el inventario, se deben caracterizar por su vulnerabilidad: tipos de material, superestructura, estructura e importancia. En la Tabla 13 se detallan los indicadores de vulnerabilidad evaluados en este trabajo, divididos en cuatro grupos: 1. estructurales, 2. funcionalidad del puente, 3. ubicación del puente a lo largo de la cuenca y 4. su relación con el impacto económico y financiero en caso de daño, su reposición y reparación.

Tabla 13. Indicadores utilizados para determinar la vulnerabilidad física de los puentes expuestos a la amenaza de los lahares (modificado de Kappes et al., 2012)

Indicadores de la vulnerabilidad	Tipo	Factor de peso
1. Tipo de superestructura del puente: Cómo el puente soporta cargas y distribuye los esfuerzos. Los diferentes tipos de superestructura pueden reaccionar de manera distinta frente al impacto de un lahar, y de ello depende su estabilidad.	Estructural	0,075
2. Tipo de material del puente: Influye en su resistencia frente a la erosión y el impacto de los sedimentos transportados por el lahar. Los materiales más resistentes pueden ofrecer mayor durabilidad en condiciones adversas.	Estructural	0,125
3. Condición de estado del puente (evaluaciones): Refleja su capacidad para resistir eventos extremos. Un puente en mal estado es más vulnerable y propenso a las fallas estructurales bajo el impacto de un lahar.	Estructural	0,1
4. Intervalo de longitud: La longitud del puente puede afectar su capacidad para soportar la carga y el esfuerzo ejercido por un lahar. Los puentes más largos pueden estar más expuestos a daños.	Estructural	0,1
5. Presencia de pilas y bastiones en el cauce del río: Pueden ser impactados directamente por los lahares, lo que aumenta la posibilidad de colapso y su desestabilización.	Estructural	0,1
6. Redundancia: Un diseño redundante en la red vial proporciona diversidad en el sistema de distribución de tránsito, lo que favorece que el servicio no se vea interrumpido en el puente frente a daños parciales o totales en caso del impacto de un lahar.	Funcional	0,05
7. Importancia: La importancia del puente en la red vial determina la prioridad de su protección. Los puentes críticos para la conectividad o el transporte de personas y bienes esenciales requieren mayor atención en la evaluación de su estabilidad.	Funcional	0,15
8. Exposición: La ubicación del puente, con respecto al cauce y la dinámica fluvial, define la probabilidad de ser afectado por los lahares. El diseño del puente debe considerar la posibilidad de migración de los cauces, socavación de las terrazas, la estabilidad de las laderas adyacentes y de las profundidades necesarias para garantizar una cimentación estable y sin asentamientos diferenciales. Los tirantes de los lahares son mayores conforme se está a mayor altitud en la cuenca debido al "encañonamiento" de los cauces fluviales.	Ubicación	0,1
9. Características de las aproximaciones del puente: Determinan si se altera la geometría natural del cauce fluvial, sobre todo en el caso de un lahar. Las rampas de aproximación mal diseñadas pueden reducir el espacio de flujo hidráulico del cauce y con ello, incrementar la velocidad de flujo y la posibilidad de su destrucción eventual por erosión e inundación.	Ubicación	0,1
10. Económica/Financiera: Los recursos disponibles para el diseño, construcción, mantenimiento y reparación del puente, influyen en su durabilidad y capacidad para resistir lahares. Las limitaciones financieras pueden resultar en diseños o materiales menos robustos, con lo que aumenta la vulnerabilidad.	Económico	0,1

Sumatoria

1

A partir de la sumatoria de los indicadores obtenidos, se puede determinar el grado de fragilidad de la vulnerabilidad del puente evaluado. Esto permite definir los rangos de fragilidad de los puentes expuestos a los lahares (Tabla 10) y continuar con la modelación de la amenaza. Cuando la clasificación de la vulnerabilidad es media, elevada y muy elevada, se justifica el uso de programas especializado para la modelación de lahares (e.g. LAHARZ, Titan 2F, Flow2D, Flow-R, entre otros) con el fin de caracterizar mejor esta amenaza. De la sumatoria de los indicadores obtenidos se puede determinar el grado de fragilidad de la vulnerabilidad del puente evaluado. Con ello, se pueden definir los rangos de fragilidad de los puentes expuestos a los lahares (Tabla 14) y con esto puede continuar la modelación de la amenaza. Cuando la clasificación de la vulnerabilidad es media, elevada y muy elevada se justifican modelos más precisos y detallados.

Tabla 14. Rangos de fragilidad de los puentes expuestos a la amenaza de los lahares

Rangos de fragilidad de la vulnerabilidad de puentes ante lahares	Descripción
0,1 – 0,20	Muy baja
0,21 – 0,40	Baja
0,41 – 0,60	Media
0,61 – 0,80	Elevada
0,81 – 1	Muy elevada

6.6 Valoración del daño, según la modelación de lahares

6.6.1 Supuestos de trabajo para modelar la amenaza de los lahares

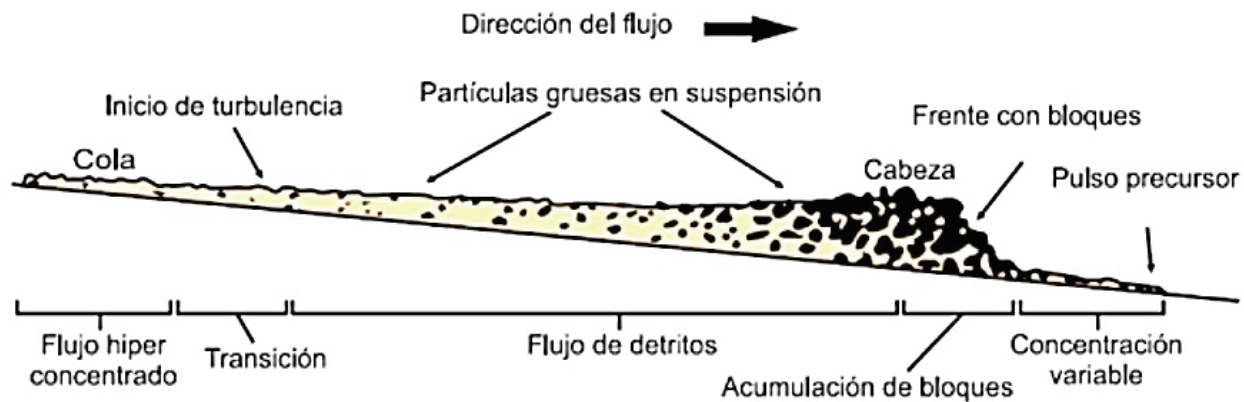
Las amenazas volcánicas son complejas de modelar y no siempre es posible contar con todos los datos de los lahares históricos. Por esta razón, el comportamiento de los lahares es complicado de predecir con precisión ya que es poco usual disponer de todos los factores necesarios en un modelo. En estos casos es fundamental abordar los vacíos de datos mediante opiniones razonables de expertos.

Para evaluar el riesgo de manera racional es necesario modelar varios escenarios plausibles, desde los más optimistas hasta los más pesimistas. Los supuestos permiten crear escenarios mediante análisis de sensibilidad paramétrica para observar cuáles son los casos más realistas del comportamiento del lahar y su impacto sobre los puentes, siempre y cuando sean adecuados, razonables y que no distorsionan los resultados del modelo. Algunos supuestos son dependientes de la plataforma (software, programas, interfases) de modelación (e.g. LAHARZ, etc.). Si se aplican otras herramientas (e.g. Titan 2F), es posible que se requieran otros tipos de datos, condicionantes y supuestos. A continuación, se enumeran los aspectos principales que deben tomarse en cuenta al modelar la amenaza de los lahares, según el contexto de este estudio:

- Dado que los lahares en Costa Rica se pueden generar por varias razones, es necesario considerar al menos tres escenarios de disparo posibles: 1. Un sismo que genere deslizamientos y flujos de detritos en la parte alta de la cuenca; los materiales de estos deslizamientos alcanzan el sistema de drenaje y fluyen como lahares, como por ejemplo lo que sucedió en el río Sucio por causa del terremoto de Patillos en 1952; 2. Deslizamiento súbito y voluminoso en la ladera volcánica, como el que sucedió en 1991 en el volcán Irazú; y 3. Erupción que genere la acumulación de ceniza, en la parte alta de la cuenca y que sean erosionadas por las lluvias, como en 1963 en el río Reventado, en Taras.
- El tipo de lahar que se va a suponer para cada escenario puede ser morfológicamente similar al de la Figura 19. En el frente

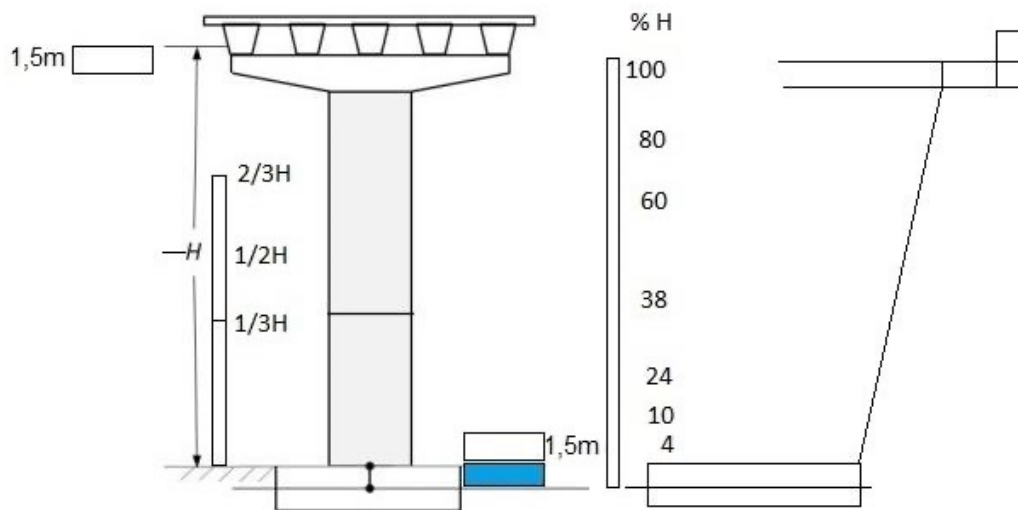
del flujo se acumulan bloques de tamaño métrico transportados en suspensión, a causa de la elevada densidad del lahar. Estos bloques frecuentemente de composición andesítica tienen gran capacidad destructiva de la infraestructura, por su energía cinética, velocidad de transporte e impacto.

Figura 19. Perfil de un lahar típico y como los que se ha supuesto para la metodología propuesta (Modificado de Vallance & Iverson, 2015)



- Cuando la modelación de los lahares se realiza con el software LAHARZ, los datos de salida ilustran el alcance del lahar a lo largo del río, el área de inundación y la altura del lahar sobre el cauce. Es posible suponer que, si el lahar alcanza el sitio del puente y su tirante es igual a la altura de la superestructura, incluida la losa de tránsito, el puente colapsaría por la energía de empuje y el impacto de los bloques. Si la altura del lahar es inferior a la altura de la losa o viga -1,5 m, la estabilidad del puente podría quedar comprometida.
- Dado que no es posible predecir las dimensiones del próximo lahar (Iverson et al., 1998), deberá estimarse su granulometría, volumen y características hidráulicas y reológicas dentro del tramo seleccionado.
- Los datos de los lahares pasados pueden suministrar la información para considerar los escenarios futuros posibles. Sin embargo, debido a la dificultad de tener acceso a esos datos, los volúmenes utilizados en estas de modelaciones pueden provenir de tres escenarios posibles:
 1. Peor escenario, volumen de 5 millones de m³
 2. Escenario intermedio 1, volumen de 3 millones m³
 3. Escenario intermedio 2, volumen de 2 millones de m³
 4. Mejor escenario, volumen de 1 millón de m³
- Tómese en cuenta que los lahares más voluminosos son menos frecuentes que los de volumen menor.
- El volumen de los lahares controla la extensión de su alcance río abajo.
- Se considera que si el lahar modelado alcanza el sitio en donde se ubica el puente y la altura de este en el cauce supera 1,5 m sobre el nivel del cauce, el evento tiene potencial de empezar a afectar los pilares del puente, las rampas de aproximaciones y los bastiones. Cuanto mayor sea la altura del tirante del lahar, mayor es la posibilidad de daños en el puente hasta llegar a la superestructura (Figura 20).
- Si se trata de un puente con viga simple sin pilares, se toma como supuesto el mismo efecto destructivo de la altura del lahar, excepto en lo que concierne a los pilares, bastiones y rampas de aproximación del puente.

Figura 20. Proporciones de las alturas H a las que podría llegar un lahar e impactar un puente. Se supone que el tirante del lahar modelado se relaciona con la posibilidad de impacto destructivo en la infraestructura.



6.6.2 Modelación de los lahares con LAHARZ

La modelación de los lahares puede realizarse mediante el software LAHARZ, plataforma de un modelo empírico desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) para delimitar objetivamente las áreas de amenaza de lahares. Muestra de manera cualitativa y determinística el área de inundación de un lahar sobre los MNT. La metodología fue desarrollada para que mediante un SIG se reproduzcan los resultados, al tomar en cuenta los volúmenes de los lahares y el MNT. La aplicación del modelo LAHARZ sobre la plataforma ARC-GIS, utiliza ecuaciones derivadas estadísticamente de los datos del flujo de los lahares históricos en diferentes lugares del mundo (Schilling, 2014). Permite calcular un área de amenaza proximal y, mediante un MNT, permite estimar las áreas con fuentes de amenaza distales y los volúmenes asignados.

Para modelar los flujos con LAHARZ se derivarán, estadísticamente, las ecuaciones que relacionan el volumen del lahar con el área inundable, en sección transversal, y con el área inundable planimétrica (Iverson et al, 1998). Dichas fórmulas permiten al LAHARZ controlar los límites laterales de la sección transversal (A) y determinar el área de inundación planimétrica (B) (Figura 21). Mediante la relación del desplazamiento vertical neto con la distancia horizontal H/L , se definen las fronteras de las zonas proximal y distal de la amenaza, en donde los valores de H/L están en el rango de 0,1 a 0,3, según el tamaño y tipo del evento proximal (Iverson et al, 1998).

Para su funcionamiento, el LAHARZ requiere de cinco insumos o datos de entrada: 1. La selección de la cuenca en donde se ubica el sitio de disparo. 2. La ubicación del sitio de disparo, dentro del cauce (o el modelo no funciona), a partir de la cual se ejecutará el cálculo del flujo. 3. Los volúmenes del lahar, 4. La relación H/L para el volcán estudiado, y 5. El MNT sobre el que corre el modelo.

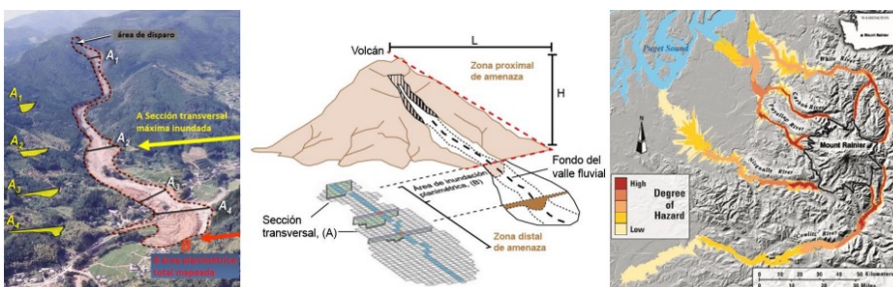


Figura 21. En la imagen de la izquierda, se muestran el área de disparo del lahar, los límites laterales de la sección transversal (A) y el área de inundación planimétrica. En la figura de la derecha, se muestra un esquema del funcionamiento conceptual de LAHARZ (Modificado de Iverson et al., 1998)

6.6.3 Valoración del daño, según la modelación

Posterior a la modelación de los lahares, se realizó un muestreo representativo de los posibles casos y se generaron escenarios hipotéticos que indicaran las magnitudes estimadas. Para evaluar la amenaza (peligro) se propuso que la probabilidad de excedencia de la amenaza (H) dependiera de la probabilidad de excedencia del evento modelado (P) y de la probabilidad de que un punto de interés, por ejemplo, la ubicación de un puente que sea alcanzado por un nivel específico de intensidad (I). Esta relación se expresó como el producto de estas dos condiciones, $H = P \times I$ (Maskrey, 1993). Se asumió una probabilidad de excedencia $P = 1$, enfocando así el análisis probabilístico únicamente en la determinación de los niveles de intensidad de los lahares (I), lo que representa un nivel de probabilidad condicional, es decir, en caso de que el evento se produzca (Dalbey et al., 2008). Finalmente, se procedió al cálculo de la probabilidad de excedencia de los daños y pérdidas, para cada escenario. El riesgo se calcula, luego, siguiendo los postulados y procesos indicados en el párrafo 3.1.2.

LAHARZ, para la modelación de lahares, es una herramienta de acceso gratuito, código abierto desarrollado por el USGS, lo que lo hace accesible para instituciones sin necesidad de costear licencias costosas. Es fácil de aplicar y permite la realización de simulaciones rápidas, que faciliten la toma de decisiones oportunas en áreas volcánicas activas. Requiere datos topográficos relativamente simples (como un DEM), que son fáciles de obtener. Ha sido probado y validado en varios escenarios volcánicos (Estados Unidos, México, El Salvador, Guatemala, etc.), lo que otorga confianza y relevancia para su uso en regiones volcánicas similares como Costa Rica. Permite modelar diferentes tamaños de lahares desde pequeños flujos hasta grandes eventos, lo que es útil para planificar una variedad de escenarios de riesgo.

La definición de los niveles del daño en los puentes afectados por lahares es fundamental para la gestión del riesgo, ya que permite una evaluación rápida y estandarizada del estado estructural, lo cual facilita la priorización de los recursos y planificación de acciones de respuesta y recuperación. Este procedimiento permite optimizar la asignación de las intervenciones, mejora la comunicación entre los equipos técnicos y autoridades, y contribuye a la documentación precisa y análisis post-evento. Además, permite aplicar medidas de mitigación específicas para reducir la vulnerabilidad de la infraestructura ante eventos futuros. Sin embargo, la definición de la valoración del daño, a partir de una modelación, no es tan sencilla, aunque la plataforma LAHARZ plantea una forma de hacerlo mediante sus resultados, pero esto podría variar para otras plataformas de modelación. Las tablas y curvas asociadas al daño se presentan en el anexo del caso aplicado al puente sobre el río Sucio.

La valoración del daño aplicada en esta metodología se determina a partir del escenario modelado. Para el caso de si el lahar alcanza el sitio en donde se ubica el puente; luego se analiza si la altura del lahar supera 1,5 m sobre el nivel base y se define si el evento tiene potencial de afectar partes del puente, como por ejemplo sus pilares (si es que los presenta), tramos de aproximación y sus bastiones. Se sobreentiende que la diferencia de la altura podrá tener impacto mayor sobre el puente, hasta llegar a la superestructura, en cuyo caso podría destruirse. En la Tabla 15 se muestran los porcentajes de altura, o tirante, del lahar en el sitio en donde se ubica el puente, y los niveles de destrucción definidos para cada caso. La descripción de los daños asociados a cada uno de los niveles de destrucción propuestos se muestra en la Tabla 16. Se puede ver que cuanto más alto el tirante del lahar, mayor será el nivel de daño esperado en la infraestructura.

Tabla 15. Relaciones entre el tamaño del lahar, modelado según su tirante y el porcentaje con respecto a la altura del puente específico, según su capacidad destructiva

Tamaño de lahar (Volumen-Tirante % de espacio)	Nivel de daños	Capacidad destructiva	Capacidad destructiva actual, definida por la relación IDF
80-100	Nivel 4 - Destrucción total	7	9
60-80	Nivel 4 - Destrucción total	6	8
38-60	Nivel 3 - Daños severos	5	7
24-38	Nivel 3 - Daños severos	4	5
10-24	Nivel 2 - Daños moderados	3	3,6
4-10	Nivel 2 - Daños moderados	2	2,4
1-4	Nivel 1 - Daños menores	1	1,2
0	Nivel 0 - Sin daños	0	0

Tabla 16. Definición y descripción de los niveles de daños por lahares a puentes (utilizada propuesta en esta metodología)

Nivel de daños	Descripción de daños
Nivel 4 - Destrucción total Nivel 4 - Destrucción total	El puente ha colapsado o ha sido arrasado por el lahar. Los daños son irreparables, con pérdida total de la estructura. La reconstrucción completa del puente es necesaria.
Nivel 3 - Daños severos Nivel 3 - Daños severos	El puente presenta daños estructurales graves, como la socavación profunda de los cimientos, desplazamiento de pilas o estribos, fisuras significativas en elementos estructurales o deformaciones importantes en la estructura. La funcionalidad del puente está seriamente comprometida y puede ser necesario restringir el acceso o cerrar el puente temporalmente.
Nivel 2 - Daños moderados Nivel 2 - Daños moderados	Daños más significativos que pueden incluir erosión considerable en los estribos o pilas, asentamientos diferenciales menores, socavación parcial de los cimientos, o acumulación de grandes cantidades de sedimentos y escombros. El puente aún es funcional, pero se requiere reparación para evitar daños mayores.
Nivel 1 - Daños menores	Daños superficiales o leves en el puente: erosión menor en los estribos o pilas, aproximaciones. Pequeños depósitos de sedimentos o escombros, o daños en barandas y otros elementos no estructurales. La funcionalidad del puente no se ve comprometida.
Nivel 0 - Sin daños	El puente no presenta daños visibles. El lahar no ha impactado la estructura de manera significativa y no se observan signos de desgaste, erosión o acumulación de sedimentos.

6.6.4 Conclusiones y recomendaciones acerca de la evaluación de la amenaza de los lahares

- Costa Rica, al encontrarse en una región volcánica activa, enfrenta múltiples amenazas volcánicas que pueden impactar significativamente la infraestructura vial nacional. Entre estas amenazas, los lahares han sido históricamente uno de los eventos más destructivos y continúan representando un peligro grave latente. Debido a su capacidad de causar daños severos, es crucial llevar a cabo las evaluaciones cartográficas, geológicas y probabilísticas que permitan realizar análisis exhaustivos. Estos análisis deben caracterizar y evaluar de antemano los efectos, impactos, daños y pérdidas.
- En este capítulo se ha descrito una metodología para la evaluación de los lahares, la cual puede ser adaptada y modificada para estudiar también otras amenazas volcánicas, la evaluación de la exposición de la infraestructura que podría ser impactada y, por lo tanto, la vulnerabilidad y el riesgo.
- Los puentes ubicados en regiones volcánicas son los eslabones más críticos de la red vial, debido a que son especialmente vulnerables ante los lahares. Dado que estos flujos laháricos pueden afectar estructuras a lo largo de toda la cuenca, es fundamental evaluar el riesgo específico para cada puente, considerando su ubicación y exposición a la amenaza. La modelación, la caracterización y la evaluación del riesgo son indispensables para garantizar la seguridad de estas infraestructuras.
- LAHARZ es una herramienta práctica y accesible para la modelación de lahares en contextos volcánicos. Es una opción útil para el estudio de esta amenaza y sus implicaciones en la infraestructura. No obstante, presenta limitaciones, ya que emplea algoritmos simplificados y depende tanto de la resolución del MNT como del volumen asignado al lahar. En el mercado existen otras opciones que se pueden valorar y sustituir a LAHARZ a la hora de requerir modelaciones más precisas de esta amenaza.
- El análisis de la vulnerabilidad física de los puentes es esencial para la determinación del riesgo ante los lahares. En Costa Rica, se dispone de fuentes de información robustas, como por ejemplo los datos del COSEVI-SAEP y el visor de puentes del Lanamme UCR. Estas permiten caracterizar la fragilidad de las estructuras de manera adecuada. En este capítulo fue descrita una metodología que facilita la evaluación.
- Los eventos de lahares más voluminosos son poco frecuentes, al menos en el contexto histórico de Costa Rica. Sin embargo, dada la exposición de la población y de la infraestructura del país, no es necesario que se produzcan eventos muy grandes para que sucedan impactos importantes. Los eventos relativamente pequeños, también pueden dejar fuera de servicio algunos puentes importantes en la red vial.
- El CGA, impulsado por el incremento de la temperatura atmosférica y por las modificaciones que sus escenarios puedan ocasionar, con respecto, por ejemplo, a las tendencias de las relaciones de la Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) de las lluvias, podría intensificar la amenaza de los lahares. Estas condiciones, en combinación con otras amenazas como los terremotos, aumentan la probabilidad de que los lahares afecten los puentes de manera más intensa y frecuente que en la actualidad.
- La definición de los niveles del daño en los puentes afectados por lahares es fundamental para la gestión del riesgo, ya que permite una evaluación rápida y estandarizada del estado estructural, lo cual facilita la priorización de los recursos y planificación de acciones de respuesta y recuperación. Este procedimiento permite optimizar la asignación de las intervenciones, mejora la comunicación entre los equipos técnicos y autoridades, y contribuye a la documentación precisa y análisis posterior al evento. Además, permite definir rangos donde amerita aplicar medidas de mitigación específicas para reducir la vulnerabilidad de la infraestructura ante eventos futuros. Sin embargo, la definición de la valoración del daño, a partir de una modelación, no es tan sencilla, aunque la plataforma LAHARZ da un resultado que permite asociarlo con daño, esto podría variar para otras plataformas de modelación.

- La valoración del daño en esta metodología se determina a partir del escenario modelado. Para el caso de que el lahar alcance el sitio en donde se ubica el puente, se analiza si su altura supera 1,5 m sobre el nivel base (Marzocchi et al., 2009). A partir de ello, se define si el evento tiene potencial de afectar partes del puente, por ejemplo sus pilares (si es que los presenta), los tramos de aproximación y sus bastiones. Se sobreentiende que, a diferentes porcentajes de la altura, podrá generarse un impacto mayor en el puente, hasta llegar a la superestructura, en cuyo caso podría destruirse.

7. Aspectos básicos para el análisis del riesgo sísmico en los puentes

7.1 Definición y contexto del riesgo sísmico

Los puentes son componentes críticos de los sistemas de transporte, cuya falla puede causar interrupciones significativas en la infraestructura vial, lo cual puede representar grandes pérdidas económicas directas e indirectas en la economía de un país o una región. La vulnerabilidad de los puentes se ha puesto de manifiesto en numerosos estudios y eventos sísmicos históricos. Se ha observado que los daños en estas estructuras, aunque no lleguen a causar su colapso, tienen un impacto significativo en la funcionalidad de las redes de transporte. Esto se debe a la importancia estratégica de los puentes dentro de líneas vitales para el tránsito y la logística que depende de ellas.

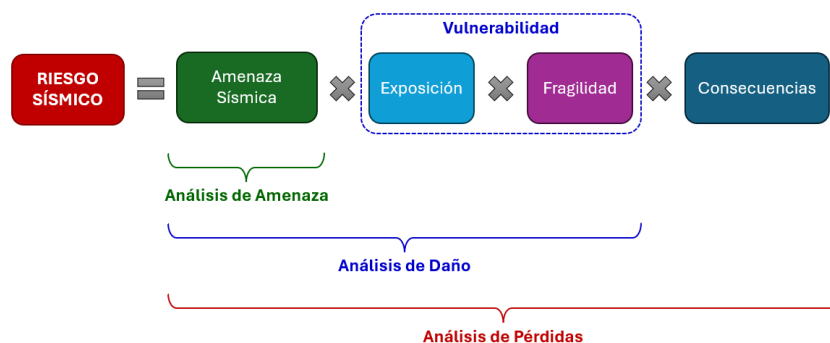
El riesgo sísmico se define como la probabilidad de que se produzcan daños físicos y pérdidas económicas como consecuencia de un evento sísmico. Este concepto integra tres componentes clave: la amenaza sísmica, la vulnerabilidad (i.e. exposición y fragilidad) y las consecuencias. Comprender estos elementos es fundamental para desarrollar las estrategias efectivas para la mitigación y respuesta ante las emergencias y desastres.

Entre las metodologías existentes para evaluar la fragilidad sísmica de los puentes, la metodología Hazus, desarrollada por la FEMA, se destaca por su amplia base de datos y su aplicabilidad a una gran variedad de tipologías de puentes. Esta metodología ha sido validada a través de evaluaciones de diferentes tipos de puentes en todo el territorio de los Estados Unidos, lo que ofrece un elevado grado de adaptabilidad para su aplicación en otros países del continente americano.

7.2 Metodología conceptual

Conceptualmente, la metodología para establecer el riesgo sísmico empieza con la cuantificación de la amenaza sísmica, utilizando el análisis de la amenaza. Seguidamente, se evalúa la vulnerabilidad de los puentes considerando su exposición y fragilidad. El análisis de daño esperado se realiza considerando la vulnerabilidad de los puentes y el nivel de amenaza sísmica a la que están sujetos. La determinación del riesgo sísmico se obtiene mediante el análisis de pérdidas. Al utilizar funciones de consecuencias, es posible calcular el monto económico asociado al nivel de daño esperado. La Figura 22 describe el proceso conceptual para la determinación del riesgo sísmico.

Figura 22. Proceso de análisis para la determinación del riesgo sísmico



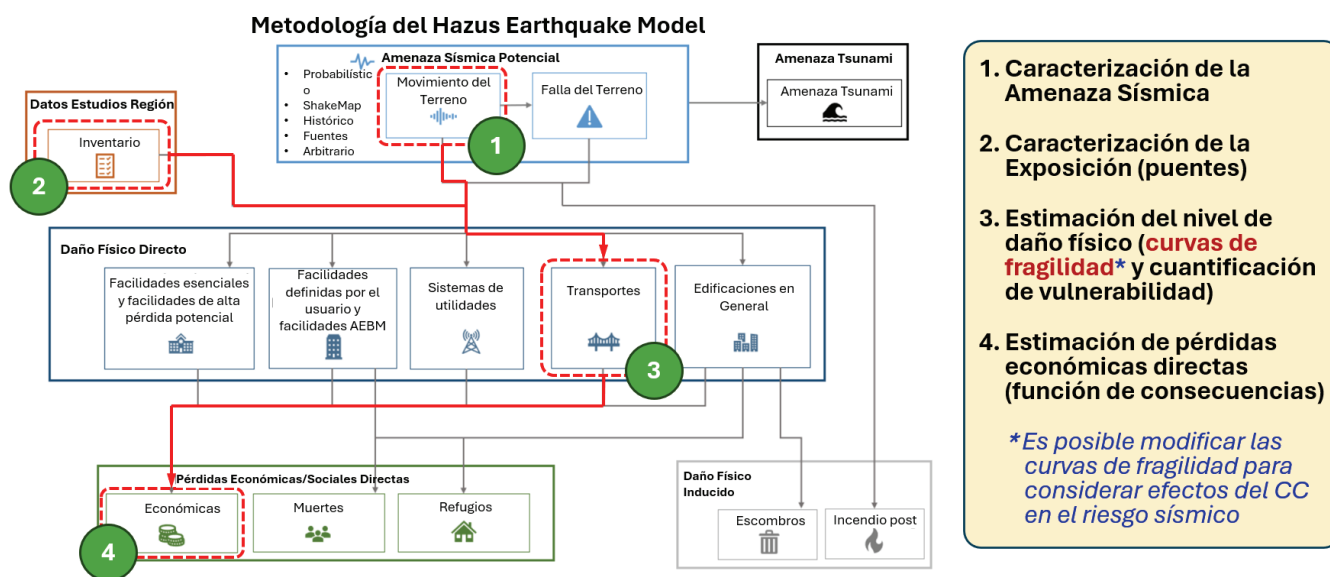
7.3 Metodología recomendada para el cálculo del riesgo sísmico

La metodología Hazus, desarrollada por la FEMA, se destaca por su amplia base de datos y su aplicabilidad a una gran variedad de tipologías de puentes. Esta metodología ha sido validada a través de estudios analíticos de diferentes tipos de puentes en todo el territorio de los Estados Unidos y ofrece un elevado grado de adaptabilidad para su aplicación en otros países del continente americano, en particular en aquellos países en los que se ha adoptado la normativa de diseño norteamericana. Tal es el caso de Costa Rica, donde los Lineamientos de Diseño Sismorresistente de Puentes del año 2013, adoptaron la normativa AASHTO LRFD como especificación aplicable al diseño de los puentes vehiculares y peatonales en el país.

7.3.1 Metodología Hazus para la evaluación del riesgo sísmico en los puentes

La metodología Hazus es una herramienta para el análisis del riesgo que permite estimar las pérdidas potenciales derivadas de la materialización intensa de los terremotos. Hazus se utiliza para evaluar los niveles de la amenaza sísmica, el daño estructural esperado, las pérdidas económicas y eventualmente, las consecuencias sociales y ambientales. La formulación de la metodología Hazus es muy conveniente para incorporar los efectos del cambio climático en la valoración del riesgo, puesto que permite la utilización de curvas de fragilidad modificadas para considerar esos efectos. La Figura 23 muestra el diagrama metodológico específico para Hazus en la forma en que se sugiere aplicar en esta guía.

Figura 23. Diagrama metodológico para la determinación del riesgo sísmico de acuerdo con Hazus

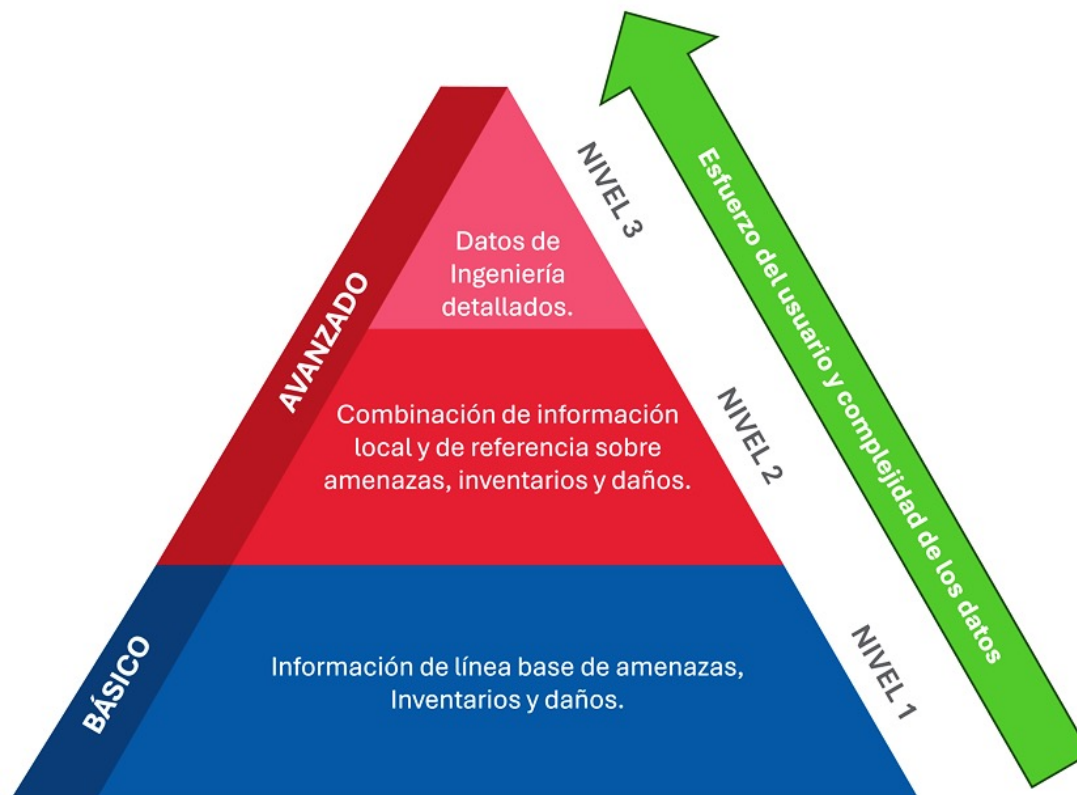


7.3.2 Niveles de información requerida

La metodología Hazus fue concebida para permitir dos tipos de análisis, el básico y el avanzado. El análisis básico utiliza información disponible de carácter general, la información de nivel 1. Esta información comúnmente se encuentra en los inventarios disponibles y la normativa sismorresistente. El análisis avanzado utiliza información más específica de las estructuras particulares que se pretenden analizar, la información de niveles 2 y 3. La información de nivel 3 se refiere usualmente a estudios locales específicos,

planos constructivos y otros criterios específicos para cada una de las estructuras que serán analizadas. El nivel 2 se refiere a una combinación de información local de nivel 3 e información general de inventario de nivel 1. La relación entre los niveles de información disponibles y los tipos de análisis se muestra en la Figura 24.

Figura 24. Niveles de análisis, de acuerdo con la metodología Hazus (FEMA, 2022)



7.4 Análisis de la amenaza sísmica

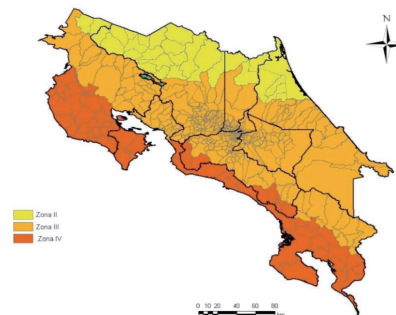
La amenaza sísmica se define como la probabilidad de excedencia de un determinado nivel de intensidad del movimiento del terreno, como resultado de la acción de un sismo en una determinada área de influencia y durante un período especificado (Red Sismológica Nacional, 2010). Esta probabilidad se determina mediante el análisis de la sismicidad histórica y la actividad tectónica en la región estudiada. La magnitud del posible terremoto, su ubicación geográfica y las condiciones topográficas y geológicas influyen significativamente en la intensidad de la amenaza sísmica.

7.4.1 Cuantificación de la amenaza sísmica

La cuantificación de la amenaza sísmica consiste en determinar la intensidad de la sacudida que el terreno tendrá durante la ocurrencia de un evento sísmico. Desde el punto de vista ingenieril, existen varias medidas de intensidad sísmica, como la aceleración pico del terreno (PGA) o las pseudoaceleraciones espectrales en períodos característicos (PSa). La amenaza sísmica puede cuantificarse de varias formas, algunas de las cuales se presentan en la Tabla 17, según el nivel de información que propone Hazus.

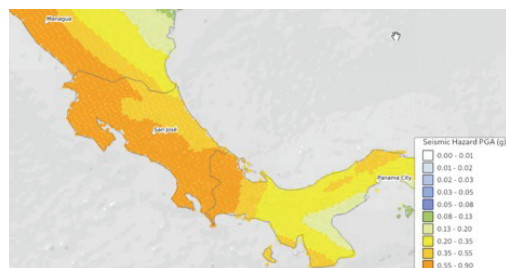
Tabla 17. Niveles de análisis para la cuantificación de la amenaza sísmica según la información disponible, de acuerdo con la metodología Hazus (FEMA, 2022).

Nivel 1:
Normativa sismorresistente (LDSP-2013)



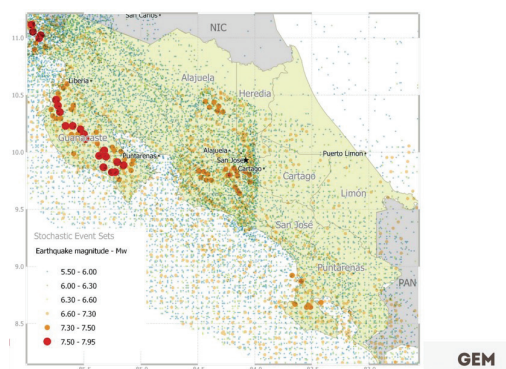
Nivel 2:
Análisis Probabilístico de Amenaza Sísmica (PSHA):

- Escala regional
- Escala local



Nivel 3:
Análisis Determinístico de Amenaza Sísmica (DSHA):

- Evento único
- Eventos estocásticos

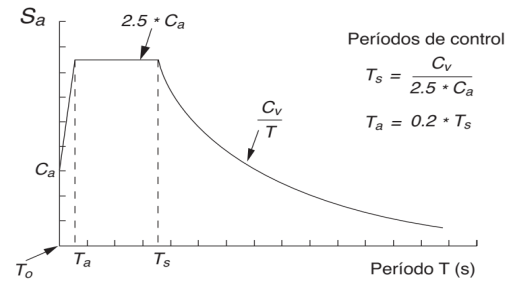


7.4.2 Representación de la amenaza sísmica

La representación de la amenaza sísmica es el artificio matemático que pretende simular las características más importantes de la amenaza sísmica, desde el punto de vista del análisis estructural. Consiste en las diferentes formas en que los efectos de la vibración del terreno pueden ser incorporados a la estructura para determinar su respuesta ingenieril. La amenaza sísmica puede representarse de varias formas, algunas de las cuales se presentan en la Tabla 18, según el nivel de información que propone Hazus.

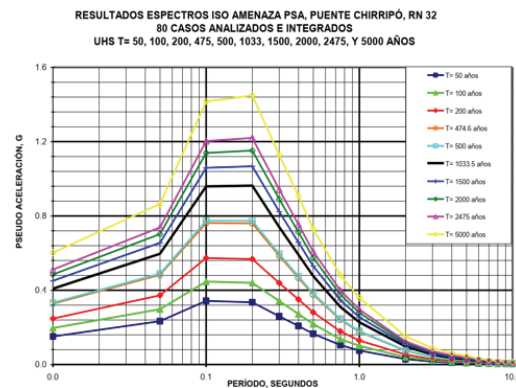
Tabla 18. Representación de la amenaza sísmica según el nivel de información disponible, de acuerdo con la metodología Hazus (FEMA, 2022).

Nivel 1:
Espectro de diseño basado en la normativa sismorresistente (LDSP-2013)



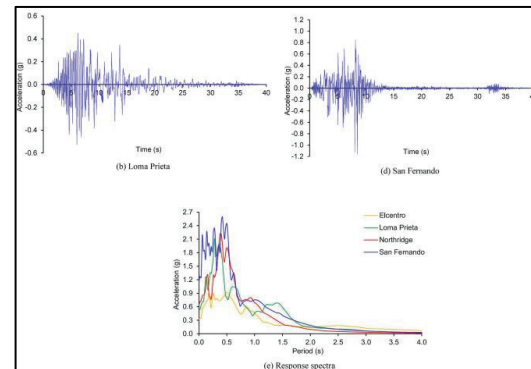
Nivel 2:
Espectros de amenaza específicos para el sitio, usualmente derivados de un PSHA:

- Amenaza Uniforme (UHS)
- Media Condicional (CMS)



Nivel 3:
Historia de aceleraciones de eventos compatibles con el espectro de amenaza:

- Señales naturales escaladas
- Señales simuladas



7.4.3 Efectos de falla cercana

La cercanía a la traza de la falla generadora del evento sísmico genera un frente de ondas vibracionales que hace que el terreno se sacuda con mayor intensidad, en comparación con un sitio ubicado en la lejanía de la misma falla (ver Figura 25).

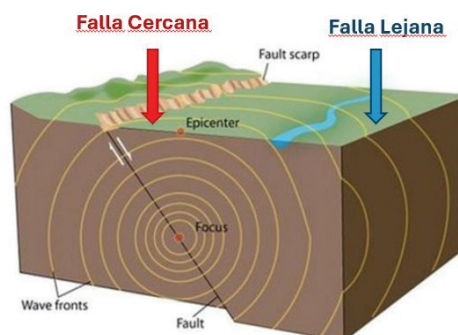
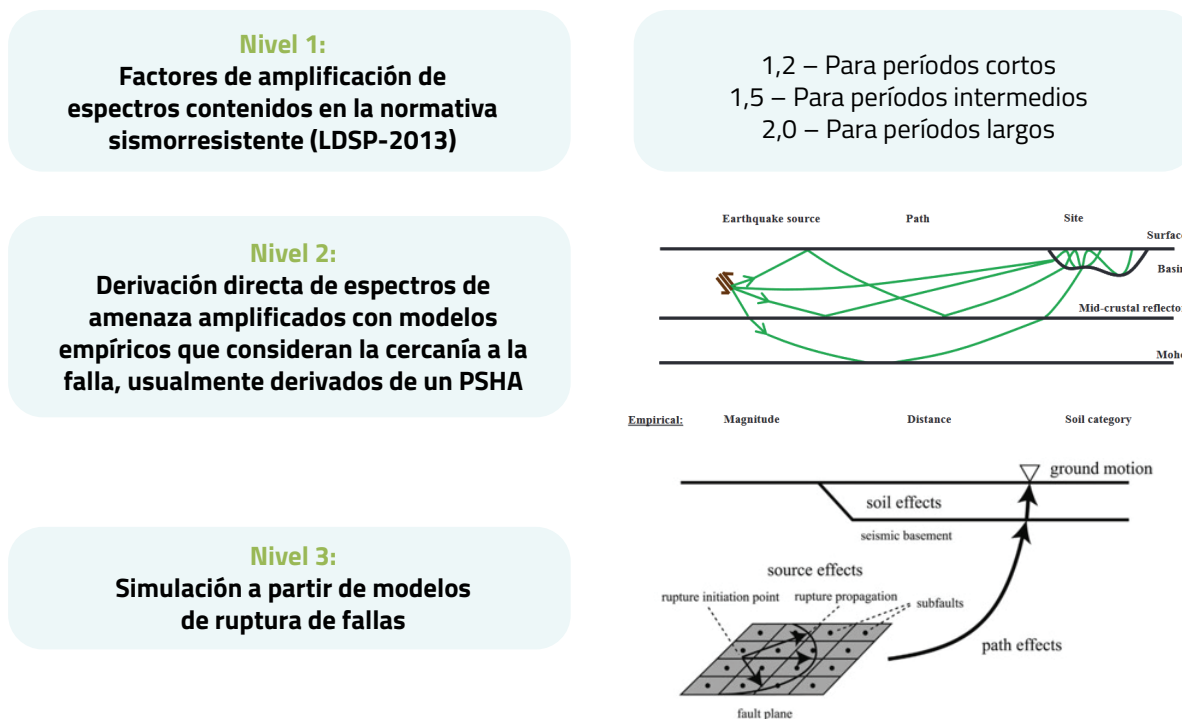


Figura 25. Representación gráfica del efecto de amplificación de la intensidad sísmica por presencia de falla cercana (Modificado de <https://www.i-fink.com/what-causes-earthquakes/>)

Los efectos de falla cercana pueden ser considerados de varias formas, algunas de las cuales se presentan en la Tabla 19, según el nivel de información que propone Hazus.

Tabla 19. Formas de considerar los efectos de la presencia de falla cercana según el nivel de información disponible



7.4.4 Parámetros de amenaza como entrada para la metodología Hazus

Para aplicar la metodología Hazus en la estimación del riesgo sísmico de los puentes, se deben seleccionar los periodos de recurrencia para los cuales se hará el análisis. Como mínimo, se recomienda utilizar 1033 años y 2475 años, que corresponden a las sacudidas sísmicas de diseño para puentes esenciales y críticos, respectivamente, de acuerdo con la normativa aplicable para el diseño sismorresistente de los puentes en Costa Rica. Sin embargo, para poder obtener una mejor distribución de las pérdidas, conviene que el análisis del riesgo considere adicionalmente otros periodos de recurrencia, según se listan en la Tabla 20.

Tabla 20. Periodos de recurrencia de la sacudida sísmica para el análisis del riesgo

Probabilidad de excedencia, PE (%)	Vida útil, N (años)	Periodo de recurrencia, PR (años)
50.0%	75	109
14.0%	75	498
7.0%	75	1033
5.0%	75	1463
4.0%	75	1838
3.0%	75	2475

Para cada periodo de recurrencia, e independientemente de la representación de la amenaza sísmica y del método para cuantificación de la amenaza que se decida utilizar, la aplicación de la metodología Hazus requiere conocer los siguientes parámetros de amenaza sísmica:

- Aceleración pico efectiva (PGA)
- Aceleración espectral para período de vibración de 0.3 segundos
- Aceleración espectral para período de vibración de 1.0 segundo

Todas las aceleraciones deben, además, considerar los efectos de la amplificación según el tipo de suelo y los efectos de falla cercana en caso de ser aplicables. La equivalencia entre los tipos de suelo de Hazus y los de la normativa costarricense se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21. Equivalencia entre la nomenclatura de los tipos de suelo usados en la normativa estadounidense y la usada en la normativa costarricense

Tipo de suelo USA (Hazus)	Tipo de suelo Costa Rica (LDSP-2013)
A	n/a
B	S1
C	S2
D	S3
E	S4
n/a	S5

7.5 Vulnerabilidad y análisis de daño (exposición y fragilidad)

La vulnerabilidad ante la amenaza sísmica se refiere a la susceptibilidad de daños que una estructura presenta ante los efectos de un evento sísmico. Este concepto es crucial para entender y aproximar el nivel probable de daño que diferentes tipos de estructuras pueden llegar a tener cuando son sometidas a movimientos sísmicos. En el contexto de la metodología Hazus, la evaluación de la vulnerabilidad se lleva a cabo mediante el análisis de la exposición y la fragilidad de los elementos expuestos. La caracterización de la exposición y la fragilidad pueden ser consideradas de varias formas, algunas de las cuales se presentan en la Tabla 22, según el nivel de información que propone Hazus.

Tabla 22. Niveles para la caracterización de la exposición y la fragilidad según Hazus (FEMA, 2020)

	Exposición	Fragilidad
Nivel 1	Inventario de puentes: a) SAEP, rutas nacionales b) Municipalidades, rutas cantonales	Método simplificado: a) Criterio de expertos
Nivel 2	Reportes de inspección: a) De inventario b) Detallada c) De emergencia o específica	Método empírico: a) Curvas de fragilidad paramétricas preestablecidas b) Según características ingenieriles del puente
Nivel 3	Documentos técnicos: a) Planos constructivos b) Memorias de cálculos c) Ensayos de materiales	Métodos avanzados, para la estructura específica: a) Analíticos b) Experimentales c) Híbridos

7.5.1 Determinación de la exposición

Los elementos del entorno construido que podrían verse afectados por eventos sísmicos se denominan colectivamente como la exposición. En los proyectos de infraestructura vial, normalmente se refiere a los puentes vehiculares, pasos a desnivel y otras estructuras mayores. Generalmente, dentro del contexto del análisis del riesgo se establece la exposición como uno de los factores que componen el concepto vulnerabilidad, en conjunto con la fragilidad, el valor económico y social, y el daño potencial a la vida humana, al ambiente y los recursos naturales. Así pues, el término de “exposición” se puede definir también como la condición de desventaja debida a la ubicación, posición o localización de un elemento, sujeto, objeto o sistema expuesto a una amenaza (Centro Internacional para la Investigación de El Niño, s. f.). La exposición se puede caracterizar por su densidad, tipología, antigüedad y distribución espacial. Además, en el contexto de la ingeniería civil es importante considerar cómo las características específicas de los puentes influyen en su desempeño sísmico y, por ende, en el riesgo global asociado a un terremoto.

7.5.1.1 Clasificación de los puentes según su tipología estructural

Para evaluar la vulnerabilidad estructural de cada puente a través de la aplicación de la metodología Hazus (FEMA, 2022), estos deben clasificarse según las categorías definidas en la sección 7.1.3 del manual. Estas categorías se definen a partir de sus características estructurales y consideran los siguientes aspectos:

- Diseño sismorresistente, considerado con base en los siguientes factores:
 1. Factor de modificación del espectro
 2. Factor de reducción de la resistencia, según el movimiento cíclico predominante
 3. Límites de deriva
 4. Proporción (ratio) del refuerzo longitudinal
- Número de tramos: puentes de un solo tramo o de tramos múltiples
- Tipo de estructura (material): Concreto, acero, etc.
- Tipo de pilas: columna sencilla, columna múltiple, muro
- Tipo de bastión y condición del apoyo: monolítico, no monolítico, fijo, móvil, neopreno
- Tipo de aislamiento en las pilas
- Continuidad en los tramos: simplemente apoyado, continuo

Con base en estas características, se puede definir un total de 28 clases, según la combinación de todos los escenarios posibles, designadas como HWB1 a HWB28, tal como se muestra en la Tabla 23. Las columnas mostradas, referentes a los parámetros K3D e I-shape, no corresponden a las características propias del puente como tal. Se trata de parámetros dependientes de la clase Hazus usados para el cálculo de ciertos factores de ajuste para la construcción de las curvas de fragilidad; este procedimiento se explicará en otras secciones más adelante.

Tabla 23. Esquema de clasificación de puentes según Hazus(FEMA, 2022).

Clase	Clase NBI	*CA/ No CA	Año de constr.	Longitud de tramo mayor	K_{30}	I-shape	Diseño	Descripción
HWB1	Todas	No CA	<1990	> 150	EQ1	0	No sismorresistente	Puente mayor – Long. >150 m
HWB1	Todas	CA	<1975	> 150	EQ1	0	No sismorresistente	Puente mayor – Long. >150 m
HWB2	Todas	No CA	>=1990	> 150	EQ1	0	Sísmico	Puente mayor – Long. >150 m
HWB2	Todas	CA	>=1975	> 150	EQ1	0	Sismorresistente	Puente mayor – Long. >150 m
HWB3	Todas	No CA	<1990	N/A	EQ1	0	No sismorresistente	Un solo tramo
HWB3	101-106	CA	<1975	N/A	EQ1	0	No sismorresistente	Un solo tramo
HWB4	101-106	No CA	>=1990	N/A	EQ1	0	Sismorresistente	Un solo tramo
HWB4	101-106	CA	>=1975	> N/A	EQ1	0	Sismorresistente	Un solo tramo
HWB5	101-106	No CA	<1990	N/A	EQ1	0	No sismorresistente	Pila de columna múltiple. Simplemente apoyado. Concreto
HWB6	205-206	CA	<1975	N/A	EQ1	0	No sismorresistente	Pila de columna múltiple. Simplemente apoyado. Concreto
HWB7	205-206	No CA	>=1990	N/A	EQ1	0	Sísmico	Pila de columna múltiple. Simplemente apoyado. Concreto
HWB7	201-206	CA	>=1975	N/A	EQ1	0	Sísmico	Pila de columna múltiple. Simplemente apoyado. Concreto
HWB8	201-206	CA	<1975	N/A	EQ2	0	No sismorresistente	Pila de columna sencilla. Viga cajón. Continuo. Concreto

Clase	Clase NBI	*CA/ No CA	Año de constr.	Longitud de tramo mayor	K_{3D}	I-shape	Diseño	Descripción
HWB9	205-206	CA	≥ 1975	N/A	EQ3	0	Sísmico	Pila de columna sencilla. Viga cajón. Continuo, Concreto
HWB10	201-206	No CA	< 1990	N/A	EQ2	1	No sismorresistente	Continuo, Concreto
HWB10	201-206	CA	< 1975	N/A	EQ2	1	No sismorresistente	Continuo, Concreto
HWB11	201-206	No CA	≥ 1990	N/A	EQ3	1	Sísmico	Continuo, Concreto
HWB11	201-206	CA	< 1975	N/A	EQ3	1	Sísmico	Continuo, Concreto
HWB12	301-306	No CA	< 1990	No	EQ4	0	No sismorresistente	Pila de columna múltiple. Simplemente apoyado. Acero
HWB13	301-306	CA	< 1975	N/A	EQ4	0	No sismorresistente	Pila de columna múltiple. Simplemente apoyado. Acero
HWB14	301-306	No CA	≥ 1990	N/A	EQ1	0	Sísmico	Pila de columna múltiple. Simplemente apoyado. Acero
HWB14	301-306	No CA	≥ 1975	N/A	EQ1	0	Sísmico	Pila de columna múltiple. Simplemente apoyado. Acero
HWB15	402-410	No CA	< 1990	No	EQ5	1	No sismorresistente	Continuo, Acero
HWB15	402-410	CA	< 1975	No	EQ5	1	No sismorresistente	Continuo, Acero
HWB16	402-410	No CA	≥ 1990	N/A	EQ3	1	Sísmico	Continuo, Acero
HWB16	402-410	CA	≥ 1975	N/A	EQ3	1	Sísmico	Continuo, Acero

Clase	Clase NBI	*CA/ No CA	Año de constr.	Longitud de tramo mayor	K_{3D}	I-shape	Diseño	Descripción
HWB17	501-506	No CA	<1990	N/A	EQ1	0	No sismorresistente	Simplemente apoyado, Pila de columna múltiple. Concreto Pre-esforzado
HWB18	501-506	CA	<1975	N/A	EQ1	0	No sismorresistente	Simplemente apoyado, Pila de columna múltiple. Concreto Pre-esforzado
HWB19	501-506	No CA	≥1990	N/A	EQ1	1	Sismorresistente	Simplemente apoyado, Pila de columna múltiple. Concreto Pre-esforzado
HWB19	501-506	CA	≥1975	N/A	EQ1	0	Sismorresistente	Simplemente apoyado, Pila de columna múltiple. Concreto Pre-esforzado
HWB20	605-606	CA	<1975	N/A	EQ2	0	No sismorresistente	Pila de columna sencilla. Viga Cajón. Pre-esforzado. Continuo. Concreto
HWB21	605-606	CA	≥1975	N/A	EQ3	0	Sismorresistente	Pila de columna sencilla. Viga Cajón. Pre-esforzado. Continuo. Concreto
HWB22	601-607	No CA	<1990	N/A	EQ2	1	No sismorresistente	Continuo, Concreto
HWB22	601-607	CA	<1975	N/A	EQ2	1	No sismorresistente	Continuo, Concreto
HWB23	601-607	No CA	≥1990	N/A	EQ3	1	Sismorresistente	Continuo, Concreto
HWB23	601-607	CA	≥1975	N/A	EQ3	1	Sismorresistente	Continuo, Concreto
HWB24	301-306	No CA	<1990	Yes	EQ6	0	No sismorresistente	Pila de columna múltiple. Simplemente apoyado. Acero
HWB25	301-306	CA	<1975	Yes	EQ6	0	No sismorresistente	Pila de columna múltiple. Simplemente apoyado. Acero
HWB26	402-410	No CA	<1990	Yes	EQ7	1	No sismorresistente	Continuo, Concreto
HWB27	402-410	CA	<1975	Yes	EQ7	1	No sismorresistente	Continuo, Concreto
HWB28	-	-	-	-	-	-	-	Todos los demás puentes no clasificados

*CA: Puentes construidos dentro del estado de California, No CA: Puentes construidos fuera del estado de California.

7.5.1.2 Sistema de clasificación de puentes del National Bridge Inventory (NBI)

En la última columna de la Tabla 23 se indica una descripción de las características principales de los puentes para cada categoría. Sin embargo, si es basada sólo en esa información, es difícil clasificar los puentes que comparten algunas de esas características y, por consiguiente, podrían aplicarse en varias de las categorías. La segunda columna denominada “clase NBI” corresponde a la clasificación de los puentes según los parámetros establecidos por el National Bridge Inventory (NBI) de los Estados Unidos. Esta clasificación considera aspectos como el tipo de apoyo, material, número de tramos y tipología de la superestructura (por ejemplo, puentes tipo losa, vigas múltiples, viga cajón, cercha, etc.). Además, distingue entre diferentes materiales como concreto reforzado, concreto presforzado, acero, entre otros parámetros (Muñoz, 2015). Los lineamientos para la clasificación de los puentes según la NBI se pueden encontrar en el Manual de Inventario de Puentes y Alcantarillas Grandes del Departamento de Transportes del estado de Nueva York (New York State Department of Transportation, 2020). El sistema de clasificación del NBI ofrece una codificación de tres dígitos, en la que se consideran los siguientes aspectos:

a. Tipo de material del tramo principal. Corresponde al primer dígito del código numérico, el cual se determina como sigue:

1. Concreto	7. Madera
2. Concreto (continuo)	8. Mampostería
3. Acero	9. Aluminio, hierro forjado o hierro fundido
4. Acero (continuo)	0. Otros
5. Concreto presforzado	A. Acero sin pintar
6. Concreto presforzado (continuo)	B-A. Acero sin pintar (continuo)

b. Tipología del tramo principal. Corresponde al segundo y tercer dígito del código, y se determina según la tipología estructural de la superestructura. Por ejemplo, en puentes de varios tramos, el tramo principal se define como el de mayor longitud. La codificación para estos casos se realiza según se indica a continuación:

01. Losa	13. Colgante
02. Vigas múltiples	14. Atirantado
03. Pony/Bailey	15. Puente móvil (ascensor)
04. Vigas T	16. Puente móvil (basculante)
05. Vigas cajón (múltiples celdas)	17. Puente móvil (columpio)
06. Vigas cajón (sencillo)	18. Túnel
07. Marco/pórtico	19. Alcantarilla
08. Ortotrópico	20. *No definido en la guía
09. Cercha (paso superior)	21. Viga cajón segmental
10. Cercha (paso intermedio o inferior)	22. Viga canal
11. Arco (paso superior)	23. Vigas “I”
12. Arco (paso intermedio)	00. Otros

Ejemplo: Con base en las definiciones anteriores, para codificar la superestructura de un puente continuo, de vigas cajón de concreto pre-esforzado con varios tramos, se tomaría como primer dígito el número 6 (Concreto presforzado - continuo), seguido del número 06 (Vigas cajón – sencillo), con lo cual se obtiene la clase NBI = 606.

7.5.2 Determinación de la fragilidad

Uno de los componentes fundamentales de la metodología Hazus, es el desarrollo de funciones de fragilidad, las cuales representan la probabilidad de que una estructura alcance o exceda un determinado estado de daño, según la distribución de la variable aleatoria que describe la intensidad sísmica (FEMA, 2022). Seguidamente, se explicará el procedimiento para elaborar las curvas de fragilidad, según Hazus, y se detallarán los pasos necesarios para desarrollar estas curvas y su aplicación en la evaluación del riesgo.

7.5.2.1 Principios básicos

La evaluación de la fragilidad ante las solicitaciones sísmicas se basa en la identificación y cuantificación de los factores que influyen en el comportamiento estructural de los puentes. La metodología Hazus utiliza modelos matemáticos y estadísticos para simular el desempeño de diferentes tipos de estructuras, bajo condiciones sísmicas diversas. Estos modelos consideran las características geométricas, materiales de construcción, propiedades dinámicas de las estructuras y la intensidad del movimiento sísmico (FEMA, 2022). La combinación de estos factores permite desarrollar curvas de fragilidad empíricas, que pueden ser utilizadas para la cuantificación del riesgo y la planificación de las estrategias de mitigación correspondientes.

7.5.2.2 Desarrollo de las curvas de fragilidad

La evaluación de la fragilidad estructural se sustenta en varias ramas de la ingeniería, que incluyen la teoría de la probabilidad, la mecánica estructural y la dinámica de las estructuras. Para un puente específico, usualmente no es posible determinar con exactitud el nivel de movimiento del terreno necesario para alcanzar un determinado nivel de respuesta o estado de daño. Esto se debe a la naturaleza aleatoria de la ruptura sísmica, además de a las suposiciones y simplificaciones que usualmente se introducen en la evaluación de las propiedades de los materiales y otros atributos estructurales que influyen en su capacidad total. Las evaluaciones determinísticas también requieren suposiciones sobre el movimiento del suelo y las condiciones del sitio. Estos factores influyen en la demanda sísmica, dado que sus valores no son precisos, pues presentan variabilidad e incertidumbre inherentes. Una forma cada vez más común de representar la naturaleza probabilística de estos procesos es mediante el uso de curvas de fragilidad (Buckle, y otros, 2006).

Según Buckle et al. (2006), si la capacidad estructural y la demanda sísmica son variables aleatorias, que se aproximan a una distribución normal o log-normal, según el teorema del límite central, se puede demostrar que el resultado combinado del desempeño seguirá una distribución log-normal. Por consiguiente, la distribución probabilística se representa mediante una curva de fragilidad basada en la función de densidad de probabilidad acumulada log-normal. Para definir esta curva se requieren dos parámetros: un valor de mediana (el percentil 50) y una desviación estándar logarítmica normalizada. La expresión general, para definir las curvas, se muestra en la ecuación (1).

$$1) \quad F(S_a) = \Phi \left[\frac{1}{\beta_c} \ln \ln \left(\frac{S_a}{A_i} \right) \right]$$

...en donde:

- Φ = Función de distribución normal estándar acumulativa. S_a = Aceleración espectral para un período de vibración $T = 1,0s$.
- β_c = Desviación logarítmica normal compuesta normalizada que incorpora aspectos de incertidumbre y aleatoriedad tanto para la capacidad como para la demanda.
- A_i = Mediana de aceleración espectral necesaria para provocar que se produzca el i -ésimo estado de daño.

Los valores β y S_a , para cada grado de daño, están relacionados con el desarrollo del análisis de la capacidad y fragilidad de cada tipo de estructura. Para las curvas utilizadas, $\beta = 0,6$ (Buckle, y otros, 2006) y los valores de S_a dependen de cada clase de puente. De acuerdo con Buckle, et al. (2006), evaluar la función de distribución acumulativa no es trivial, ya que es necesaria una integración numérica considerable. Sin embargo, la curva de fragilidad se puede establecer mediante funciones intrínsecas que se encuentran en la mayoría de los programas informáticos y en hojas de cálculo. En caso de que no se cuente con estas herramientas, se puede usar, como alternativa, la expresión mostrada en la ecuación (2), la cual ofrece una aproximación bastante cercana a la ecuación (1).

$$2) \quad P[S_a] = \frac{1}{1 + \left(\frac{S_a}{A_i}\right)^{\frac{1.7}{\beta_c}}}$$

... en donde $P[D > D_{Si} | S_a]$ es la probabilidad de alcanzar un estado de daño D igual o mayor que D_{Si} para una aceleración espectral S_a , para un período estructural $T = 1,0$ s, D_{Si} es el i -ésimo estado de daño descrito como:

De acuerdo con las definiciones de Hazus (FEMA, 2022), los estados del daño se definen como:

- **Daño Nulo (Ds1):** Estructura intacta, sin daños.
- **Daño ligero (Ds2):** Grietas y desprendimientos menores en la pila, grietas en las llaves de corte en los bastiones, desprendimientos y grietas menores en las rótulas, desprendimientos menores en la columna (donde el daño no requiere más que una reparación superficial), o grietas menores en el tablero.
- **Daño Moderado (Ds3):** Alguna columna muestra grietas o rupturas moderadas por cortante, pero continúa siendo segura estructuralmente; desplazamientos moderados de los bastiones (menores de 5 cm), cualquier conexión que presente grietas debidas a corte, falla de los apoyos, asentamientos moderados en las rampas de aproximación.
- **Daño Extenso (Ds4):** Alguna columna se degrada, pero sin llegar al colapso, debido a una falla por cortante (estructuralmente insegura); movimiento residual significativo en las conexiones, asentamientos importantes, desplazamiento vertical del bastión, asentamiento diferencial en las conexiones o falla en las llaves de cortante en los bastiones.
- **Daño Completo (Ds5):** Se define por el colapso de cualquier columna y la pérdida total de soporte de la conexión en el apoyo, lo que puede provocar un colapso inminente de la superestructura o la inclinación de la subestructura, debido a una falla en los cimientos.

7.5.2.3 Procedimiento para la construcción de las funciones de fragilidad

Para desarrollar las curvas de fragilidad en un puente, deben considerarse varios factores: Primero, su clasificación estructural, la cual se determina como fue mostrado en la sección precedente y que incluye las características geométricas del tipo de puente, su edad, diseño estructural y materiales de construcción, entre otras variables. En segundo lugar, las curvas dependen de la demanda sísmica, la cual se describe mediante la PGA y la aceleración espectral (S_a) para dos períodos de vibración específicos de la estructura ($S_a(0,3s)$ y $S_a(1,0s)$). Estos parámetros dependen, a su vez, del tipo de sitio de cimentación y las características sísmológicas locales.

Como resultado de la aplicación de las curvas de fragilidad, se obtiene las probabilidades de que el puente alcance cinco niveles posibles de daño: nulo (sin daños), ligero, moderado, extenso, y completo (colapso). Estos niveles se definen en la sección 7.1.4 del manual Hazus (FEMA, 2022) y se mencionaron en la sección anterior. El manual Hazus 5.1 proporciona lineamientos específicos para la elaboración de las curvas de fragilidad, los cuales se describen a continuación. En la sección 7.1.6.2 del manual Hazus (FEMA, 2022) se describe el algoritmo de cálculo para estimar el daño en los puentes. El procedimiento se divide en varios pasos, los cuales se indican a continuación:

1. Obtener las coordenadas geográficas de cada puente (longitud y latitud), la clase de puente (HWB1 a HWB28), número de tramos (N), ángulo de esviaje (α), longitud total del puente (L) y longitud máxima entre tramos (Lmax)
2. Evaluar las características sísmicas del sitio de emplazamiento. El movimiento estará caracterizado por la PGA y las aceleraciones espectrales para $S_a(0,3s)$ y $S_a(1,0s)$ del espectro de demanda sísmica. Estos factores pueden derivarse de espectros de respuesta construidos mediante el procedimiento general descrito en los Lineamientos de Diseño Sismo-Resistente para Puentes, o a partir de los Espectros de Peligro Uniforme, generados a partir de estudios específicos de amenaza sísmica.
3. Calcular los siguientes factores de modificación, relacionados con la asimetría y número de tramos de cada puente:

a) Kskew: es un factor de modificación relacionado con el ángulo de esviaje " α " en cada puente, el cual se define como:

$$3) \quad K_{skew} = \sqrt{\sin(90 - \alpha)}$$

b) Kshape : Es un modificador que ajusta las respuestas sísmicas de períodos cortos a una amplitud espectral equivalente a un período de $T = 1,0$ segundo. Este ajuste se determina mediante el parámetro booleano I_{shape} , específico para cada clase de puente (ver Tabla 21). Si $I_{shape} = 0$, el factor K_{shape} no se aplica. Cuando $I_{shape} = 1$, se aplica el factor K_{shape} , el cual se calcula como:

$$4) \quad K_{shape} = \frac{2.5 * S_a(1s)}{S_a(0.3s)}$$

c) K3D: Es un factor que ajusta la capacidad bidimensional de los pilares, permite considerar la acción tridimensional del arco en la plataforma. Este factor no se aplica a los puentes de un solo tramo y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$5) \quad K_{3D} = 1 + \frac{A}{N - B}$$

... en donde:

- N = Número de tramos del puente ($N > 1$)
- A, B = Coeficientes asignados según la clasificación estructural del puente, como se describe en la sección 7.4.1.1.

Para cada clase Hazus, se especifica un valor de EQ (EQ1 – EQ7), los cuales determinan los valores de A y B, según se muestran en la Tabla 18.

Tabla 24. Coeficientes para evaluar K_{3D} . Fuente: (FEMA, 2022).

Ecuación	A	B	K_{3D}
EQ1	0.25	1	$1+0.25/(N-1)$
EQ2	0.33	0	$1+0.33/(N)$
EQ3	0.33	1	$1+0.33/(N-1)$
EQ4	0.09	1	$1+0.09/(N-1)$
EQ5	0.05	0	$1+0.05/(N)$
EQ6	0.20	1	$1+0.20/(N-1)$
EQ7	0.10	2	$1+0.10/(N)$

4. Modificar los valores estándar de las medianas de la aceleración de las curvas de fragilidad para S_a (1,0s), según aparecen en la Tabla 7-6 del Manual Hazus (FEMA, 2022) y que caracterizan cada clase Hazus. Las medianas nuevas se obtienen mediante las ecuaciones (6) a (9):

$$6) \text{ Nueva mediana (daño ligero)} = \text{Mediana original(Daño ligero)} * \text{Factor}_{slight}$$

...en donde:

$$\text{Factor}_{slight} = 1, \text{ si } I_{shape} = 0 \\ = (1, K_{shape}), \text{ si } I_{shape} = 1$$

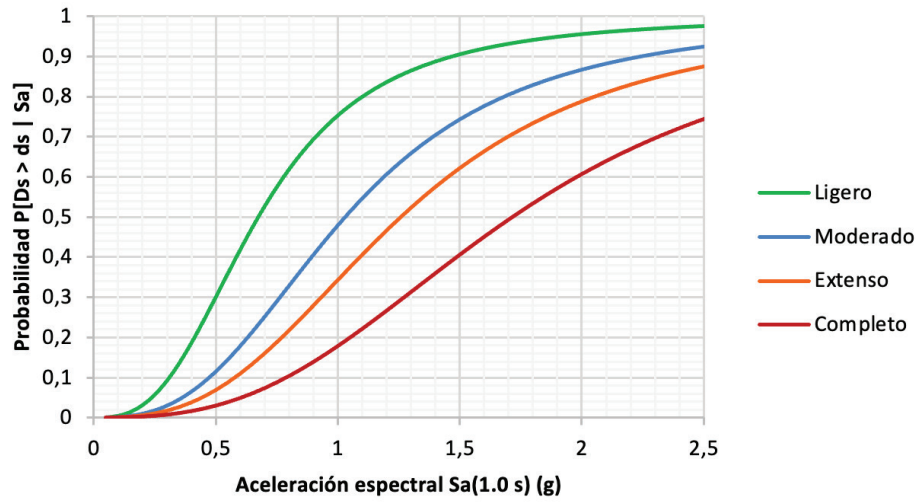
$$7) \text{ Nueva mediana (daño moderado)} = \text{Mediana original(Daño moderado)} * K_{skew} * K_{3D}$$

$$8) \text{ Nueva mediana (daño extenso)} = \text{Mediana original(Daño extenso)} * K_{skew} * K_{3D}$$

$$9) \text{ Nueva mediana (daño completo)} = \text{Mediana original(Daño completo)} * K_{skew} * K_{3D}$$

5. Utilizar las nuevas medianas con el factor de dispersión $\beta=0.6$ para definir las curvas de fragilidad finales para cada puente usando la ecuación (1) o la ecuación (2), y evaluar las probabilidades de alcanzar distintos grados de daño por el movimiento sísmico esperado. Para cada puente y cada período de recurrencia del sismo de diseño (1033 años y 2475 años) se determina las curvas para los cuatro niveles de daño. En la Figura 26 se muestra un ejemplo de cómo se representan las curvas de fragilidad.

Figura 26. Curvas de fragilidad para caracterizar la probabilidad de los niveles del daño de un puente, según la aceleración espectral escogida y de acuerdo con la metodología Hazus



6. Calcular la probabilidad de que se alcance un estado de daño discreto determinado (e.g. $P[DS = dsi | S_a]$), a partir de las probabilidades de excedencia de cada estado de daño (al estar en o excediendo un estado de daño específico ($P[DS \geq dsi | S_a]$)). En este caso, cada nivel de daño se representa mediante un coeficiente que varía de: 0 = nulo, 1 = leve, 2 = moderado, 3 = extenso, 4 = completo. Dado esto, las probabilidades del daño discreto se obtienen a partir de las curvas de fragilidad, mediante las siguientes ecuaciones:

$$10) P_0 = P[S_a(1s)] = 1 - P[S_a(1s)]$$

$$11) P_1 = P[S_a(1s)] = P[S_a(1s)] - P[S_a(1s)]$$

$$12) P_2 = P[S_a(1s)] = P[S_a(1s)] - P[S_a(1s)]$$

$$13) P_3 = P[S_a(1s)] = P[S_a(1s)] - P[S_a(1s)]$$

$$14) P_4 = P[S_a(1s)] = P[S_a(1s)]$$

7. Estimar el índice del daño medio, representativo del grado de daño predominante de cada estructura, con base en las probabilidades del estado del daño discreto, para cada uno de los grados del daño definido. Este valor se puede estimar mediante la expresión siguiente:

$$15) IDM = \sum_{i=0}^4 DR_i * P[ds_i]$$

...en donde:

DR_j = coeficiente que representa el nivel del daño (0 = nulo, 1 = leve, 2 = moderado, 3 = extenso, 4 = completo)

$P[ds_j]$ = Probabilidad de alcanzar un nivel de daño dado según las curvas de fragilidad.

La ecuación 15 se puede reescribir entonces como:

$$16) IDM = 0 * D_{nulo} + 1 * D_{ligero} + 2 * D_{moderado} + 3 * D_{extenso} + 4 * D_{completo}$$

Para clasificar el nivel del daño general del puente, según el valor de la ecuación (16) se definen los intervalos mostrados en la Tabla 25.

Tabla 25. Intervalos de variación del índice del daño medio, para cada grado de daño

Grado de daño	Valor de D_m
Leve	$0.5 \leq D_m < 1.5$
Moderado	$1.5 \leq D_m < 2.5$
Extenso	$2.5 \leq D_m < 3.5$
Completo	$3.5 \leq D_m < 4.0$

7.6 Funciones de consecuencias y evaluación de las pérdidas

Las funciones de consecuencia relacionan un determinado nivel de daño en los componentes del puente con las pérdidas en términos de costos de reposición, tiempos de reparación, pérdida de vidas humanas, cantidad de heridos, cantidad de escombros, o alguna otra métrica. Para estructuras de puentes, es común utilizar las métricas de pérdidas basadas en los costos de reposición, ya sean éstos de reconstrucción o de reparación.

La información de costos de reposición puede ser considerada de varias formas. Algunos de estos costos se presentan en la Tabla 26, según el nivel de información que propone Hazus.

Tabla 26. Fuentes de información para la determinación de los costos de reposición de los puentes

Costo de Reposición (reparación o reconstrucción)	
Nivel 1	Derivación a partir de costos índice a) Costos unitarios actualizados b) Costos históricos indexados
Nivel 2	Información existente: a) Costo de licitaciones recientes
Nivel 3	Cuantificación detallada: a) Presupuesto de obra, basado en planos constructivos

7.6.1 Costo de reposición según el nivel del daño

La función de consecuencias que utiliza Hazus es la siguiente: “el costo de reposición se obtiene multiplicando el costo de construcción del puente por un porcentaje asociado con cada nivel del daño” (FEMA, 2022). Esta función de consecuencia se puede representar en forma tabular como sigue:

Tabla 27. Porcentajes asociados a cada nivel de daño para determinar el costo de reposición del puente

Nivel de daño	Tipo de puente	Costo asociado el nivel de daño
Ligero	Todos	3% * CR
Moderado	Todos	8% * CR
Extenso	Todos	25% * CR
Completo	Puente de 2 claros o menos	100% * CR
	Puente de más de 2 claros	2/N * CR

CR = costo de reposición total del puente (reparación o reconstrucción)

7.6.2 Pérdidas máximas probables (PMP o PML)

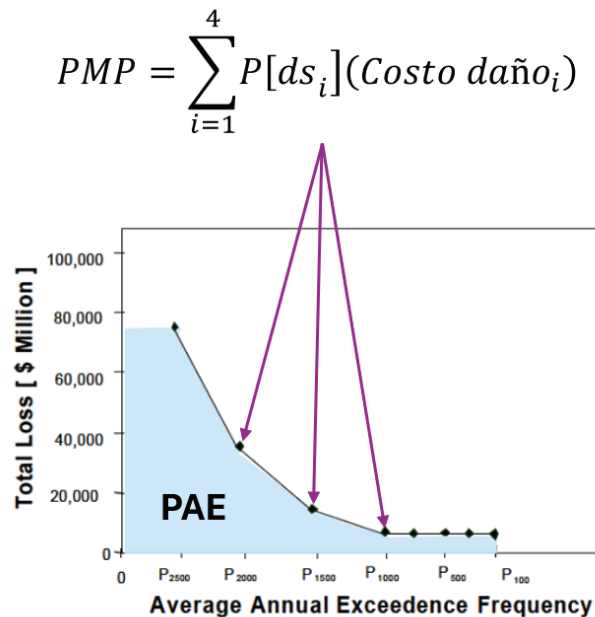
Representa la magnitud de las pérdidas máximas que podrían esperarse razonablemente, debido a la ocurrencia de eventos sísmicos, considerando los elementos expuestos durante un determinado tiempo de exposición. Con base en los costos de reparación y reconstrucción y las probabilidades asociadas al nivel del daño discreto, en cada puente, se estiman las pérdidas máximas probables (PMP) asociadas a cada período de recurrencia. La PMP para cada período de recurrencia y para cada puente se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$17) PMP = \sum_{i=1}^4 P[ds_i](Costo\ da\tilde{no}_i)$$

7.6.3 Pérdida anual esperada (PAE)

Indica el valor anual esperado de la pérdida o el equivalente al pago anual que se necesitaría para compensar las pérdidas acumuladas en una ventana de tiempo prolongado. A partir de las pérdidas máximas asociados a cada período de recurrencia, en función de la probabilidad anual de excedencia, se obtiene la curva de excedencia de las pérdidas, que representa la frecuencia o tasa anual con que una pérdida puede ser excedida. El área bajo la curva de excedencia representa la pérdida anual esperada (PAE) en cada puente. Hazus calcula las pérdidas, para varios períodos de recurrencia (Tr). La probabilidad anual de cada evento se calcula como $1/Tr$. Las probabilidades diferenciales se obtienen restando la probabilidad anual de los eventos adyacentes. A continuación, la pérdida promedio se calcula promediando las pérdidas asociadas con varios períodos de recurrencia adyacentes, como se muestra en la columna de las pérdidas promedio. La pérdida promedio anualizada es la suma del producto de la pérdida promedio y la probabilidad diferencial de alcanzar esta pérdida.

Figura 27. Pérdida anual esperada debida a un sismo(FEMA, 2022)



7.7 Limitaciones, conclusiones y recomendaciones acerca del análisis del riesgo sísmico

7.7.1 Limitaciones

La presente metodología para la evaluación del riesgo sísmico en puentes, si bien se basa en estándares reconocidos como Hazus, enfrenta limitaciones inherentes al proceso de modelado y a la disponibilidad de datos. En primer lugar, la precisión de los resultados depende de la calidad y especificidad de la información sobre cada estructura. En contextos donde se dispone principalmente de datos de nivel 1, como es usual en Costa Rica, los análisis son generales y menos detallados, limitando la personalización de los resultados para cada puente específico. Esto es particularmente cierto cuando se trabaja con puentes existentes y de mayor edad. Sin embargo, es importante destacar también que esta limitación usualmente no es aplicable al análisis del riesgo asociado a puentes nuevos, siempre y cuando las características sismorresistentes de las estructuras sean consideradas de acuerdo con lo que propone el diseñador estructural del proyecto.

En segundo lugar, la representación de la vulnerabilidad sísmica se basa en curvas de fragilidad, las cuales, aunque probadas y ampliamente utilizadas, están sujetas a supuestos simplificadores que pueden no capturar completamente el comportamiento complejo de ciertos tipos de puentes, especialmente aquellos en ambientes agresivos o expuestos a condiciones climáticas extremas. La influencia del CGA, aunque ha sido integrada por los autores en los modelos de fragilidad de Hazus, aún presenta desafíos significativos en cuanto a la precisión de los efectos a largo plazo y su impacto real en la vulnerabilidad estructural, especialmente en regiones donde se esperan cambios drásticos en las condiciones ambientales. Cabe destacar que no hay hasta la fecha modelos de fragilidad sísmica que incorporen la influencia del CGA y que hayan sido desarrollados específicamente para las condiciones costarricenses.

7.7.2 Conclusiones

Este estudio sobre el análisis del riesgo sísmico en puentes mediante la metodología Hazus confirma la importancia de integrar de forma sistemática la amenaza sísmica y la vulnerabilidad estructural en la planificación y el diseño de proyectos de infraestructura. La metodología permite cuantificar el riesgo y evaluar de manera probabilística los posibles niveles de daño y las pérdidas asociadas a eventos sísmicos de distinta magnitud, lo que ofrece una herramienta eficaz para la toma de decisiones en la gestión del riesgo.

La incorporación de factores climáticos relacionados con el CGA es especialmente relevante para regiones como Costa Rica, donde se prevé alteraciones importantes en las condiciones ambientales (i.e. mayor frecuencia e intensidad de lluvias, cambios en la humedad relativa, variaciones en el nivel freático y saturación del suelo, y otros). Los efectos del CGA en la respuesta estructural, incluyendo la degradación acelerada de los materiales y la modificación de las condiciones del suelo, deben ser considerados al proyectar la durabilidad y resistencia sísmica de los puentes en el largo plazo.

Los resultados obtenidos subrayan la importancia de contar con inventarios estructurales detallados y estudios específicos del suelo para mejorar la precisión de los modelos de riesgo sísmico en el contexto nacional. La metodología Hazus, si bien se adapta adecuadamente a las particularidades de Costa Rica, representa una herramienta robusta para fortalecer la resiliencia sísmica de las infraestructuras de transporte en el país.

7.7.3 Recomendaciones

1. Mejorar la calidad de los datos estructurales y geotécnicos para puente existentes

Es fundamental avanzar en la recopilación de información detallada de cada puente, incluyendo inspecciones periódicas, estudios geotécnicos del sitio y análisis específicos de vulnerabilidad sísmica. La disponibilidad de datos precisos permitirá aplicar metodologías avanzadas y adaptar mejor la herramienta Hazus al contexto local. Esto es válido tanto para puentes en vías nacionales como cantonales.

2. Desarrollar estudios específicos sobre los efectos del CGA

Se recomienda realizar investigaciones orientadas a comprender cómo las alteraciones climáticas proyectadas impactarán la vulnerabilidad sísmica de los puentes en Costa Rica. Esto incluye estudios sobre la corrosión inducida por el aumento de la temperatura y la humedad, así como la influencia de la saturación del suelo en condiciones de alta pluviosidad.

3. Fortalecer la normativa de diseño sismorresistente

Cuando se disponga de más estudios que los fundamenten, puede ser prudente actualizar los lineamientos de diseño de puentes en el país para incluir consideraciones específicas sobre los efectos del CGA. La normativa debe adaptarse para asegurar que, tanto los nuevos puentes como las intervenciones en los existentes, consideren las condiciones sísmicas y climáticas futuras, al promover diseños más resilientes.

4. Capacitación y actualización continua en el uso de Hazus y otras herramientas para análisis del riesgo

Para maximizar el potencial de la metodología Hazus, se debe capacitar a los ingenieros y especialistas en su aplicación y actualización. Esto incluye el desarrollo de competencias en la interpretación de curvas de fragilidad y en la integración de datos locales en modelos de riesgo.

5. Implantar un sistema de monitoreo estructural

La instalación de sistemas de monitoreo en puentes críticos permitirá una evaluación en tiempo real del estado estructural y del desempeño ante eventos sísmicos y condiciones ambientales adversas. Estos datos facilitarán la toma de decisiones informadas para el análisis del riesgo sísmico en puentes, al considerar la gestión de mantenimiento y la respuesta de las estructuras ante el envejecimiento influenciado por el CGA.

8. Cambio climático (CC) y calentamiento global antropogénico (CGA)

8.1 Definiciones

Según el Decreto N.º 42465 - MOPT-MINAE-MIVAH (2020) "Lineamientos generales para la incorporación de las medidas de resiliencia en infraestructura pública", el cambio climático (CC) se define como el "cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera global y que se suma [sic] a la variabilidad natural del clima, observada durante períodos de tiempo [sic] comparables".

Por otro lado, el IPCC (2018) de acuerdo con su Anexo 1 (Glosario del Informe Especial del IPCC (2018), el concepto del cambio climático (CC) se refiere a los "...cambios en el estado del clima que puedan ser identificados (i.e., mediante análisis estadísticos) en los promedios y la variabilidad de sus propiedades y parámetros que persisten por períodos extensos, típicamente varias décadas o más tiempo. El CC es causado por procesos naturales e influencias (fuerzas, "forcings") externas naturales, como por ejemplo las modulaciones de los ciclos solares y las erupciones volcánicas, así como por los cambios, en la composición de la atmósfera y el uso de la tierra, inducidos por la actividad antropogénica...".

Por su parte, la Convención Marco sobre el Cambio Climático (Framework Convention on Climate Change, UNFCCC), en su artículo 1 distingue "...las causas del cambio climático (CC) derivadas de los procesos naturales de aquellas atribuibles a la actividad humana y a los cambios estacionales e interestacionales naturales del clima (i.e., variabilidad climática, VC)...". Esta definición ha sido confirmada y actualizada en los informes del IPCC (2018, 2023).

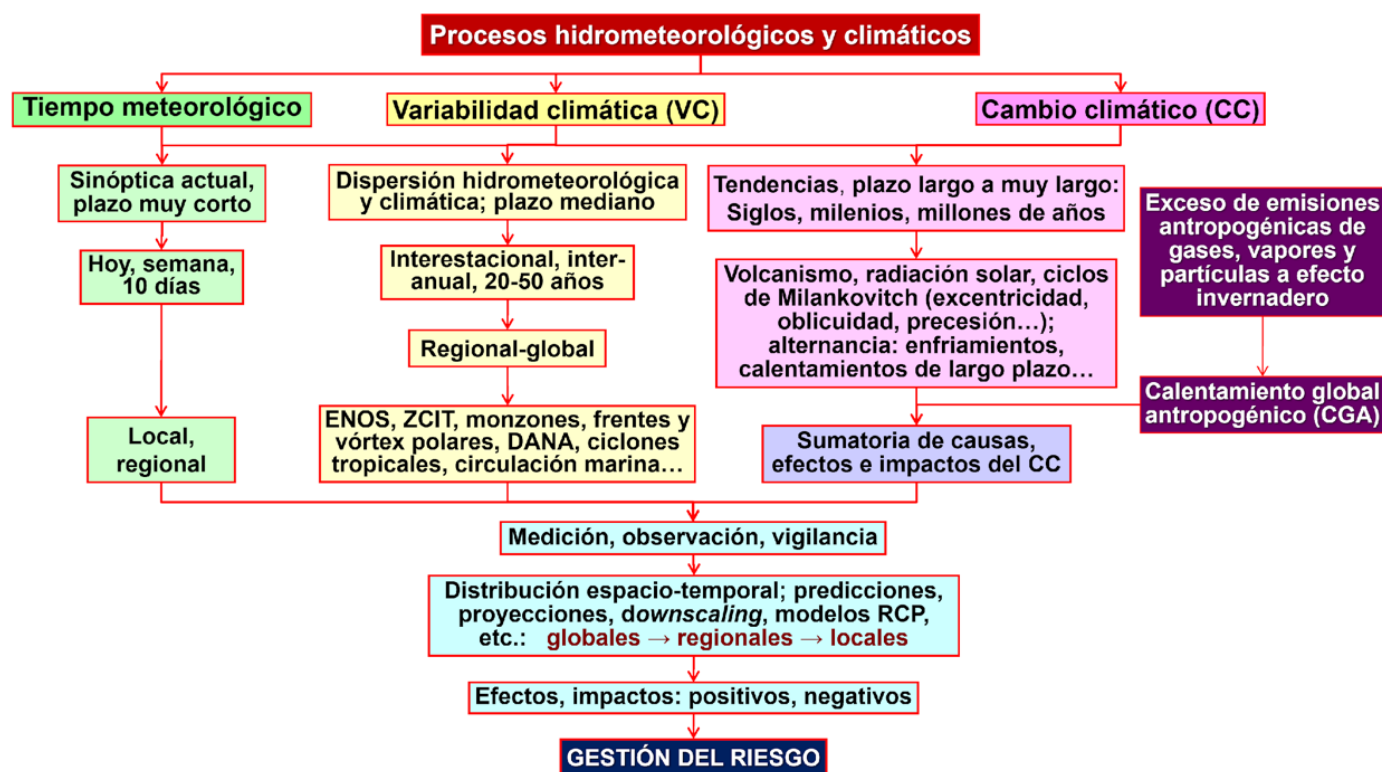
En el diagrama de la Figura 37, se ha representado esquemáticamente las características principales de cada una de estas condiciones y aspectos. Como se aprecia, las condiciones sinópticas del tiempo meteorológico, así como la variabilidad y el cambio climático poseen influencias recíprocas constantes, discernibles y distinguibles de manera cuantitativa, por lo que conviene señalarlas de manera independiente.

Por lo anterior y dado que los alcances de esta guía metodológica se refieren específicamente a la influencia de las amenazas hidrometeorológicas y climáticas sobre la vulnerabilidad de las obras de infraestructura, así como al riesgo generado como consecuencia. El texto se concentra en el análisis de los aspectos mensurables e influyentes en las variables y parámetros que definen, por un lado, la variabilidad interanual e interestacional del clima (VC) y, por otro, los cambios que en el mediano y largo plazo pudiesen ser inducidos y atribuidos a la actividad humana (i.e. CGA). Se considera que los otros aspectos y parámetros que influyen en la evolución del clima en el muy largo plazo (i.e. cambio climático, CC), por su escala temporal y espacial, por ahora no son considerados por ahora. Estos quedarán para futuras etapas, cuando se disponga de instrumentos analíticos, información y datos disponibles, y mejor adaptados que los actuales.

Por lo tanto y según la definición que aparece en el decreto citado, el "cambio climático" corresponde solamente y de manera parcial con el concepto práctico actualizado requerido. Por lo tanto, este documento seguirá refiriéndose a su componente más influyente en la actualidad, aunque tan solo sea parcialmente mensurable e incorporable, más allá de las indicaciones determinísticas

correspondientes: CGA. De esta manera, el texto respeta el decreto y se apega a la definición científica pertinente, actualizada y de acuerdo con la escala espacial y temporal de los proyectos de infraestructura. Esta visión también se describe, recomienda y analiza en los documentos del IPCC mencionados. En el Glosario del Anexo 1 se ofrece definiciones complementarias acerca de estos términos y conceptos, y los documentos citados se encuentran en la lista de las Referencias Bibliográficas.

Figura 28. Definiciones, conceptos asociados, influencias y relaciones recíprocas de los procesos hidrometeorológicos y climáticos derivados del tiempo meteorológico, la variabilidad climática y el cambio climático. ENOS: El Niño-La Niña/Oscilación del Sur; ZCIT: Zona de Convergencia Intertropical, DANA: Depresión Aislada en Niveles [i.e. atmosféricos] Altos [i.e. elevados]



8.2 Influencia del CGA en la composición del riesgo

El CGA se refiere a la alteración del clima global debido a la actividad humana, especialmente a causa de la acumulación excesiva de gases, vapores y partículas a efecto de invernadero en la atmósfera, producida por el consumo de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas) y otras actividades humanas (deforestación, ganadería intensiva, etc.). Esta amenaza tiene efectos múltiples sobre el ambiente y las estructuras construidas.

Según el caso y con todos los demás factores (geotécnicos, geodinámicos) constantes y sin cambios a lo largo del tiempo, el CGA podría influenciar (o no) el riesgo derivado de las amenazas hidrometeorológicas y climáticas y de la variabilidad climática, sobre por ejemplo la inestabilidad de laderas, el disparo de los lahares y la intensidad de las avenidas fluviales, al menos de tres maneras (Mora, 2022):

- i. Reducción del potencial de excedencia de las pérdidas durante el período considerado, dado el cambio (delta) de los parámetros multidimensionales de las amenazas, provocados particularmente por una reducción sustancial del volumen,

intensidad, duración y frecuencia de la precipitación. La vulnerabilidad se supone en este escenario como una constante, es decir, la misma que en la actualidad.

- ii. Igualdad, en el caso de que no haya cambios significativos en los parámetros hidrometeorológicos y climáticos ni de la vulnerabilidad, por lo que el riesgo tampoco variaría.
- iii. Incremento del potencial de excedencia de las pérdidas durante el período considerado, según el cambio (delta) de los parámetros multidimensionales que definen las amenazas (i.e. incremento del volumen, intensidad, duración y frecuencia de las lluvias) y de la vulnerabilidad.

Tómese en cuenta que de acuerdo con las tendencias actuales las pérdidas y los daños son causados, principalmente por la vulnerabilidad elevada ante la variabilidad climática, más que por la sumatoria del CGA y del cambio climático natural. En particular, esto es causado por el desorden territorial y la ausencia de una política robusta para la gestión del riesgo en Costa Rica. Esto implica que debe reforzarse el proceso analítico fundamentado en la necesidad de analizar la incidencia del CGA sobre las amenazas y la vulnerabilidad. Adicionalmente, debe tomarse en cuenta que los cambios no serán súbitos, sino más bien progresivos con incrementos graduales (deltas): ...

Delta Riesgo = Delta Amenaza * Delta Vulnerabilidad:

$$\frac{\partial R}{\partial a, d, t} = \frac{\partial A}{\partial a, t} * \frac{\partial V}{\partial d, t}$$

en donde:

- R: riesgo
- A: amenaza derivada de la inestabilidad de laderas
- ∂a : cambio de A, a lo largo del plazo ∂t
- V: vulnerabilidad
- ∂d : cambio del potencial de daños y pérdidas durante ∂t .

De acuerdo con los escenarios plausibles del CGA, tres escenarios son posibles:

El riesgo no cambia: $\frac{\partial R}{\partial a, d, t} = 0$

$\frac{\partial R}{\partial a, d, t}$

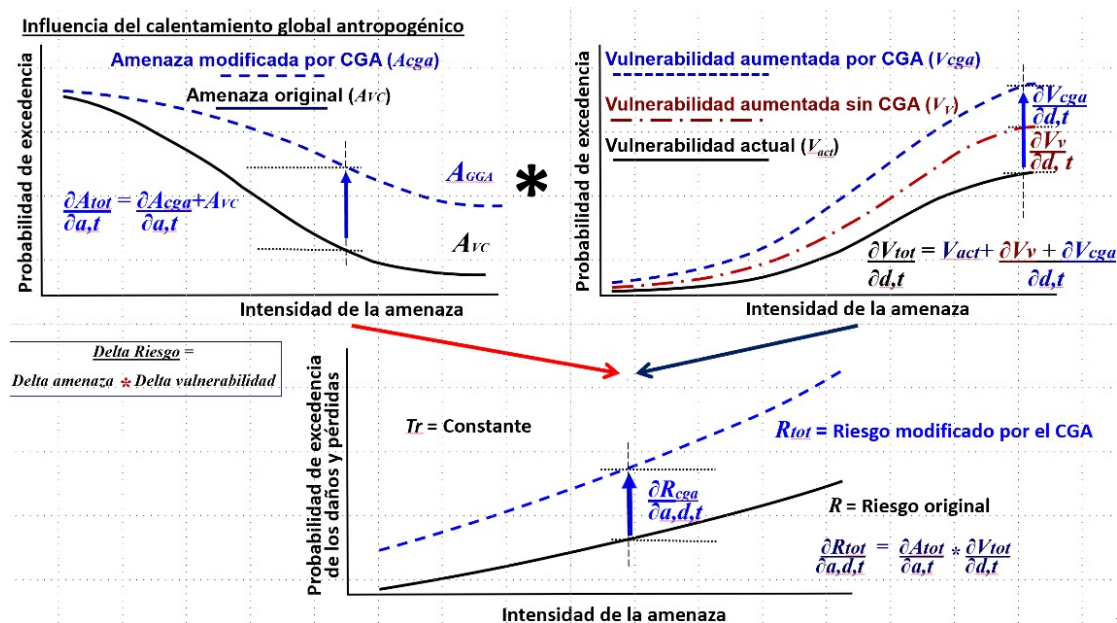
El riesgo disminuye: $\frac{\partial R}{\partial a, d, t} < 0$

$\frac{\partial R}{\partial a, d, t}$

El riesgo aumenta: $\frac{\partial R}{\partial a, d, t} > 0$

En adelante, será analizada la posible influencia hipotética del CGA considerando el escenario en el cual generará en la región estudiada una modificación paulatina de la IDF y también posiblemente del volumen de las precipitaciones pluviales en el largo plazo. Por lo tanto, deberá considerarse como plausible también la gestación, en ese mismo plazo de una condición de "riesgo nuevo", en el cual deberá analizarse por separado el componente agregado por el CGA del que ya existe producido por la variabilidad climática (VC) y las condiciones prevalentes de la vulnerabilidad (Figura 29).

Figura 29. Variaciones en el riesgo derivado de la amenaza de la inestabilidad de laderas, la sismicidad los lahares y las avenidas fluviales, según la posible influencia del calentamiento global antropogénico (Mora, 2022a).



Entonces, la composición y la evolución del riesgo, según las variables aleatorias que caracterizan la amenaza y la vulnerabilidad con respecto al tiempo y bajo la incidencia del CGA, aumentarían sobre todo si se incrementa la vulnerabilidad (Figura 29). Este modelo se basa en el supuesto de que al cabo de un horizonte temporal predefinido, la intensidad de la amenaza aumentaría paulatinamente (∂A), asumiendo un período de recurrencia Tr constante.

La vulnerabilidad también aumentaría simultánea y gradualmente (∂V), junto con la exposición y fragilidad de la población, sus elementos socioeconómicos y demográficos y la infraestructura (∂V_v). El CGA ejercería influencia adicional sobre la vulnerabilidad a través del tiempo (∂V_{cga}), debido a la pérdida eventual de resiliencia de la comunidad y su infraestructura, causada por factores desatendidos del riesgo (Mora, 2022a).

Este mismo tipo de escenario se desarrollará, más adelante, también para explicar el caso de la influencia del CGA sobre la vulnerabilidad de los puentes, la amenaza de los lahares y el comportamiento de los ríos en caso de avenidas fluviales.

8.3 Influencia del CGA sobre el riesgo derivado de las avenidas fluviales

El CGA está alterando significativamente los patrones climáticos globales (IPCC, 2021). Este proceso no solo se manifiesta en el aumento de las temperaturas, sino que también tiene un impacto significativo en el ciclo hidrológico, pues afecta la frecuencia, intensidad y distribución de las precipitaciones (Trenberth, 2011). La relación entre el CGA y el riesgo derivado de las avenidas fluviales es compleja y multivariable. Por un lado, el aumento de la temperatura atmosférica incrementa la capacidad del aire para retener humedad, lo que puede resultar en eventos de precipitación más intensos y concentrados. Además, el cambio en los patrones de precipitación estacional contribuye a modificar la distribución temporal de los caudales en los ríos y a diferentes escalas. Es esperable, por lo tanto, que las avenidas fluviales, producto de lluvias intensas que suceden en la escala temporal de horas y días, se vean afectadas por la variación de los patrones de precipitación a causa del CGA.

Las avenidas fluviales, en un país tropical como Costa Rica, son el producto de eventos hidrometeorológicos. Por lo tanto, es de

esperar que el CGA afecte las crecidas de los ríos fundamentalmente en dos aspectos: i) variación de la frecuencia -o probabilidad de excedencia- de los eventos de una magnitud dada, y ii) cambios temporales en la evolución del evento, es decir, en la distribución temporal de los hidrogramas de las crecientes. La relación entre la causa y la manifestación de las crecidas depende de interacciones en sistemas físicos complejos, donde la topografía, el uso y cobertura de la tierra, la geología y tipos de suelos, entre otros, pueden alcanzar un peso importante. En los análisis planteados en esta guía, se da preferencia a la disponibilidad de registros de caudales instantáneos para los ríos estudiados. Esto por cuanto es la información más directa con la que se puede contar. Sin embargo, este enfoque puede tener limitaciones para evaluar la influencia del CC sobre las crecidas. Varios estudios han tratado de determinar escenarios futuros de escorrentía superficial según los escenarios climáticos. Sin embargo, estos estudios se han centrado en variables de escorrentía de extensiones temporales grandes, por ejemplo, a escala anual donde sí se han logrado encontrar patrones que permiten definir porcentajes de aumento o reducción de los caudales medios en cuencas a mediano y largo plazo. Pero estas estimaciones no son de utilidad cuando la variable en cuestión son los caudales pico de las avenidas. También se ha encontrado nexos en la incidencia y frecuencia de eventos hidrometeorológicos extremos, como las lluvias intensas y tormentas convectivas, donde se observa incrementos significativos en las últimas cuatro décadas (IMN, 2021). Si bien esto podría estar ligado a una mayor cantidad de datos disponibles en los años recientes, o en la variabilidad climática natural de mediano y largo plazo, sí es posible prever que la frecuencia y magnitud de esos eventos “extremos” aumente en el futuro (IPCC, 2021).

Entonces, la evaluación de los cambios a largo plazo en los caudales de las avenidas fluviales presenta desafíos significativos, debido a la complejidad de los sistemas hidrológicos. Una posible aproximación involucra la correlación de estos cambios con variables auxiliares o “proxy”, como la precipitación máxima diaria. Esta variable, definida como el máximo anual de precipitación en un día, se deriva comúnmente de los modelos climáticos de circulación general (GCMs, por sus siglas en inglés). Además, este indicador está estrechamente relacionado con los eventos de precipitación que frecuentemente desencadenan avenidas fluviales, especialmente en cuencas del tamaño de las que se analizaron en este estudio.

Sin embargo, es importante reconocer las limitaciones inherentes de este enfoque. La resolución espacial nativa de los GCMs, típicamente del orden de 100 km, presenta un desafío significativo para el análisis de cuencas hidrográficas de menor escala, como aquellas con áreas del orden de decenas de kilómetros cuadrados. Para abordar esta discrepancia de escala es necesario aplicar técnicas de reducción de escala (downscaling). Pero estos algoritmos también pueden introducir incertidumbres epistémicas adicionales en el análisis, por lo que deben ser cuidadosamente evaluadas y cuantificadas mediante método de validación.

Las proyecciones “oficiales” para Costa Rica fueron desarrolladas en el marco del proyecto: “Generación de escenarios regionalizados del cambio climático en Centroamérica” del programa EUROCLIMA+. Estas se basan en las proyecciones globales del Sexto Informe de Evaluación (AR6) del IPCC. Están disponibles en el sitio web Escenarios de Cambio Climático en Centroamérica (EUROCLIMA+, s.f.). Estas proyecciones climáticas se obtuvieron a partir de los modelos climáticos globales. En el análisis de los datos se utilizan dos tipos de regionalización: una “dinámica” que admite resoluciones no menores a los 50 km y una otra “estadística”, la cual permite resoluciones de 25 km para las temperaturas y 5 km para la precipitación. Los resultados obtenidos de esta generación de escenarios permiten disponer de las proyecciones de 37 variables climáticas, ocho variables originales y alrededor de 29 índices derivados. Las variables obtenidas proceden de proyecciones a escala diaria y están disponibles en cuatro escenarios de emisión (SSP1-2.6, SSP2- 4.5, SSP3-6.0 y SSP5-8.5), dos escenarios de referencia (1961 a 1990, denominado “período histórico remoto” y 1981 a 2010, llamado “período histórico cercano”), y tres períodos futuros: próximo (2015 a 2040), medio (2041 a 2070) y lejano (2071 a 2100). La finalidad de las proyecciones es proporcionar una visión de las tendencias e incertidumbres asociadas. Tómese en cuenta que cualquier análisis cuantitativo debe considerar un período mínimo de treinta años.

La precipitación máxima en 24 horas es un indicador derivado, que se obtiene a partir de la variable de precipitación diaria en cualquiera de sus formas (lluvia, nieve, granizo, etc.) y se presenta en unidades de mm/día. Las consideraciones para su utilización en cualquier tipo de análisis deben contemplar las limitaciones de resolución mencionadas anteriormente. A modo de ejemplo,

se muestra la anomalía o el cambio en la variable “precipitación máxima de 24 horas” para las cuencas hidrográficas de los ríos Barbilla y Chirripó, en la provincia de Limón, Costa Rica, según diferentes escenarios. Los eventos meteorológicos que se asocian a estos máximos de precipitación estarán ligados a las avenidas fluviales máximas que se esperarían en las cuencas que se vean abarcadas por dichas tormentas. Se observa en las series de datos que el cambio previsto para la mayoría de los escenarios fluctúa alrededor de 0 %, pues no se encuentra una tendencia de cambio significativa y visible. Las distribuciones de los datos de los diferentes modelos presentan una clara asimetría positiva, pero con una concentración importante en los valores cercanos al 0 % de cambio. Se esperaría que este mismo comportamiento sea exhibido por las variables de caudal de las avenidas en las cuencas analizadas para este estudio (Figura 30).

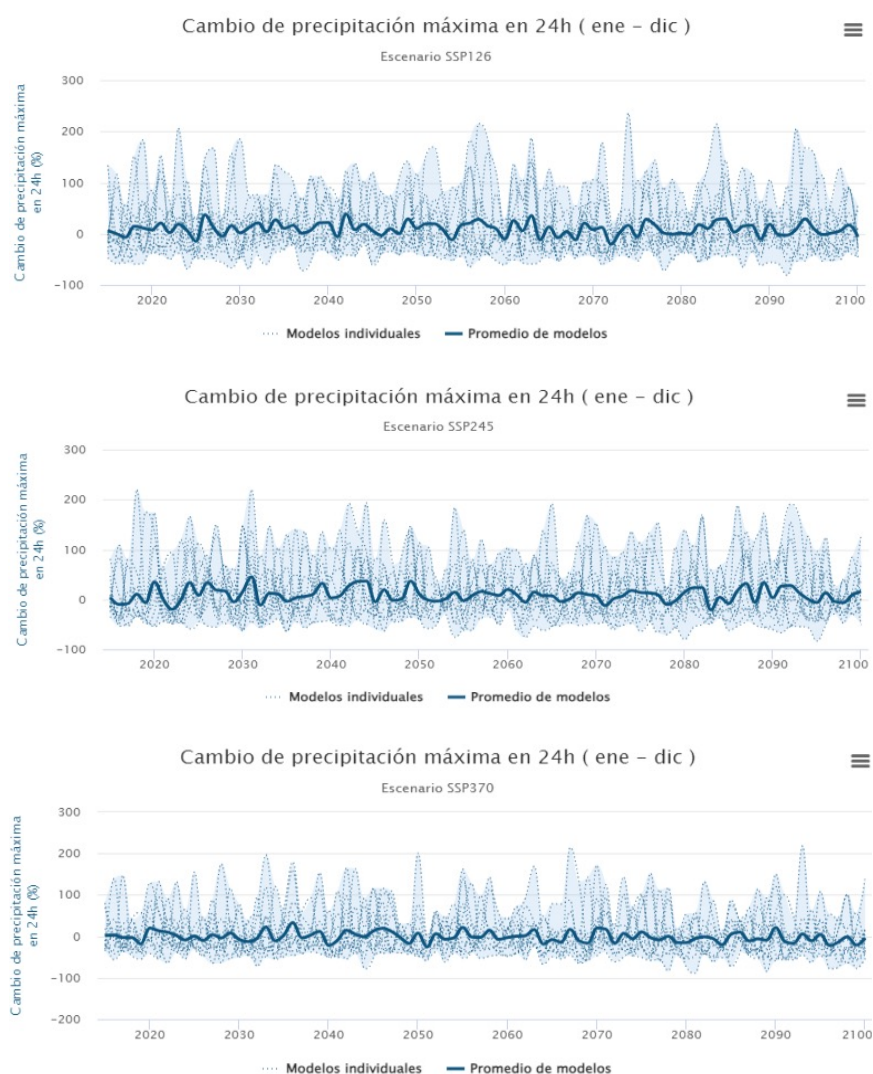


Figura 30. Cambios en la variable de la precipitación máxima de 24 horas. Según los períodos históricos cercano (1981 a 2010) y futuro medio (2041 a 2070); cuencas hidrográficas de los ríos Barbilla y Chirripó, provincia de Limón, Costa Rica, y según diferentes escenarios climáticos (Tomado de <https://centroamerica.aemet.es/index30.html>).

8.4 Posible influencia del CGA en la amenaza de la inestabilidad de laderas

e acuerdo con todo lo discutido en este capítulo, es de esperar que las variaciones espaciotemporales de las lluvias sean inducidas por el CGA y que las causas definitivas regirán la forma cómo variarán los procesos de la geodinámica externa y la inestabilidad de laderas. Mora (2022a y 2022b) estableció un marco conceptual a partir del cual pueden deducirse las variaciones de las lluvias

y, en particular, la distribución espacial de los parámetros de su intensidad, duración, frecuencia (i.e. período de recurrencia), su volumen y de la forma cómo inciden sobre los indicadores de la susceptibilidad intrínseca de las laderas (Mora, 1993, 1994).

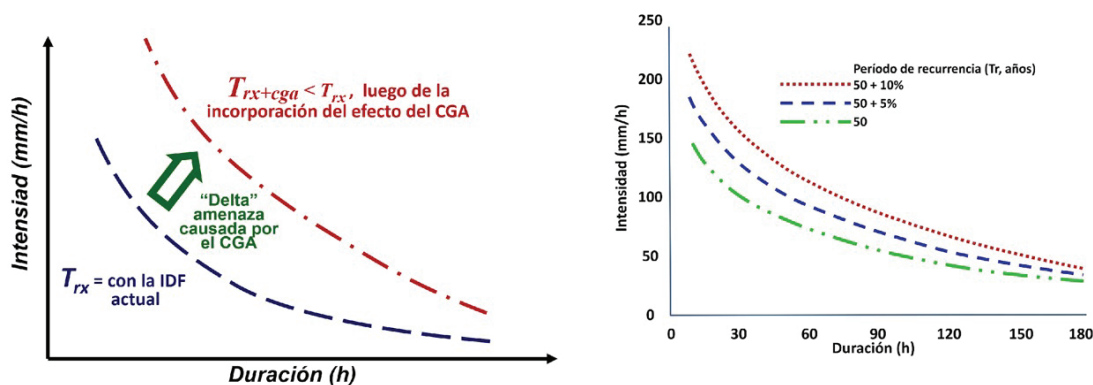
En resumen, en el mediano plazo la evolución de la variabilidad climática, influenciada por el CGA y su incidencia sobre la amenaza de la inestabilidad de laderas, podría:

1. No incidir en la relación IDF y de su volumen en general, con lo que la amenaza respectiva se mantendría aproximadamente igual que en la actualidad.
2. Reducir los parámetros de intensidad, duración, frecuencia y volumen, con lo que la amenaza podría reducirse.
3. Incrementar los parámetros de intensidad, duración, frecuencia y volumen, con lo que la amenaza podría aumentar.

Dado que por el momento no se dispone de un escenario robusto para determinar la evolución de las tendencias de la relación IDF de las lluvias, ni del volumen de las precipitaciones pluviales en el territorio costarricense, no es posible establecer una tendencia definitiva sobre el caso específico de la inestabilidad de laderas.

Con el propósito de establecer una hipótesis de trabajo, se presumirá un escenario hipotético en el que habría un incremento constante y paulatino en esa relación IDF. Para ello se asume un desplazamiento homogéneo y proporcional de los factores que definen esa relación, tal y como se aprecia en el diagrama de la Figura 31. Para un período de recurrencia en particular ($T_r=50$ años), se ha escogido un incremento del 10 %, el cual se supone que generaría una influencia proporcional sobre los factores de la humedad prevalente (Sh) y del disparo pluviométrico (Dp) que definen la amenaza "total" de la inestabilidad de laderas (Ad), según el método Mora-Vahrson (1994). Los resultados de este ejercicio, sobre el tramo montañoso de la RN-32, se pueden observar en documento del caso de estudio piloto complementario como se indicó anteriormente.

Figura 31. Definición de un escenario hipotético para visualizar la influencia de la opción del incremento posible de la intensidad, duración y frecuencia de las precipitaciones pluviales, causado por el calentamiento global antropogénico. Para la referencia, se puede escoger entre la posibilidad del incremento del 5 % o del 10 %, con el objeto de analizar su influencia en los factores de la humedad prevalente (Sh) y del disparo pluviométrico (Dp) definidos por la metodología Mora Vahrson (1994). El escenario implica, ya sea una reducción del período de recurrencia (T_r) de las lluvias de una determinada intensidad y duración de las lluvias, o para un T_r constante, un incremento de la intensidad y duración respectivas (i.e. "delta amenaza").



8.5 Influencia del CGA sobre la amenaza de los lahares

Considerando el escenario en el que aumentaría la IDF de las lluvias de la variabilidad climática, generado por el CGA (Mora 2022), se podría esperar que los lahares disparados por lluvias se vuelvan más frecuentes, voluminosos y peligrosos. Si en una ladera volcánica los índices de IDF aumentan y de manera proporcional también la amenaza de la inestabilidad de laderas es posible

suponer que también aumenta la posibilidad de que aumenten los lahares. En ese caso los lahares disparados por deslizamientos cosísmicos podrían aumentar, ya que la saturación de suelos sería mayor. Tómese en cuenta de que si no hay un cambio significativo en el régimen IDF, las posibilidades se mantendrían aproximadamente iguales y en el caso, también plausible de que más bien el CGA reduzca ese régimen, más bien sería posible que los lahares disparados por las lluvias también disminuyan. Los escenarios climatológicos disponibles no permiten escoger definitivamente entre las opciones planteadas (Figura 32).

La red vial nacional es afectada por las interrupciones frecuentes y severas del tránsito, que afectan negativamente la logística, economía y seguridad de las comunidades dependientes de estas vías. Además, la variabilidad climática; es posible que el CGA también afecte los patrones de precipitación dificulten todavía más la predicción, planificación y los esfuerzos para la gestión del riesgo sobre todo en el escenario que implique un incremento de su relación IDF. Por lo tanto, se requerirá un enfoque más adaptativo y dinámico y la adopción de estrategias de mitigación y respuesta más robustas para enfrentar el eventual incremento de los niveles de la amenaza previsible.

Entonces, los lahares alimentados según el escenario de lluvias más intensas podrán movilizar mayores cantidades de material de las laderas, lo cual incrementa su volumen y poder destructivo. Esto resultaría en un incremento significativo de su potencialidad dañina para la infraestructura (puentes), tal y como se muestra en la Figura 32. Por esta causa, la red vial nacional podría tener interrupciones más frecuentes y severas que afectarían negativamente la logística, economía y seguridad de las comunidades dependientes de estas vías. Además, la variabilidad y el cambio en los patrones de precipitación dificultan la predicción y planificación, y también complican los esfuerzos para la gestión del riesgo de las poblaciones vulnerables. Esto requiere un enfoque más adaptativo y dinámico y la adopción de estrategias de mitigación y respuesta más robustas, para enfrentar el incremento de los niveles de la amenaza que supone la variabilidad climática alterada por el calentamiento global antropogénico.

Sin embargo, la incorporación del CGA en una modelación de lahares, utilizando LAHARZ o cualquier otro software similar, en el que los parámetros que se pueden modificar son: el volumen del lahar, el sitio de disparo del evento y el MNT, sigue siendo un desafío. Existen formas indirectas para considerar cómo los efectos del CGA pueden influir en estas variables y reflejarse en su impacto potencial o su capacidad destructiva.

Figura 32. Gráfico de correlación entre el tamaño del lahar, según su tirante en el sitio del puente, expresado en % de la altura del lahar desde el lecho del río a la altura del puente vs. el daño que se generaría en el puente. La curva roja simula el incremento supuesto de la capacidad destructiva de los lahares en caso de que el CGA incremente la intensidad, duración, frecuencia y volumen de las precipitaciones pluviales en alrededor de 5%. Nótese que LAHARZ no puede realizar directamente este tipo de modelos.



Las consideraciones acerca del cambio en el volumen, cambio del sitio de disparo (origen) y la necesidad de un MNT actualizado, para el análisis de los lahares, se explican a continuación:

1. Cambio en los patrones de precipitación

El CGA puede aumentar la frecuencia y la intensidad de las lluvias, lo que es un factor determinante en la generación de lahares. Si se asume que para el caso de Costa Rica se verificarán los estudios regionales del IPCC, que proyectan un aumento promedio de la intensidad y frecuencia de precipitación para la región de América Central en los próximos años, se podría suponer por ejemplo un aumento del volumen por el agua en el modelo de entre 5 y 10 %, considerando la variable del CGA en las áreas montañosas elevadas e intermedias de la cordillera Volcánica Central. El incremento en las precipitaciones puede llevar a una saturación más rápida del suelo y a un aumento de los niveles freáticos y de la presión intersticial en los terrenos, la cantidad de agua disponible para movilizar material (escorrentía aumentada al saturar la capacidad de campo y limitar la infiltración posible) y, por lo tanto a que los lahares sean más voluminosos y destructivos.

Adicionalmente, debe tomarse en cuenta la frecuencia de los eventos disparados por las lluvias intensas, debido a que un incremento en la probabilidad de que se produzcan (i.e. detonantes de los lahares) podría generar períodos de recurrencia más cortos y lahares más grandes y de mayor volumen, es decir, con mayor capacidad de impacto.

2. Cambios en la vegetación y el uso de la tierra:

El CGA puede modificar la cobertura vegetal, lo que afectaría la capacidad de retención de agua en las laderas. Una reducción en la cobertura vegetal (por ejemplo, por más lluvias que generen más deslizamientos en la cuenca alta) podría aumentar la escorrentía, la erosión y la movilización de material volcánico, lo que facilita la formación de lahares.

3. Cambios en el sitio de origen de los lahares modelados

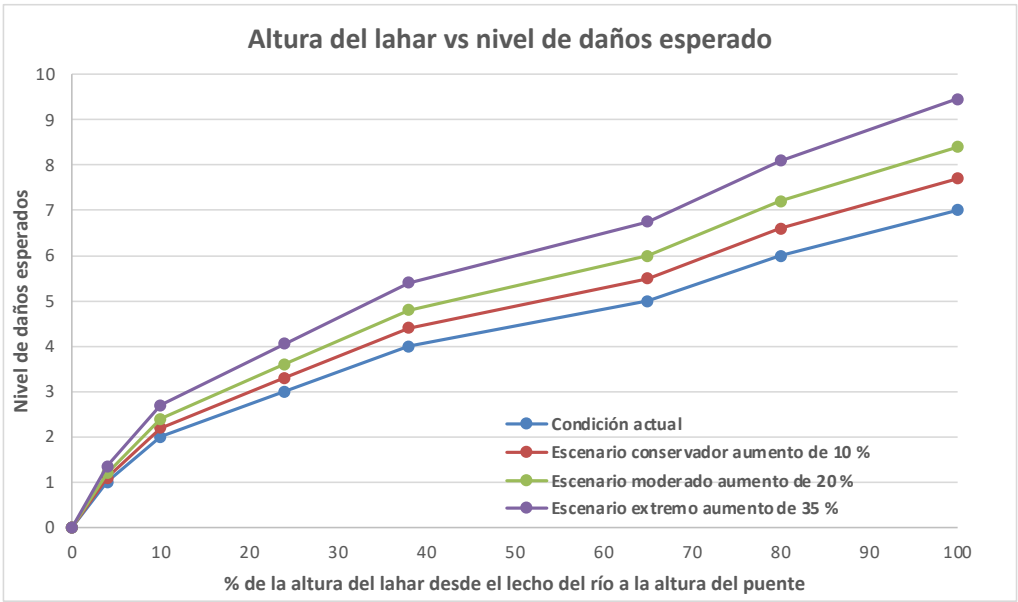
El CGA puede tener incidencia en la ubicación del lugar en donde se desencadenan los lahares. Por ejemplo, las fluctuaciones en el patrón de precipitaciones pueden modificar la estabilidad del terreno y, por lo tanto, cambiar el sitio de origen del lahar. Al tiempo podrían cambiar las condiciones de la estabilidad o inestabilidad de los terrenos, los lugares que anteriormente eran estables pueden volverse propensos a deslizamientos debido a la aceleración de la saturación, la pérdida de la resistencia al corte y a la pérdida de vegetación por causa de la misma inestabilidad de laderas. Al tomar en cuenta el CGA, cuando se disponga de datos más precisos y con mayor resolución, deberán considerarse nuevas áreas potenciales para el origen del lahar según las tendencias climáticas, usualmente más bajos en la cuenca. Igualmente, será necesario aplicar plataformas analíticas más avanzadas y actualizadas.

4. Actualización del MNT

La resolución del MNT puede influir sensiblemente en la precisión de la simulación del flujo del lahar. Aunque no se puede modificar directamente para incluir la influencia del CGA, es recomendable utilizar un MNT actualizado y de elevada resolución que refleje los cambios recientes en la topografía debidos a la erosión, deslizamientos o acumulación de sedimentos. En la cuenca del río Sucio, por ejemplo, esta situación es crítica, dada la intensa inestabilidad de las laderas cerca de la cima de los volcanes activos o recientemente activos, como los de Costa Rica.

Si se grafica el porcentaje de la altura del lahar, modelado desde el lecho del río hasta la altura de la losa del puente, versus el nivel de daños posible en condiciones actuales (curva inferior). Se puede ver que mientras más alto el tirante del lahar, mayor será el nivel de daño esperado en la infraestructura. Considerando los efectos del CGA en estos factores específicos y según el contexto geológico costarricense, se propone considerar un factor de corrección en los impactos generados por los lahares modelados según los siguientes escenarios: escenario conservador (factor = 0,10, escenario moderado (factor = 0,2), escenario más desfavorable (factor = 0,35) (Figura 33).

Figura 33. Gráfico de correlación entre el tamaño del lahar, según su tirante en el sitio del puente, expresado en porcentaje de la altura del lahar desde el lecho del río a la altura del puente vs. el daño que se generaría en el puente. Las curvas superiores simulan el incremento de la capacidad destructiva de los lahares en caso de que el CGA incremente la IDF y volumen de las precipitaciones pluviales en diferentes escenarios.



Los lahares, alimentados por lluvias más intensas, podrán movilizar mayores cantidades de material volcánico, lo cual incrementa su volumen y poder destructivo. Esto resultaría en un incremento significativo de la potencialidad del daño a la infraestructura (puentes), tal y como se muestra en la Figura 33.

En la Tabla 11 se muestran los porcentajes de altura o tirante del lahar en el sitio en donde se ubica el puente y los niveles de destrucción definidos para cada caso. Además, se muestra cómo a partir del escenario moderado cuando se da un aumento del 20 % se generan saltos de categoría en el nivel de daños y, en consecuencia, el número equivalente del porcentaje de reposición del puente.

Tabla 28. Relaciones entre el tamaño del lahar, modelado según su tirante y el porcentaje con respecto a la altura del puente específico, según su capacidad destructiva y los diferentes escenarios considerando el CGA. *Valores donde se da un salto al siguiente nivel de daños y valor % de reposición del puente.

Tamaño de lahar (Volumen - Tirante % de espacio)	Nivel de daños	Descripción de daños	N° equivalente del valor, % de reposición del puente (costo de daños)	Capacidad destructiva en condiciones actuales	Escenario conservador (mínimo aumento): 10%	Escenario moderado (aumento probable): 20%	Escenario extremo (máximo aumento): 35%
100	Nivel 4 - Destrucción total	El puente ha colapsado o ha sido arrasado por el lahar. Los daños son irreparables, con pérdida total de la estructura. La reconstrucción completa del puente es necesaria.	100	7	7.7	8.4	9.45
80	Nivel 4 - Destrucción total		100	6	6.6	7.2	8.1

88

0	Nivel 0 - Sin daños	El puente no presenta daños visibles. El lahar no ha impactado la estructura de manera significativa, y no se observan signos de desgaste, erosión o acumulación de sedimentos.	0.5	0	0	0	0
---	---------------------	---	-----	---	---	---	---

La red vial nacional, en particular, podría tener interrupciones más frecuentes y severas que afectarían negativamente la logística, economía y seguridad de las comunidades dependientes de estas vías. Además, la variabilidad y el cambio en los patrones de precipitación dificultan la predicción y planificación, y también complican los esfuerzos para la gestión del riesgo de las poblaciones vulnerables. Esto requerirá un enfoque más adaptativo y dinámico y la adopción de estrategias de mitigación y respuesta más robustas, para enfrentar el incremento de los niveles de la amenaza que supone la variabilidad climática alterada por el CGA.

8.6 El CGA y su relación con el riesgo sísmico

8.6.1 Generalidades

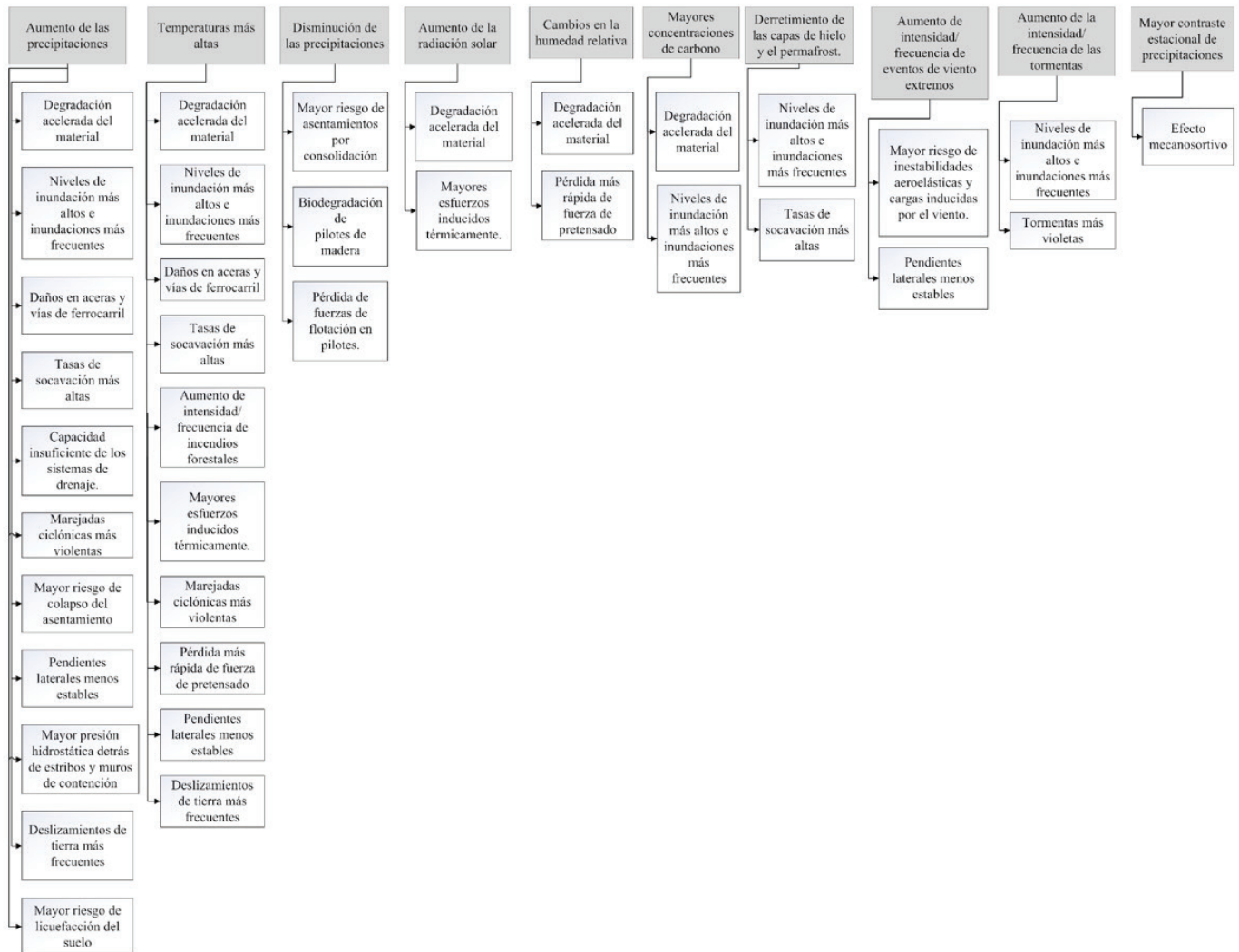
El CGA puede influir en el riesgo sísmico de los puentes a través de varias vías. Las alteraciones en las condiciones climáticas pueden modificar las características del suelo y la vegetación alrededor de las estructuras, lo cual afecta indirectamente la respuesta sísmica de los puentes. Por ejemplo, el incremento de la frecuencia e intensidad de los eventos de precipitación intensa puede conducir a una mayor saturación del suelo, lo cual disminuiría su capacidad soportante y podría aumentar la amenaza de la licuefacción durante un sismo (IPCC, 2014).

Además, las fluctuaciones en el nivel freático, debido a los cambios en los patrones de la alternancia entre los períodos lluviosos y secos podrían impactar la estabilidad de los cimientos. Un nivel freático elevado puede inducir presión hidrostática adicional sobre los cimientos, debilitando su resistencia estructural frente a movimientos sísmicos. Estas condiciones podrían alterar el comportamiento dinámico de los puentes y aumentar su vulnerabilidad ante los sismos. Por otro lado, las variaciones en las temperaturas extremas también podrían afectar los materiales de construcción y las juntas de expansión de los puentes, lo cual generaría fatiga y deterioro acelerado (Stewart, Wang, & Nguyen, 2014).

8.6.2 Factores del CGA que afectan la vulnerabilidad en las estructuras de los puentes

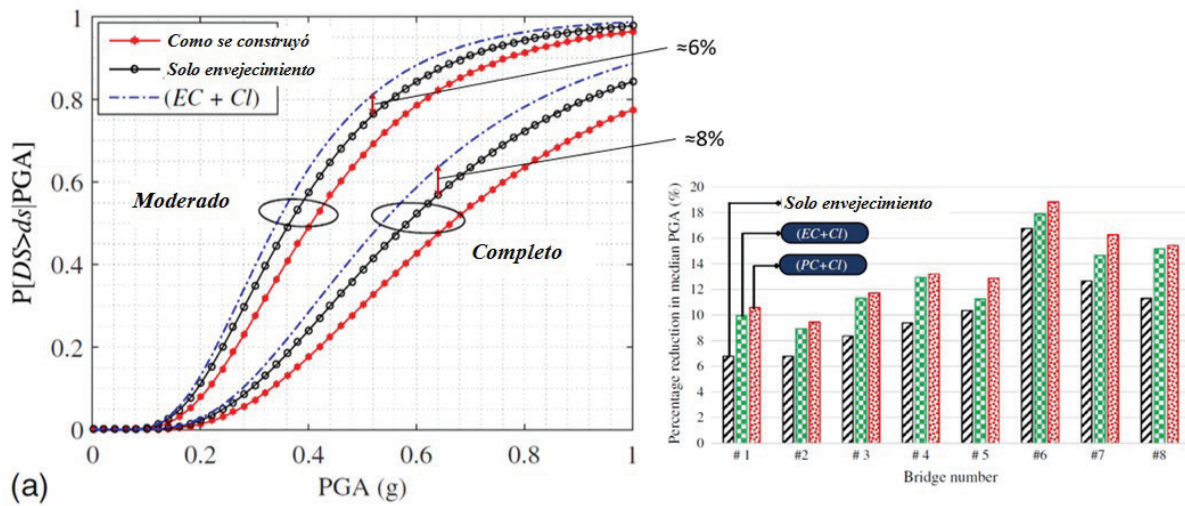
Nasr et al. (2019) cita estudios que indican que los puentes son susceptibles a los efectos del CGA. El incremento de la precipitación, temperaturas y radiación solar, los cambios en la humedad relativa y mayor concentración de CO₂ en la atmósfera, pueden producir la aceleración de la degradación de los materiales que conforman los puentes y otras estructuras. La Figura 34 presenta un esquema que muestra los efectos e impactos posibles del CGA sobre el riesgo en los puentes.

Figura 34. Ejemplos de la influencia del CGA en los puentes (Nasr, et.al., 2019)



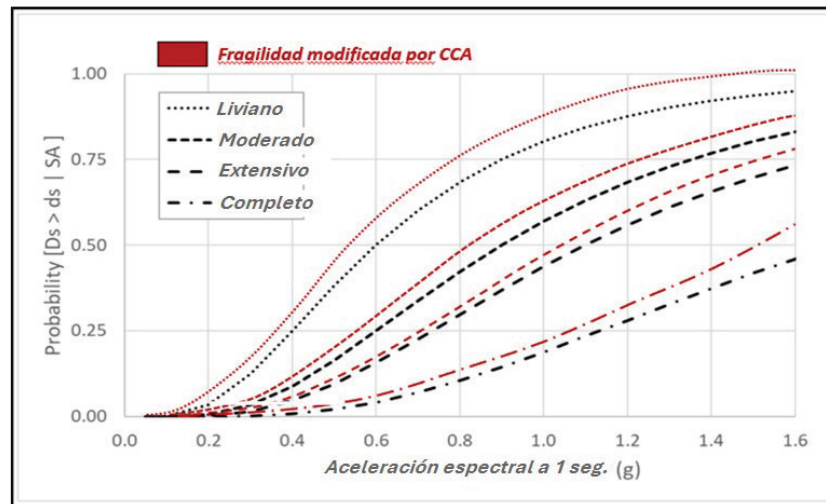
Como se mencionó en las secciones anteriores, para la evaluación del riesgo sísmico en los puentes, luego de conocer la amenaza en sus facetas distintas, se procede con el análisis de la vulnerabilidad y, para ello, se establecen las curvas de fragilidad, las cuales determinan las probabilidades de alcanzar o exceder diferentes grados de daños. Luego, debe considerarse la manera de evidenciar el impacto de los efectos del CGA en la vulnerabilidad de las estructuras. Mortagi & Ghosh (2020) realizaron estudios que evidencian el aumento en la vulnerabilidad sísmica producida por el deterioro de los materiales acelerado por el CGA. Los cambios en la humedad relativa, temperatura, exposición a los cloruros, salpicadura del agua marina (i.e. corrosión en los puentes ubicados en áreas costeras, etc.) impactan en el grado de deterioro de los materiales. Al considerar el efecto de uno o varios de estos factores, para un mismo estado límite, se generan incrementos sustanciales de la vulnerabilidad, tal y como se muestra en la Figura 35. Este principio también puede aplicarse a las circunstancias relacionadas con la inestabilidad de laderas (Mora, 2020a).

Figura 35. Variaciones en vulnerabilidad derivada de la amenaza sísmica en los puentes, bajo la influencia del calentamiento global antropogénico (CGA) (Mora, S; 2022a; Mortagi & Gosh, 2020).



En la conceptualización de la metodología Hazus, esto puede ser tomado en cuenta mediante la modificación de las curvas de fragilidad correspondientes a cada tipo de estructura (Figura 36).

Figura 36. Aumento en la vulnerabilidad de los puentes por la influencia del CGA



8.6.3 Modelos para la evaluación de la fragilidad sísmica considerando los efectos del CGA

La evaluación del riesgo sísmico en estructuras civiles, como los puentes, ha evolucionado para incorporar los efectos del CGA. En los estudios recientes (Chirdeep, et al. 2023; Mortagi & Ghosh, 2020) se menciona el incremento de la vulnerabilidad de estas estructuras debido a los factores ambientales cambiantes. Las metodologías contemporáneas integran la evaluación del deterioro por la corrosión inducida por el aumento de las temperaturas y los cambios en los patrones de precipitación, los cuales afectan la humedad relativa y la exposición a los agentes corrosivos. Además, las fluctuaciones en el nivel freático, consecuencia de las variaciones en el régimen pluviométrico y la frecuencia de las sequías, influyen en los cambios de la presión hidrostática sobre

los cimientos, lo cual incide sobre su resistencia estructural frente a los movimientos sísmicos. Estos factores son cruciales para elaborar las curvas de fragilidad sísmica modificadas, las cuales se derivan de los modelos probabilísticos según la demanda sísmica y la capacidad estructural, a lo largo del tiempo. Dichas curvas se desarrollan considerando distribuciones log-normales y mediante el ajuste de los parámetros que reflejan las condiciones ambientales específicas y proporcionan una herramienta para estimar los cambios futuros en el comportamiento dinámico de los puentes.

Los estudios disponibles, que tratan sobre el efecto del CGA sobre el riesgo sísmico, son recientes y se enfocan en el análisis del comportamiento estructural de componentes específicos en los puentes (e.g. pilas, apoyos) y no en toda la estructura. Sin duda, esto se debe a la complejidad para plantear modelos de análisis racionales que integren todos los componentes y describan la interacción entre cada ellos. A pesar de estas limitaciones, estos modelos permiten comprender los factores básicos y cómo el CGA afecta la vulnerabilidad global de la estructura.

Chirdeep et al. (2023) evaluaron las curvas de fragilidad sísmica, dependientes del tiempo, que incorporan los efectos del CGA para puentes de concreto reforzado ubicados en ambientes marinos y regiones de sismicidad elevada, tanto en su estado original, como bajo el deterioro debido a la corrosión. Este estudio se enfoca en el análisis del comportamiento de las pilas del puente evaluado. Las curvas se desarrollaron utilizando modelos probabilísticos de demanda sísmica y estimaciones de la capacidad, según los niveles del daño (DS). De igual forma que como se explicó en la sección 7.5.2, las curvas de fragilidad asumen que la demanda sísmica y la capacidad siguen distribuciones log-normales, cuya forma general depende del tiempo:

$$18) P_{f_{DS|IM}}(t) = \Phi \left\{ \frac{\ln \ln \left(\frac{EDP_{med}(t)}{S_c(t)} \right)}{\sqrt{\beta_{D|IM}^2(t) + \beta_C^2(t)}} \right\} = \Phi \left\{ \frac{\ln \ln (IM) - \ln (med(t))}{\zeta(t)} \right\}$$

... en donde:

- $P_{f_{DS|IM}}(t)$ = Probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño DS , en el tiempo t .
- $EDP_{med}(t)$, $S_c(t)$ = Medianas, estimadas para la demanda sísmica y la capacidad en el tiempo t .
- $\beta_{D|IM}$ y β_C = Desviaciones estándar log-normales, para cada demanda y capacidad.
- IM = Medida de la intensidad del movimiento del suelo (PGA o $S_a(t)$), según corresponda al parámetro utilizado al construir las curvas; de acuerdo con la metodología Hazus, $IM = S_a(1 \text{ s})$.

$$19) med(t) = \left[\frac{\ln \ln [S_c(t)] - \ln \ln (r_1(t))}{r_2(t)} \right]$$

$$20) \zeta(t) = \frac{\sqrt{\beta_{D|IM}^2(t) + \beta_C^2(t)}}{r_2(t)}$$

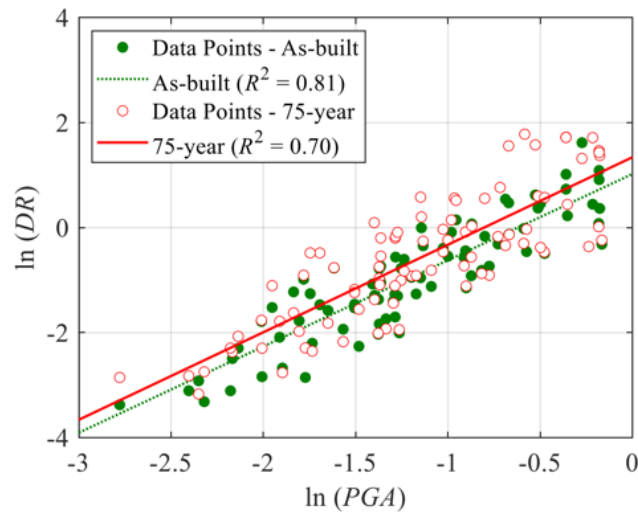
... en donde $med(t)$ y $\zeta(t)$ representan la mediana y la desviación estándar de la función de distribución log-normal acumulativa de las curvas de fragilidad.

Los modelos probabilísticos de demanda sísmica, utilizados por Chirdeep et al. (2023), se desarrollaron para diferentes edades de la estructura (0, 25, 50 y 75 años), con el objeto de identificar el efecto de los parámetros relacionados con el CGA y el deterioro de sus materiales, inducido por la corrosión. La mediana de demanda sísmica se considera que varía linealmente con la medida de la intensidad (IM) en el espacio logarítmico, según la siguiente ecuación:

$$21) \ln \ln [EDP_{med}(t)] = \ln \ln [r_1(t)] + r_2(t) \ln \ln (IM)$$

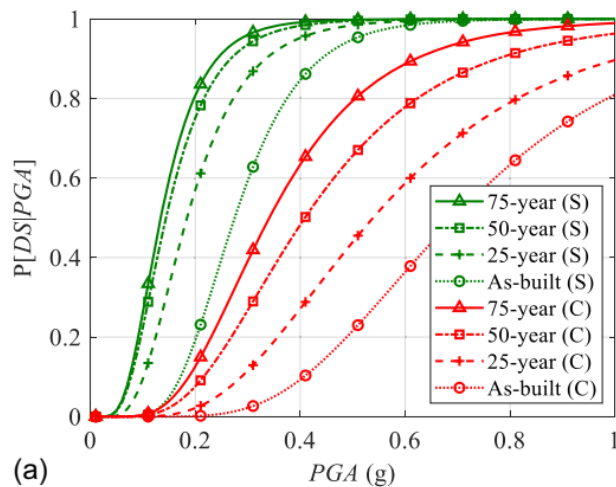
... en donde $EDP_{med}(t)$ es el valor de la mediana para el parámetro de demanda, definido según el análisis; r_1 y r_2 son coeficientes de regresión lineal para un tiempo t , obtenidos a partir de pruebas, ensayos y análisis no lineales tiempo-historia, para puentes construidos con cierta edad, corroídos y expuestos a diversas condiciones de exposición a salpicaduras marinas. En la Figura 37 se presenta como ejemplo un gráfico con los resultados de los análisis de modelos no lineales realizados por Chirdeep et al. (2023), donde se muestra la variabilidad en los datos de las muestras analizadas.

Figura 37. Ejemplo de resultados de análisis no lineales tiempo-historia para determinar los parámetros de regresión para el cálculo de $med(t)$ y $\zeta(t)$, mediante modelos para puentes corroídos a edades as-built y de 75 años, considerando la exposición a salpicaduras marinas y efectos del CGA. (Chirdeep et.al., 2023)



El estudio desarrollado por Chirdeep et al. (2023) destaca el aumento de la vulnerabilidad de los puentes envejecidos, debido a la corrosión inducida por el CGA. Compara la fragilidad sísmica de puentes en su estado original con aquellos de 25, 50 y 75 años corroídos bajo exposición a salpicaduras marinas. Los hallazgos muestran un aumento significativo de la vulnerabilidad. Por ejemplo, los valores medianos de PGA, para alcanzar los estados de los daños Leve y Completo (DSs), son significativamente más bajos para los puentes corroídos, lo que indica mayores probabilidades de falla, en comparación con los puentes en su estado original, como se muestra en la Figura 38.

Figura 38. Comparación de las curvas de fragilidad sísmica, dependientes del tiempo, para diferentes edades de la estructura (as built, 25, 50 y 75 años) y los estados de los daños completo (C) y ligero (S) (Chirdeep et al., 2023)



Las curvas de fragilidad, desarrolladas para considerar los efectos del CGA, se comparan mediante métodos tradicionales. El estudio muestra que las técnicas clásicas subestiman las probabilidades de falla, ya que no tienen en cuenta la temperatura in situ, la humedad relativa o la influencia de las grietas en el concreto sobre la tasa de corrosión. El modelo de corrosión mejorado, propuesto por Chirdeep y que incluye estos factores, proporciona una evaluación más realista de la vulnerabilidad sísmica de los puentes envejecidos. Estos hallazgos subrayan la importancia de incorporar los efectos del CGA y los factores ambientales durante la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de la infraestructura envejecida.

8.6.4 Modelos de cálculo del riesgo bajo el efecto del CGA sobre las curvas de fragilidad, según Hazus

Como se explicó en la sección 7.5.2, las curvas de fragilidad describen la probabilidad condicional de que una estructura sea dañada, más allá de un nivel específico, según la PGA o la aceleración espectral, para un período de vibración considerado (e.g. $S_a(1,0s)$). Estas curvas se definen mediante una función de la probabilidad acumulativa log-normal, como se muestra en la ecuación (1). Para modificar las curvas de fragilidad de Hazus, con el efecto del CGA, considerando el análisis mostrado en la sección 8.6.3, se deben determinar los parámetros de la función de probabilidad acumulativa log-normal (i.e. $\text{med}(t)$ y $\zeta(t)$), que son dependientes de los factores causantes de deterioro y factores asociados con el CGA que se desea considerar en el análisis (e.g. corrosión, exposición a cloruros, humedad relativa, cambios de temperatura, salpicaduras marinas, etc.), así como del componente estructural sometido a los análisis (pilas, apoyos, etc.). En la investigación realizada por Chirdeep et.al. (2023), se determinaron los valores de las medianas y desviaciones estándar asociadas con sus modelos de análisis. En su investigación se enfocaron en las pilas de concreto reforzado de los puentes considerados. Tomaron en cuenta los efectos de deterioro por parámetros atmosféricos (i.e. temperatura (T), humedad relativa (H) y presencia de cloruros (Cl)) y exposición a brisa y salpicadura marina, para diferentes edades de las estructuras. Los valores de $\text{med}(t)$ y $\zeta(t)$ obtenidos se muestran en la Tabla 29.

Tabla 29. Mediana (med) y desviación estándar (ζ) de las curvas de fragilidad en diferentes plazos (años), para salpicaduras marinas y exposición atmosférica, considera los efectos del CGA(Chirdeep et.al., 2023)

Años	Daño ligero		Daño moderado		Daño extenso		Daño completo	
	med	ζ	med	ζ	med	ζ	med	ζ
As-built	0,27	0,37	0,43	0,36	0,54	0,38	0,68	0,42
Exposición a salpicadura marina								
25-year	0,18	0,47	0,32	0,46	0,41	0,47	0,54	0,49
50-year	0,14	0,48	0,25	0,48	0,31	0,49	0,41	0,5
75-year	0,13	0,46	0,21	0,46	0,27	0,46	0,34	0,48
Exposición atmosférica marina								
25-year	0,27	0,37	0,43	0,36	0,54	0,38	0,68	0,42
50-year	0,19	0,45	0,34	0,45	0,44	0,46	0,56	0,48
75-year	0,16	0,44	0,28	0,43	0,35	0,44	0,44	0,45

Las curvas de fragilidad nuevas, modificadas por el efecto supuesto del CGA, se construyen posteriormente de la misma forma que las curvas originales. Con base en la información de esas curvas, se sigue el mismo procedimiento de análisis para la determinación de los grados de daño y pérdidas económicas, tal como fue descrito en las secciones anteriores, adoptado de la metodología Hazus.

9. Referencias bibliográficas

- AASHTO. (2020). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 9th edition. In American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- Abrahamson N. A. y Silva W. J. (1997). Empirical Response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes. *Seismological Research. Letters*, 68, 94-127.
- Abrahamson, N. A., Silva, W. J., & Kamai, R. (2014). Summary of the ASK14 Ground-Motion Relation for Active Crustal Regions. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1025–1055. <https://doi.org/10.1193/070913EQS198M>
- Aguilar, Z. (2011) "Evaluación de la amenaza sísmica". I Simposio Internacional, ACI, Tacna.
- Alvarado, G. (1984). Aspectos petrológicos-geológicos de los volcanes y unidades lávicas del cenozoico superior de Costa Rica. Tesis de Licenciatura, ECG-UCR.
- Aguilar, I., & Alvarado, G. E. (2014). Pérdidas humanas y económicas causadas por el vulcanismo en Costa Rica entre 1953 y 2005. *Revista Geológica de América Central*, 51, 93-128. <https://doi.org/10.15517/rgac.v51i1.165>
- Alvarado, G. E., & Schmincke, H. (1994). Stratigraphic and sedimentological aspects of the rain-triggered lahars of the 1963-1965 Irazú eruption, Costa Rica. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, 513-530.
- Alvarado, G. (2000). Volcanes de Costa Rica: Geología, historia y riqueza natural. Editorial UNED: San José, Costa Rica.
- Alvarado, G. E. (2009a). Aspectos geohidrológicos y sedimentológicos de los flujos de lodo asociados al terremoto de Cinchona (Mw 6,2) del 8 de enero del 2009, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 43. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i43.3458>
- Alvarado, G. E. (2009b). Los volcanes de Costa Rica: geología, historia, riqueza natural y su gente (3rd ed.). San José: UNED.
- Alvarado, G. E. (2010). Aspectos geohidrológicos y sedimentológicos de los flujos de lodo asociados al terremoto de Cinchona (Mw 6,2) del 8 de enero del 2009, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 43, 67-96.
- Alvarado, G. E., Brenes-André, J., Barrantes, M., Vega, E., de Moor, J. M., Avard, G., et al. (2016). The explosive activity of Turrialba volcano (Costa Rica) in 2010–2016. *Revista Geológica de América Central*, 55, 7-60. <https://doi.org/10.15517/rgac.v55i0.26965>
- Alvarado, G. E., & Soto, G. J. (2008). Volcanoes in the pre-Columbian life, legend, and archaeology of Costa Rica (Central America). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 356-362. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.01.032>
- Alvarado, G.E. & Gans, P.B. (2012). Síntesis geocronológica del magmatismo, metamorfismo y metalogenia de Costa Rica, América Central. *Revista Geológica de América Central*, 46, 7-122.
- Allen, T. I., & Wald, D. J. (2007). Topographic slope as a proxy for seismic site-conditions (V_{s30}) and amplification around the globe. *USGS Open-File Report*, 1–70.
- Arcement, G.J., Schneider, V.R. (1989). Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. United States Geological Survey WSP 2339. Washington, D.C. y Denver, Colorado.
- Aspinall, W., Auker, M., Hincks, T., Mahony, S., Nadim, F., Pooley, J., Sparks, R., & Syre, E. (2011). Volcano hazard and exposure in GFDRR priority countries and risk mitigation measures. GFDRR Volcano Risk Study. Bristol: Bristol University Cabot Institute and

NGI Norway for the World Bank. NGI Report, 20100806

Auker, M. R., Sparks, R. S. J., Siebert, L., Crosweller, H. S., & Ewert, J. (2013). A statistical analysis of the global historical volcanic fatalities record. *Journal of Applied Volcanology*, 2(1), 1-24.

Auker, M., Sparks, S., Jenkins, S., Aspinall, W., Brown, S. K., Deligne, N., Jolly, G., Loughlin, S., Marzocchi, W., Newhall, C., & Palma, J. (2015). Development of a new global Volcanic Hazard Index (VHI). In S. Loughlin, S. Sparks, S. Brown, S. Jenkins, & C. Vye-Brown (Eds.), *Global Volcanic Hazards and Risk* (pp. 349-358). Cambridge: Cambridge University Press.

Bernard R. Wair, Jason T. DeJong (2012). Guidelines for Estimation of Shear Wave Velocity Profiles. Department of Civil and Environmental Engineering University of California.

BGS & SENARA. (1985). Mapa hidrogeológico del Valle Central de Costa Rica. 1:50 000, E.S.R. Limited, Inglaterra.

Baxter, P. J. (1983). Health hazards of volcanic eruptions. *Journal of the Royal College of Physicians of London*, 17(3), 180-182.

Blong, R. J. (1984). *Volcanic hazards: A sourcebook on the effects of eruptions*. Sydney, Australia: Academic Press Australia.

Bohnenberger, O.H. (1968). A photogeological study of the western Central Valley, Costa Rica. Ministerio de Agricultura y Ganadería y Servicio Nacional de Acueductos y Alcantarillados, San José. 20 pp. + Mapa fotogeológico 1:50 000.

Brown, S. K., Auker, M., & Sparks, R. (2015). Populations around Holocene volcanoes and development of a Population Exposure Index. In S. Loughlin, S. Sparks, S. Brown, S. Jenkins, & C. Vye-Brown (Eds.), *Global Volcanic Hazards and Risk* (pp. 223-232). Cambridge: Cambridge University Press.

Brown, S. K., Sparks, R. S. J., Mee, K., Vye-Brown, C., Ilyinskaya, E., Jenkins, S. F., & Loughlin, S. C. (2015). Country and regional profiles of volcanic hazard and risk (Appendix B). In S. C. Loughlin, R. S. J. Sparks, S. K. Brown, S. F. Jenkins, & C. Vye-Brown (Eds.), *Global Volcanic Hazards and Risk*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316276273.030>

Bommer, J. J., & Rodríguez, C. E. (2002). Earthquake-induced landslides in Central America. *Engineering Geology*, 63, 189-220.

Buckle, I., Friedland, I., Mander, J., Martin, G., Nutt, R., & Power, M. (2006). Seismic retrofitting manual for highway structures: Part 1. Bridges (Publ. FHWA-HRT-06-032). Federal Highway Administration, Office of Infrastructure Research and Development.

Carballo, R. (2019). Aplicación y determinación de la eficiencia del método HSQI en la sección de montaña, entre el peaje del Zurquí y el cruce de Río Frío de la Ruta Nacional No.32. Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica.

Cardona, O.D., Marulanda, M.C., Marulanda, P.M., Bernal, G.A., Carreño, M.L., Villegas, C.P., Molina, J.F., Herrera, S.A., Rincón, D.F., Grajales, S., González, D., Maskrey, A. (2023a). Measuring Infra-structure Disaster Risk Resilience at the Global Level, Background Report, INGENIAR: Risk Intelligence for the CDRI Flagship Report. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27937.58726>

Cardona, O.D., Bernal, G.A., Villegas, C.P., Molina, J.F., Herrera, S.A., Marulanda, M.C., Rincón, D.F., Grajales, S., Marulanda, P.M., González, D., Maskrey, A. (2023b). Multi-hazard Disaster Risk Model of Infrastructure and Buildings at the Global Level. Background Report, INGENIAR: Risk Intelligence for the CDRI Flagship Report. <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.11160.37124>

Castruccio, A. (2005). Lahares generados por la erupción de 1971, en el flanco occidental del volcán Villarrica, Andes del Sur (39,5°S) (Memoria de título). Universidad de Chile.

Castro, M. (s.f.). El cambio climático antropogénico. Divulgameteo: <https://www.divulgameteo.es/archivos/articulos/lecturas/CC-antropog%C3%A9nico-Castro.pdf>

Caterpillar (2000). Handbook of Ripping. 20th Edition.

Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño. (s. f.). Definición del riesgo. Obtenido de CIIFEN: <https://ciifen.org/definicion-de-riesgo/#:~:text=Exposici%C3%B3n%20es%20la%20condici%C3%B3n%20de,ocurrencia%20de%20un%20evento%20adverso>

CFIA. (2013). Lineamientos para diseño sismorresistente puentes. San José: Laboratorio Nal. Materiales, Modelos Estructurales.

CFIA. (2016). Código Sísmico de Costa Rica 2010, Revisión 2014. Cartago: Tecnológica de Costa Rica.

Chirdeep, N., Shivang, S., Bahurudeen, A. (2023). Climate Change Impact on Seismic Vulnerability of Aging Highway Bridges. ASCE-ASME Jour. Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 9(4). doi: 10.1061/AJRUA6.RUENG-1068

CIESIN, Columbia University, FAO, & CIAT. (2011). Gridded population of the world, version 3 (GPWv3): Population density grid, future estimates. Palisades, NY: Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), Columbia University. Retrieved from <http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw>

Climent, A., Rojas, W., Alvarado, G. E., & Benito, B. (2009). Costa Rica. In B. Benito & Y. Torres (Eds.), Amenaza sísmica en América Central (pp. 229-251). Madrid: Entinema.

Córdoba, G., Sheridan, M.F., Pitman, B., 2010, A two-phase, depth-averaged model for geophysical mass flows in the TITAN code framework (resumen). En 28th IUGG Conference on Mathematical Geophysics: Pisa, Italia, CMG-IUGG, 1.

Córdoba, G., Villarosa, G., Sheridan, M.F., Viramonte, J.G., Beigt, D., Salmuni, G. (2015). Secondary lahar hazard assessment for Villa la Angostura, Argentina, using Two-Phase-Titan modelling code during 2011 Cordón Caulle eruption. Natural Hazards Earth System Sciences, 15, 757–766.

Cornell A. (1968). "Engineering Seismic Risk Analysis", Bulletin of the Seismological Society of America, 58 (5), 1583-1606.

Cottrell, E. (2015). Global distribution of active volcanoes. In P. Papale & J. F. Shroder (Eds.), Volcanic Hazards Risks Disaster (pp. 1-16). Amsterdam: Elsevier.

Dalbey, K., Patra, A., Pitman, E., Bursik, M., Sheridan, M. (2008). Input uncertainty propagation methods and hazard mapping of geophysical mass flows. Journal of Geophysical Research (Solid Earth), 113, 2156–2202.

Dalbey, K., Patra, A., Pitman, E., Bursik, M., & Sheridan, M. (2008). Input uncertainty propagation methods and hazard mapping of geophysical mass flows. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 113, B09201.

DeMets, C. (2001). A new estimate for present-day Cocos-Caribbean plate motion: Implications for slip along the Central American volcanic arc. Geophysical Research Letters, 28(20), 4043–4046. <https://doi.org/10.1029/2001GL013518>

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2022a). Hazus Earthquake Model Technical Manual. Hazus 5.1. Washington, DC: FEMA.

Denyer, P., Kussmaul, S. & Arias, O. (1994). Estratigrafía de las rocas ígneas. En: Denyer, P. & Kussmaul, S. (comps.): Atlas Geológico Gran Área Metropolitana. Editorial Tecnológica de Costa Rica, 61-70.

Denyer, P., Montero, W. & Alvarado, G. (2003). Atlas Tectónico de Costa Rica. Editorial de la Universidad de Costa Rica. San José. Texto y mapas.

- Denyer, P., Montero, W. & Alvarado, G. (2009). Atlas Tectónico de Costa Rica. Editorial Universidad de Costa Rica, San José.
- EUROCLIMA+. (s.f.). Escenarios de Cambio Climático Centroamérica, CMIP6. Ministerio de Medio Ambiente. <https://centroamerica.aemet.es/index30.html>
- Fallas, M., Prado, A., Mora, M. M., Ruiz, P., Alfaro, E. J., & Soto, G. J. (2018). El deslizamiento del 8 de diciembre de 1994 en el volcán Irazú (Costa Rica): aspectos históricos y geomorfología con base en fotografías aéreas históricas y recientes. *Revista Geológica de América Central*, 58, 55-84. <https://doi.org/10.15517/rgac.v58i0.32844>
- FEMA. (2022a). Hazus Earthquake Model Technical Manual. Hazus 5.1. Washington, DC, Estados Unidos: Federal Emergency Management Agency (FEMA).
- FEMA. (2022b). Hazus Flood Model User Guidance. Hazus 5.1. Washington, DC, Estados Unidos: Federal Emergency Management Agency (FEMA).
- FEMA. (2022c). Hazus Inventory Technical Manual. Hazus 6.0. Washington, DC, Estados Unidos: Federal Emergency Management Agency (FEMA).
- FHWA. (2001). Evaluating Scour at Bridges. 4a Ed. Federal Highway Adm. Hydraulic Eng. Circular No. 18, Washington, D.C.
- Gans, P.B., Alvarado, G., Pérez, W., Macmillan, I., & Calvert, A. (2003). Neogene Evolution of the Costa Rican Arc and Development of the Cordillera Central. Abstract, Geological Society of America, Cordilleran Section, 99th Annual, April 2003.
- García, M. (Ed.). (2007). Sedimentation Engineering. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- Global Volcanism Program (GVP). (2013). Volcanoes of the world, v. 4.11.2 (VOTW4) (02 Sep 2022). Venzke, E. (Ed.). Smithsonian Institution. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013IPCC> . (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability - Part A: Global and Sectoral Aspects. Cambridge University Press.
- Hamill, L. (1999). Bridge Hydraulics. E & FN Spon, Londres y Nueva York.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2021). Análisis de la mortalidad por eventos meteorológicos extremos en Costa Rica. Período 1980-2017. IMN.
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- ISO 22301. (2019). Security and resilience. Business continuity management systems requirements. <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/07/51/75106.html?browse=ics>
- Iverson, R. M., Schilling, S. P., & Vallance, J. W. (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *GSA Bulletin*, 100, 972-984. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1998\)110<0972:ODOLIH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1998)110<0972:ODOLIH>2.3.CO;2)
- Jara J. y Rosenblueth E. (1988). Probability distribution of time between characteristic subduction earthquakes. *Earthquake Spectra*, 4, 499-529.
- Janda, R. J., Daag, A. S., Delos Reyes, P. J., Newhall, C. G., Pierson, T. C., Punongbayan, R. S., ... & Umbal, J. V. (1996). Assessment and response to lahar hazard around Mount Pinatubo, 1991 to 1993. In R. S. Punongbayan & C. G. Newhall (Eds.), *Fire and Mud*:

- Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines (pp. 107-140). Kramer, S. L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. New Jersey: Prentice Hall.
- Kappes, M.S., Papathoma-Kohle, M., & Keiler, M. (2012). Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology. *Applied Geography*, 32, 577-590.
- Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., Mechler, R., Bouwer, L., Arnell, N., Mach, K., Muir-Wood, R., Brakenridge, G.R., Kron, W, Benito, G., Honda, Y., Takahashi, K & Shertyukov, B. (2014). Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1-28.
- Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME). (2015). Generación de lahares generados por el volcán Turrialba y su posible afectación de la red vial nacional. San José: Universidad de Costa Rica. Informe.
- Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LANAMME). (2024). Visor Cartográfico de LanammeUCR. <https://gislanamme-udecr.hub.arcgis.com/>
- Laporte, M., & Soto, G. (2017). Estudio de Amenaza Sísmica para puentes ubicados sobre Ruta Nacional No. 32.
- Linkimer, L. & Vargas, A. (2015). Costa Rica: Mapas de isosistas de terremotos importantes (1888-2012). Informe del Instituto Costarricense de Electricidad y la Red Sismológica Nacional (RSN: UCR-ICE).
- Linkimer, L. (2003). Neotectónica del extremo oriental del Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica. Tesis de Licenciatura, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.
- López, I. (2016). Estudio de la generación de espectros medios condicionales utilizando la base de datos de sismos con magnitud de momento igual o superior a 6.5 en Chile. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Santiago, Chile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/142077>
- Lowe, D.R., Williams, S.N., Leigh, H., Connor, C.B., Gemmell, J.B., Stoiber, R.E. (1986). Lahars initiated by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia. *Nature*, 324, 51-53. <https://doi.org/10.1038/324051a0>
- Madrigal, R. & Rojas, E. (1980). Manual descriptivo del mapa geomorfológico de Costa Rica (escala 1:200 000). SEPSA, Imprenta Nacional: San José.
- Marzocchi, W., Mastellone, M.L., Di Ruocco, A., Novelli, P., Romeo, E., Gasparini, P. (2009). Principles of multi-risk assessment: Interaction amongst natural and man-induced risks. European Commission, EUR23615, 72 pp.
- Méndez, J., Soto, G.J., Zamora, N., Vargas, A., Sjöbohlm, L., Bonilla, E., Barahona, D., Solís, L., Kycl, P. & Baroñ, I. (2009). Geología de los deslizamientos provocados por el Terremoto de Cinchona, Costa Rica (Mw 6,2; 8 de enero del 2009) en la Ruta 126 (Varablanca-San Miguel). X Congreso Nacional de Geotecnia y V Encuentro Centroamericano de Geotecnistas. Costa Rica.
- Maskrey, A. (1993). Los desastres no son naturales. La Red Lima, 140 p.
- McGuire R. (2007). Probabilistic seismic hazard analysis: Early history. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 37, 329-338
- McGuire, R. (2004). *Seismic Hazard and Risk Analysis*. Colorado: Earthquake Engineering Research Institute.
- MERCI-CR. (2022). Metodología de Evaluación del Riesgo Climático para Infraestructura. San José, Costa Rica.
- Montero, W., & Alvarado, G.E. (1995). El terremoto de Patillos del 30 de diciembre de 1952 ($M_s = 5.9$) y el contexto-geotectónico

de la región del volcán Irazú, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 18, 25-40.

Montero, W., Rojas, W. & Linkimer, L. (2013). Neotectónica de las fallas Ochomogo y Capellades y su relación con el sistema de Falla de Aguacaliente, falda sur del macizo Irazú-Turrialba, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 48, 119-139.

Montero, W., Rojas, W., Boschini, I., Barquero, R., Soto, G.J., Alvarado, G.E., Vargas, A., Taylor, W., López, A., Climent, A., Moya, A., Peraldo, G., Redondo, C. & Taylor, M. (2009). El terremoto de Cinchona. En: Barquero, R. (Ed.): El terremoto de Cinchona del 8 de enero de 2009. Informe interno Red Sismológica Nacional, 34-59.

Montero, W., Soto, G.J., Alvarado, G.E. & Rojas, W. (2010). División del deslizamiento tectónico y transtensión en el macizo del volcán Poás (Costa Rica), según estudios neotectónicos y sismicidad histórica. *Revista Geológica de América Central*, 43, 13-36.

Mora, R., & Pirulli, M. (2017). Deslizamiento Las Torres, volcán Irazú, Costa Rica: definición de su volumen y su dirección preferencial de movimiento. *Revista Geológica de América Central*, 56, 51-67. <https://doi.org/10.15517/RGAC.V0I56.29236>

Mora, S. (1993a). Análisis preliminar de la vulnerabilidad económica de la ciudad de Cartago, a causa de los efectos de una avalancha que transite por el río Reventado, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 15, 65-80.

Mora, S. & Vahrson, G. (1993b). Determinación "a priori" de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos. https://www.researchgate.net/publication/283730365_Determinacion_a_priori_de_la_amenaza_de_deslizamientos_utilizando_indicadores_morfodinamicos

Mora, S. & Vahrson, W. (1993c). Macrozonation for slope instability in Costa Rica. *Manual for Zonation, Seismic Geotechnical Hazards*. TC4 Tech. Comm. Earthquake Geotechnical Eng. Int. Soc. Soil Mech. Found. Eng. Japan SSMFE., 118-125.

Mora, S. & Vahrson, G. (1994). Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination. *Bulletin of Association of Engineering Geologists*. XXXI (1), 49-58.

- https://www.researchgate.net/publication/275971541_Macrozonation_Methodology_for_Landslide_Hazard_Determination
- https://www.academia.edu/12298837/Macrozonation_methodology_for_landslide_hazard_determination
- Otros ejemplos disponibles en el Internet: <https://www.google.com/search?hl=en&source=hp&q=mora-vahrson&aq=f&aqi=&aql=&oq=> ; https://www.google.com.ar/?gws_rd=ssl#q=Mora-vahrson

Mora, S. et. Al. (2013). Slope instability hazard in Haiti: Emergency assessment for a safe reconstruction. https://www.academia.edu/12281963/Slope_instability_hazard_in_Haiti_Emergency_assessment_for_a_safe_reconstruction

Mora, S., Saborío, J., Saborío, M. & Barrios, R. (2016). Evaluación geotécnica de los cortes y terraplenes, elaboración del mapa de amenaza e inspección y evaluación de las obras de drenaje del km 0+000 al km 230+100 de la carretera Durango-Mazatlán. Elm Consultores. Informe técnico inédito. 220 pp.

Mora, S. (2022a). Análisis del riesgo derivado de la amenaza de la inestabilidad de laderas bajo influencia del calentamiento global antropogénico: propuesta para un enfoque metodológico. *Revista Geológica de América Central*. I, 66, 1-25, 2022. doi: 10.15517/rgac.v0i66.49999. ISSN: 0256-7024. https://www.researchgate.net/publication/358885160_Analisis_del_riesgo_derivado_de_la_amenaza_de_la_inestabilidad_de_laderas_bajo_influencia_del_calentamiento_global_antropogenico_propuesta_de_enfoque_metodologico_Slope_instability_hazard_and_risk_ana

Mora, S. (2022b). La Geodinámica externa: Aspectos geomecánicos, hidrogeológicos, climáticos y del riesgo. Editorial de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería. 217 pp. https://www.amazon.com/gp/product/B0B728KLNN/ref=as_li_tl?ie=UTF8&creativeASIN=B0B728KLNN&linkCode=as2

- Muñoz, J. (2015). Estudio de vulnerabilidad sísmica de puentes en Costa Rica mediante el uso de curvas de fragilidad. Congreso Estructuras 2015 y XIII Seminario de Ingeniería Estructural y Sísmica, San José, Costa Rica.
- Mortagi, M. & Gosh, J. (2020). Climate Change Considerations for Seismic Vulnerability Assessment of Aging Highway Bridges, *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 6 (1): 04020005. DOI: 10.1061/AJRUA6.0001038
- Nasr, A., Kjellström, E., Björnsson, I., Honfi, D., Ivanov, O., & Johansson, J. (2019). Bridges in a changing climate: a study of the potential impacts of climate change on bridges and their possible adaptations. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(4), 738-749. doi:10.1080/15732479.2019.1670215
- National Research Council. (1991). The eruption of Nevado Del Ruiz Volcano Colombia, South America, November 13, 1985. The National Academies Press, 128 p.
- National Research Council. (1994). Mount Rainier: Active Cascade Volcano. The National Academies Press, 128 p.
- New York State Department of Transportation. (2020). Bridge and Large Culvert Inventory Manual. Office of Structures.
- Paniagua, S., Salazar, L.G., Kussmaul, S., Monge, A., & Obando, L.G. (1996). Síntesis de la amenaza volcánica y estimación básica del riesgo, volcán Rincón de la Vieja. Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, 64 págs.
- Peraldo, G., & Montero, W. (1999). Sismología histórica de América Central. Instituto Panamericano de Geografía e Historia, México, 347 p.
- Peraldo, G., & Montero, W. (1994). Los temblores del período colonial de Costa Rica. *Tecnológica de Costa Rica*, Cartago, 162 p.
- Quesada-Román, A. (2020). Flash flood impacts of Hurricane Otto and hydrometeorological risk mapping in Costa Rica. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 120, 142. <https://doi.org/10.1080/00167223.2020.1822195>
- Ramírez, O., Mora, S., Mora, I., Vega, B., Vargas, G., Carvajal, G., Brenes, G., Valverde, R., Soto, G., Freer, G., Solera, L.C., Mora, R. & Romero, E. (1988). Diagnóstico del estado actual de manejo de la cuenca alta del Río Virilla. Proyecto Regional de Manejo de Cuenas: PRMC-CATIE/ROCAP-AID. Costa Rica.
- Red Sismológica Nacional (RSN). (2009). El terremoto de Cinchona del jueves 8 de enero de 2009. *Revista Geológica de América Central*, 40, 91-95.
- Red Sismológica Nacional. (2010). Informe sobre la amenaza sísmica en Costa Rica. San José: Universidad de Costa Rica. Obtenido de https://rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Informes_sismos/amenaza_sismica_cr.pdf
- Ruiz, P., Mana, S., Gutiérrez, G., Alarcón, G., Garro, J., & Soto, G.J. (2018). Geomorphological insights on human-volcano interactions and use of volcanic materials in pre-hispanic cultures of Costa Rica through the Holocene. *Frontiers in Earth Science*, 6, e13. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00013>
- Ruiz, P., Carr, M., Alvarado, G., Soto, G., Mana, S., Feigenson, M., Sáenz, L. (2019). Coseismic Landslides Susceptibility Analysis Using LiDAR Data PGA Attenuation and GIS: the case of Poás Volcano, Costa Rica, Central America. Springer, Switzerland.
- Ruiz, P., Rodríguez, N., Valverde, J., Marden, A., Vecchiarelli, L., Seal, D.M., Nowicki Jessee, M.A., & Hamburger, M.W. (2020). A comprehensive catalog of coseismic landslides in Costa Rica: Toward the development of an empirical landslide hazard model. AGU Fall Meeting 2020 [Poster]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12238.18245>

- Ruiz, P., Mora, M., Montero, K., & Soto, J.G. (2021). Aspectos poco conocidos del deslizamiento de Las Torres del volcán Irazú: entre grietas, operadores de antenas, coyotes y fulguritas. Poster, 5° Congreso Geológico UCR-2021. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30098.99521>
- Saborío, MdM. 2023. Análisis geoespacial de los parámetros analíticos para la macrozonificación de la inestabilidad de laderas, según la metodología Mora-Vahrson; Parque Nacional Braulio Carrillo. Sistemas Geoespaciales, S.A. (SGSA). Informe interno de trabajo, inédito. 44pp.
- Salazar Mondragón, L. G. (2007). Modelaje de la amenaza al deslizamiento mediante: ILWIS - Mora & Vahrson (Issue April 2007). <http://hercules.cedex.es/hidraulica/PROHIMET/Br07/Comunicaciones/Salazar.pdf>
- Sapper, K. (1925). Los volcanes de la América Central. Max Niemayer: Halle (Saale).
- Sasidharan, M., Parlikad, A.K., Schooling, J., Hadjidemetriou, G.M., Hamer, M., Kirwan, A. & Roffe, S. (2023) A bridge scour risk management approach to deal with uncertain climate future. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 114, 103567, ISSN 1361-9209. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103567>
- Scherbaum, F., Bommer, J. J., Bungum, H., Cotton, F., & Abrahamson, N. A. (2005). Composite Ground-Motion Models and Logic Trees: Methodology, Sensitivities, and Uncertainties. Bulletin of the Seismological Society of America, 95(5), 1575–1593. <https://doi.org/10.1785/0120040229>
- Schilling, S.P. (2014). LAHARZ - GIS Programs for automated mapping of lahar inundation hazard zones: U.S. Geological Survey Open - File Report 2014-1073, 82 pp.
- Sheridan, M.F., Bonnard, C., Carreno, R., Siebe, C., Strauch, W., Navarro, M., Calero, J.C., & Trujillo, N.B. (1999). Report on the 30 October 1998 Rockfall/avalanche and breakout flow of Casita Volcano, Nicaragua, hurricane Mitch. Landslide News, 12, 2-4.
- Scott, K.M., Vallance, J.W., Kerle, N., Macías, J.L., Strauch, W., & Devoli, G. (2005). Catastrophic precipitation-triggered lahar at Casita volcano, Nicaragua: occurrence, bulking, and transformation. Earth Surface Processes and Landforms, 30, 59-79.
- Solano, J.P. & Soto, G.J. (2020). Geología, estratigrafía, evolución y mapa del macizo volcánico del Barva. Cuarto Congreso Geológico UCR-2020, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, San José, Programa y resúmenes, 39.
- Soto, G.J. (coord.) (2004). Mapa geológico de una parte de las hojas Abra y Barva, Valle Central, provincias de Alajuela, Heredia y San José. Convenio AyA - FUNDEVI, Universidad de Costa Rica [Inf. final].
- Soto, G.J. (1994). Volcanología Física. En: Denyer, P. & Kussmaul, S. (comps.): Atlas Geológico Gran Área Metropolitana. Editorial Tecnológica de Costa Rica, 131-146.
- Soto, G.J. (1999). Geología Regional de la Hoja Poás (1:50 000). En: Alvarado, G.E. & Madrigal, L.A. (Eds.): Estudio Geológico-Geotécnico de Avance a la Factibilidad del P.H. Laguna Hule. – Inf. Interno ICE, San José, 15-45.
- Sparks, R., Aspinall, W., Crosweller, H., & Hincks, T. (2013). Risk and uncertainty assessment of volcanic hazards. Risk and Uncertainty Assessment, Natural Hazards, Rougier, J., Sparks, R.S.J., Hill, L. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, p. 588.
- Stewart, M., Wang, X., & Nguyen, M. (2014). Climate adaptation engineering and risk-based design and management of infrastructure. En Maintenance and Safety of Aging Infrastructure (págs. 641-684). Taylor & Francis Group. doi:10.1201/b17073-22
- Soto, G. (2004). La erupción del Rincón de la Vieja del 8 de mayo de 1991. San José: Costa Rica. Comisión Nacional de Prevención de desastre y Atención de Emergencias (CNE).

- Thornthwaite, C.W. & Mather, J.R. (1957). Instructions and tables for computing Potential Evapotranspiration and the Water Balance. En "Climatology X:3", Orexal, Institute of Technology, Canterton, New Jersey.
- Thouret, J.-C., & Lavigne, F. (2000). Lahars: occurrence, deposits, behaviour of volcanohydrologic flows. *Volcanoclastic Rocks, from Magma to Sediments*, Leyrit H., Montenat C. (Eds.). Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, pp. 151-174.
- Tilling, R.I. (1989). Volcanic hazards and their mitigation: Progress and problems. *Reviews of Geophysics*, 27(2), 237-269.
- Tilling, R.I. (1996). *Volcanoes*. U.S. Geological Survey, 45 p.
- Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1-2), 123-138.
- USACE. (2010). HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Version 4.1. Hydrologic Engineering Center. U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California.
- UNOPS. (02 de julio de 2024). Respuesta a Oficio IMN-DD-024-2024, Ref. 24024-240702-UNOPS-WGB-293. San José, Costa Rica.
- USGS. (2023). Global Slope Vs30. <https://usgs.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=8ac19bc334f747e486550f32837578e1>
- Vallance, J.W., & Iverson, R.M. (2015). Lahars and their deposits. In: *The Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, pp. 649-664. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00037-7>
- Vega, P. (2019). Modelación de lahares del sistema volcánico Turrialba producto del período de actividad 2010-2017 y su posible impacto sobre localidades e infraestructura vial. Tesis Licenciatura, Escuela de Geografía, Universidad de Costa Rica.
- Wair, B. R., Dejong, J. T., & Shantz, T. (2012). Guidelines for Estimation of Shear Wave Velocity Profiles. *Pacific Earthquake Engineering*, 8 (December), 68.
- Wilson, G., Wilson, T.M., Deligne, N.I., & Cole, J.W. (2014). Volcanic hazard impacts critical infrastructure: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 286, 148-182. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.08.030>
- SNIT. (s.f.). Sistema Nacional de Información Territorial. https://www.snitcr.go.cr/ico_servicios_ogc
- Youngs, R. R., & Coppersmith, K. J. (1985). Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(4), 939-964.
- Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H. K., Somerville, P. G., Fukushima, Y., & Fukushima, Y. (2006). Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 898-913. <https://doi.org/10.1785/0120050122>

9.1 Glosario

Alerta (ver también "observación, vigilancia, alerta, advertencia, alarma, respuesta y continuidad operativa")	La alerta es un estado casi permanente de vigilia, el cual permite identificar situaciones y circunstancias que pudieran evolucionar hacia algún peligro potencial, es decir, que sea capaz de generar daños. Se trata de un proceso inherente de percepción y evaluación consciente de las situaciones que suceden en el entorno. Permite evaluar y sustentar las decisiones acerca de los acontecimientos previsibles y significativos para la seguridad de una persona, la comunidad o el país.
Adaptación (ver también Capacidad de adaptación al cambio climático)	Acciones e intervenciones necesarias, de cara a los efectos e impactos probables de las amenazas naturales y antropogénicas, según las condiciones de vulnerabilidad, para moderar los daños y pérdidas cuando los recursos y condiciones disponibles para la prevención y mitigación son insuficientes y existen niveles residuales del riesgo sin cobertura. Para ello, se deben aprovechar las oportunidades para potenciar las condiciones de resiliencia de los sistemas económicos, sociales, ambientales, físico-espaciales, ambientales y culturales, en los ámbitos regional, nacional y local, de forma mensurable, reportable y verificable. Se incluyen los ajustes que los sistemas humanos y naturales deben realizar para responder a los efectos e impactos derivados de las amenazas naturales y antropogénicas y que permitirán mitigar, moderar o evitar los daños, pérdidas y consecuencias y, además, aprovechar y potenciar las oportunidades positivas y beneficios sus respectivos.
Advertencia	Advertencia. Del lat. <i>advertēre</i>. Conjug. actual c. sentir. 1. tr. Fijar en algo la atención, reparar, observar. 2. tr. Llamar la atención de alguien sobre algo, hacer notar u observar. U. t. c. intr. 3. tr. Aconsejar, amonestar, enseñar, prevenir. 4. tr. Avisar con o sobre amenazas. <i>Real Academia Española</i> © Todos los derechos reservados.
Afectación	Aunque se utiliza muy frecuentemente, la palabra "afectación" tiene otro significado diferente al que se le quiere aplicar. Es preferible utilizar los términos: i) "efectos" (ref/. al daño directo; en el corto plazo, inmediato; sobre los acervos, capital fijo, bienes y servicios; ejemplo: kilómetros de carretera dañada, hectáreas de cultivos de arroz, muertos, heridos, etc.), ii) "impactos" (ref/. a la pérdida; mediatos, en el mediano plazo; sobre los flujos económicos y situaciones sociales; ejemplo: lucro cesante, excesos de gastos, reducción de los ingresos, sobrecostos, costos de reposición, etc.) y iii) "consecuencias" (largo plazo, sobre los indicadores macroeconómicos y sociales; pueden ser directas o indirectas; ejemplo: influencia sobre el PIB, el IDH, pérdida de acceso a los servicios de educación, salud, agua potable, impacto ambiental y sobre los recursos naturales, etc.) (https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/df2fa48c-418c-4b2a-957c-0bdd97181d27/content). afectación Del lat. <i>affectatio</i>, -ōnis. 1. f. Acción de afectar. 2. f. Falta de sencillez y naturalidad. 3. f. Extravagancia presuntuosa en la manera de ser, de hablar, de actuar, de escribir, etc. <i>Real Academia Española</i> © Todos los derechos reservados afectar Del lat. <i>affectāre</i>.

	1. tr. Poner demasiado estudio o cuidado en las palabras, movimientos, adornos, etc., de modo que pierdan la sencillez y naturalidad. 2. tr. fingir (ll dar a entender lo que no es). Afectar celo, ignorancia. 3. tr. Dicho de una cosa: Hacer impresión en alguien, causando en él alguna sensación. U. t. c. prnl. 4. tr. Atañer o incumbir a alguien. 5. tr. Menoscabar, perjudicar, influir desfavorablemente. 6. tr. Producir alteración o mudanza en algo. 7. tr. Dicho de una enfermedad o de una plaga: Producir o poder producir daño en algún órgano o a algún grupo de seres vivientes. 8. tr. Der. Imponer gravamen, obligación sobre algo, sujetando al dueño a la efectividad de ajeno derecho 9. tr. Der. Destinar una suma o un bien a un gasto o finalidad determinados. 10. tr. Der. Destinar bienes o derechos a un uso o servicio público. 11. tr. p. us. Apetecer y procurar algo con ansia o ahínco. Real Academia Española © Todos los derechos reservados
Alerta (ver también Sistema de...)	Alerta: Del it. all'erta. adj. Atento, vigilante. 2. f. Situación de vigilancia o atención. 3. adv. Con vigilancia y atención. Andar, vivir, estar alerta. 4. interj. U. para excitar a la vigilancia. <i>Real Academia Española</i> © Todos los derechos reservados. Estado casi permanente de vigilia. Permite identificar situaciones y circunstancias que pudieran evolucionar hacia algún peligro, es decir, una situación que sea capaz de generar daños. Proceso inherente de percepción y evaluación consciente de las situaciones que suceden en el entorno. Permite evaluar y sustentar decisiones acerca de acontecimientos previsibles y significativos para la seguridad de una persona, la comunidad o el país.
Alarma	Alarma. Del it. allarme, y este del ant. all'arme 'a las armas'. f. Aviso o señal que se da en un ejército o plaza para que se prepare inmediatamente a la defensa o al combate. 2. f. Aviso o señal de cualquier tipo que advierte de la proximidad de un peligro. 3. f. Mecanismo que, por diversos procedimientos, tiene por función avisar de algo. 4. f. estado de alarma, rebato; convocatoria a los vecinos para defenderse de un peligro. <i>Real Academia Española</i> © Todos los derechos reservados La alarma es un mecanismo que permite manifestar la existencia de una situación potencialmente destructiva. Se activa para permitir, a los organismos y a la población, responder y atender las emergencias, poner en marcha los procedimientos preestablecidos para reducir y si es posible eliminar, los daños a las personas. El tipo y nivel de la alarma depende de: ● Naturaleza de la situación amenazante: origen, celeridad de materialización ● Intensidad previsible ● Extensión territorial de su influencia ● Potencialidad de generación de daños.
Amenazas	Suceso o circunstancia física, proceso natural o antropogénico que, en el caso de haber alcanzado o superado una intensidad específica, puede implicar la probabilidad de pérdida o daño a las vidas humanas, bienes sociales, económicos y ambientales. Entre las amenazas se incluyen las

	condiciones latentes que pueden representar peligros futuros de origen diverso (natural, antropogénico): procesos geodinámicos, hidrometeorológicos, biológicos, degradación del ambiente, peligros tecnológicos, construcción inadecuada de la infraestructura, ciberataques, terrorismo, pandemia, etc. Las amenazas pueden materializarse de manera individual, compuesta, en secuencia o combinada en sus orígenes y efectos. Cada amenaza se caracteriza por su lugar, intensidad, frecuencia, probabilidad, celeridad de materialización y recurrencia.
Amenazas de la geodinámica interna y externa	Geodinámica interna: Sismicidad y volcanismo. Geodinámica externa: Inestabilidad de laderas (caída de bloques rocosos, deslizamientos, etc.), erosión intensa de suelos, aludes torrenciales, sedimentación súbita en los piedemontes; licuefacción sísmica de suelos. Los factores hidrometeorológicos y la sismicidad contribuyen, de manera importante, con la geodinámica externa. Los tsunamis son provocados por terremotos, volcanismo y macrodeslizamientos en, o cerca, de los océanos y lagos (i.e. "seiche") y se materializa, por lo tanto, en forma de amenaza costera. Las marejadas se derivan de las tormentas y/o ciclones tropicales. También se pueden agregar los tornados y trombas.
Capacidad para enfrentar los desastres	Distintos medios, por los cuales las personas utilizan sus capacidades y recursos, cognoscitivos y materiales disponibles, para organizarse y enfrentar las consecuencias negativas de un desastre. Eso implica la gestión de recursos, tanto en tiempo normal como durante crisis o en condiciones desfavorables. El refuerzo de las capacidades desarrolla en general la resistencia ante los efectos de amenazas tanto naturales como causadas por el hombre. Esto concierne al género debido a que las mujeres y los hombres podrían tener capacidades similares o diferentes de enfrentarlos según su capacidad de acceder a los recursos disponibles y de utilizar estos recursos.
Capacidad para la gestión del riesgo	Combinación de todas las fuerzas y recursos disponibles, al interior de una comunidad, sociedad u organización, para reducir el nivel del riesgo y las posibilidades de que este se llegue a materializar como un desastre. Eso incluye también el desarrollo de recursos institucionales, financieros, políticos y otros, como la tecnología en los ámbitos y sectores de la sociedad.
Catástrofe	Similar a "desastre", pero indicativa de una condición de pérdidas máximas probables (ex-ante) o extremas (ex-post)
Cambio climático (Ver, también, "Calentamiento Global Antropogénico")	Atribuible a la evolución histórica y prehistórica natural del clima, sumada a la influencia directa o indirecta de la actividad humana (Calentamiento global antropogénico), se enmarca en millones, o incluso tiempos más largos) y desarrolla tendencias evolutivas mensurables, desde el punto de vista estadístico, y que reflejan sus indicadores vectoriales, espacio-temporales y de intensidad. Los cambios se pueden derivar de los procesos naturales y antropogénicos; ambos ejercen influencia persistente sobre el equilibrio termodinámico de la atmósfera y su relación con los océanos y continentes. Hay que tener en cuenta que la definición del cambio climático utilizada dentro del Convenio de Naciones Unidas sobre Cambio Climático está limitada a los cambios directa o indirectamente atribuibles a las actividades humanas. Aunque esto sea el producto de una convención, no significa que no genere confusiones acerca de su significado científico y racional. En la realidad, el cambio climático natural (CCN) se asocia a las variaciones de largo plazo

	de la radiación solar (i.e. ciclos de Milankovich), de su equilibrio termodinámico de la atmósfera, según el contenido de gases, vapores y partículas a efecto invernadero (GVP-El) y de los procesos tectónicos que, de una u otra manera, causan cambios en las direcciones de la circulación oceánica y atmosférica.
Calentamiento global antropogénico	Es el producto del aumento reciente (i.e. desde la Revolución Industrial, ca. s. XVIII) en el tenor de los elementos y compuestos (gases, vapores y partículas, a efecto de invernadero), el cual ha comenzado a reflejarse con un aumento de alrededor de 0,85-0,93° C de la temperatura promedio en la superficie de la tierra (un poco más en el hemisferio norte y un poco menos en el hemisferio sur y en los océanos). Todavía no hay conocimientos suficientes para comprender, con precisión, la amplitud de los efectos locales ("downscaling") respectivos, más allá de algunas tendencias y síntomas que comienzan a evidenciarse (e.g. reducción de las coberturas de hielo y nieve en glaciares y picos montañosos, variaciones sutiles en las temperaturas de los regímenes hidrometeorológicos de algunas regiones del mundo; y ascenso milimétrico del nivel del mar). Frecuentemente, se comete el error de confundir e indiferenciar sus causas y consecuencias con las de la variabilidad climática y del cambio climático.
Capacidad de adaptación al calentamiento global antropogénico	Propiedades intrínsecas o adquiridas que permiten modificar el desempeño socioeconómico y ambiental de un individuo, una comunidad o un país, de manera que le permita enfrentar las situaciones y escenarios generados por los cambios en las características de las amenazas derivadas del clima, sus cambios y sus extremos.
Clima	Del latín tardío "clima" (i.e. latitud, región) y este, del griego κλίμα (klíma). m. Conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan una región (<i>Real Academia Española</i> © Todos los derechos reservados). El clima es la estadística del tiempo atmosférico, normalmente sobre un intervalo de 10 a 50 años. Se mide al evaluar los patrones de variación en temperatura, humedad, evapotranspiración, presión atmosférica, viento, precipitación, partículas en suspensión y otras variables meteorológicas, en una región dada, a lo largo de un plazo específico. El clima difiere del tiempo en que este último describe las condiciones de corto plazo de esas variables. El clima de una ubicación está influenciado por su latitud, terreno y altitud, así como los cuerpos de agua cercanos y sus corrientes. Los esquemas de clasificación más utilizados para la clasificación climática son los de Köppen y Thornthwaite. Los factores locales que influyen sobre estos elementos son: la latitud geográfica, altitud del lugar, orientación del relieve con respecto a la incidencia de los rayos solares (vertientes o laderas de solana y umbría), los vientos predominantes (sotavento, barlovento), las corrientes oceánicas y la continentalidad (i.e. mayor o menor lejanía con respecto del océano). La temperatura se refiere al grado de calor específico del aire en un lugar y momento determinados; es función de la mayor o menor insolación o radiación solar, la cual, a su vez, depende de los factores: i) planetarios (movimiento de rotación terrestre que origina el día y la noche) y la traslación de la Tierra alrededor del Sol, que da origen a las estaciones (mayor o menor exposición de la radiación solar, debido a la inclinación del eje terrestre con respecto a la eclíptica u órbita terrestre y su cercanía o lejanía con el sol), y ii) geográficos, los cuales dependen de las condiciones específicas del lugar con respecto a las características térmicas del aire (latitud,

	altitud, distancia al mar, orientación del relieve con respecto a la insolación y las corrientes marinas). La presión atmosférica es el resultado del peso de las masas de aire y varía inversamente con la altitud y con la temperatura. El viento consiste del movimiento de las masas de aire de acuerdo con las diferencias de presión atmosférica. La humedad es la cantidad de agua que impregna un cuerpo o su proporción (vapor) en la atmósfera. La precipitación es cualquiera de las formas de hidrometeoro procedente del agua atmosférica, originalmente en forma de nubes y que cae a la superficie terrestre por medio de las precipitaciones (lluvia, nieve, granizo, etc.).
Confiabilidad	Para calificar las probabilidades, según la confiabilidad de las evidencias que las respalda y los niveles de impacto y calidad, la evaluación de la evidencia y del nivel de acuerdo subyacentes, se aplican los términos siguientes: Para expresar la evidencia: limitada, media o sólida (robusta). Para expresar el nivel de acuerdo: bajo, medio o elevado. El nivel de confianza se expresa mediante los calificativos: muy bajo, bajo, medio, elevado y muy alto, y en cursiva. Para indicar el grado de probabilidad de un resultado o consecuencia: prácticamente seguro 99%-100%; muy probable 90%-98%; probable 66%-89%; tan probable como improbable 33%-65%; improbable 11%-32%, muy improbable 2%-10%, prácticamente improbable 0%-1%. Fuente: https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/
Continuidad operativa	Conjunto de procedimientos y acciones que facilitan el retorno a los procesos normales del desarrollo de las actividades de un país, comunidad o sistema productivo, con el objeto de recuperar y mantener los bienes y servicios accesibles en el menor plazo posible, luego de que sucedan situaciones de emergencia y desastres. Su eficiencia y eficacia dependen del conocimiento anticipado y completo desde las condiciones específicas del riesgo correspondientes (i.e. amenazas naturales y antropogénicas; vulnerabilidad).
Daños (ver efecto, impacto, consecuencias)	Situación negativa, sucedida en el corto plazo, sobre los bienes, acervo, capital, infraestructura, o cualquier otro tipo de estructura física -incluida la natural- y derivado de un acontecimiento caracterizado por la materialización de una amenaza natural o antropogénica.
Desastre	Los desastres constituyen, desde la perspectiva antropocéntrica, un impacto grave sobre el funcionamiento de una familia, comunidad, región o país, cuando la reposición de las pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales deben enfrentarse con recursos originalmente destinados al desarrollo. El desastre es la materialización del riesgo mal manejado y resulta de la combinación convergente de la materialización de una amenaza y la manifestación de la vulnerabilidad, cuando las capacidades o medidas preventivas son insuficientes para reducir las consecuencias negativas del riesgo y la comunidad no puede resolver la situación con sus recursos propios, por lo que debe recurrir a la asistencia externa. La palabra desastre se compone de dos raíces des-astre (sin astro). Los prefijos dis-des denotan la negación, ausencia o inversión del significado (e.g. disconforme -no estar conforme-, desleal -no ser leal-) y los sustantivos, griego ástron (astro) o latín astrum. Según la cultura griega los astros tenían una poderosa influencia en la vida de los seres humanos; su posición, en el

	momento del nacimiento de una persona y sus movimientos posteriores, reflejaba su carácter y, por lo tanto, su destino, al azar o la suerte. Para los griegos un desastre sucedía cuando la posición de las estrellas no era favorable, por ejemplo, en época de cosecha o en un nacimiento. Se trataba de la ausencia de la influencia divina y celestial positiva, contra lo cual no era posible luchar. El término desastre llegó al castellano desde el provenzal, en el cual significaba “desgracia” y que, a su vez, procedía del italiano ‘disastro’, con el mismo significado. El provenzal tiene también otro término: malastre, para referirse a un hecho desafortunado, causado por la mala influencia de los astros. La palabra aparece registrada, por primera vez en castellano, en 1444 en el Laberinto de la fortuna, de Juan de Mena (1411-1456).
Desarrollo de capacidades para la gestión del riesgo	Esfuerzos que se destinan al desarrollo de competencias humanas o de infraestructuras sociales al interior de una comunidad u organización, necesaria para reducir el nivel de riesgo.
Determinismo (sistema determinístico, determinista)	Por lo general y de manera práctica se define, en el quehacer de la gestión del riesgo, como el sistema que considera el caso con el peor escenario plausible. De manera rigurosa se puede definir como aquel en que el azar no está involucrado en el desarrollo de los estados futuros del sistema. Entonces, un modelo determinista producirá, siempre, la misma salida a partir de las mismas condiciones iniciales. A diferencia de los sistemas estocásticos o aleatorios, en los que los estados futuros no están determinados por los previos (e.g. lanzar una moneda al aire), en los deterministas, cada estado futuro está determinado por el previo, por lo que se ve afectado por las variables del entorno, es decir, ante los cambios en el ambiente. El determinismo sostiene que todo acontecimiento físico, incluyendo las acciones humanas, está causalmente determinado por una cadena causa-consecuencia y, por lo tanto, el estado actual “determina”, en algún sentido, el futuro. No obstante, los sistemas deterministas son difíciles de predecir, aparte de que considera que no existen sucesos genuinamente aleatorios. La “determinación” implica la ausencia del azar en la cadena causa-consecuencia que origina los sucesos concretos. La “predictibilidad” es un hecho potencial derivado de la determinación certera de los sucesos y exige que se conozcan las condiciones iniciales de la cadena de causalidad.
Dimensiones del desastre relativas a género	Efectos y papeles diferentes para los hombres y las mujeres en un desastre. Un análisis más complejo que tiene en cuenta el género tendrá en cuenta también los diferentes impactos de los desastres sobre grupos distintos, especialmente los ancianos, los bebés y los niños, y las personas con capacidades diferentes o especiales.
Efecto	Inmediato, sobre los <i>daños</i> al acervo, al capital, infraestructura y <i>stock</i>.
Emergencia	Escenario o suceso, previsible o no, que exige atención inmediata, pues implica un desastre consumado o potencial. Implica que deben tomarse acciones y decisiones inmediatas, ya que está en juego la vida de las personas y/o de sus haberes, infraestructura de bienes y servicios, el ambiente y los recursos naturales.

Estado	Comúnmente confundido con “gobierno”. En realidad, se compone de tres elementos fundamentales: i) Gobierno, ii) Población y iii) Territorio.
Evaluación del riesgo (ver definición de “riesgo”)	Análisis de la probabilidad de los daños y pérdidas que pueden producirse, sobre los elementos expuestos, según sus características de vulnerabilidad, situación, condiciones y contexto espacio-temporal, cuando se someten al efecto e impacto de la materialización de una amenaza natural o antropogénica. El riesgo es la probabilidad del daño y pérdidas, causados por una amenaza materializada sobre los elementos vulnerables y expuestos. Se describe mediante la curva de excedencia de pérdida $v(l)$, definida por el número de eventos, por unidad de tiempo, que producirá un valor específico, igual o mayor, de pérdidas probables l; $v(l)$ es el producto de una convolución de dos probabilidades condicionadas: la amenaza y la vulnerabilidad, ambas representadas por una variable aleatoria establecida por la relación entre la intensidad de la amenaza y la probabilidad de que se produzcan daños y pérdidas. La probabilidad anual de los daños y pérdidas, conocida como la tasa de excedencia, se puede calcular mediante el Teorema de la Probabilidad Total, tal y como se indica en la ecuación siguiente y según el análisis y evaluaciones realizadas por Cardona (1986), Cardona et al. (2012) Marulanda et al. (2013) y Salgado et al. (2014): $v(l) = \sum_{i=1}^{n \text{ events}} Pr(L > l \text{Event } i) \cdot F_A(\text{Event } i)$... donde $v(l)$ es la tasa de excedencia de la pérdida l; $FA(\text{Evento } i)$ es la frecuencia anual de ocurrencia del evento i, mientras que $Pr(L > l \text{Evento } i)$ es la probabilidad de que la pérdida sea mayor que l (i.e. en el i-ésimo evento), $Tres$ el período de recurrencia de la pérdida l (es decir, el inverso de la tasa de excedencia anual); la tasa de excedencia $v(l)$ es, en realidad, la suma de las pérdidas de todos los elementos expuestos al conjunto de escenarios en los escenarios estocásticos de la amenaza considerada. Un caso de análisis de la amenaza de la inestabilidad de laderas debe especificarse en términos de su ubicación, geometría, volumen, celeridad de materialización, frecuencia de ocurrencia y su prevalencia espacial y temporal, caracterizada por la relación $Pr(P > p \text{Evento } i)$.
Exposición; grado de...	Presencia, por su ubicación, de personas, infraestructura, medios de subsistencia, acervos culturales y patrimoniales, activos, flujos económicos, de especies, ecosistemas, funciones y servicios ambientales y naturales, y recursos, en espacios en donde se pueden materializar, con capacidad destructiva, las amenazas naturales y antropogénicas. La exposición puede evaluarse y clasificarse de acuerdo con su grado relativo, definido por su distancia a las amenazas y su capacidad destructiva.
Fenómeno	Del lat. tardío phaenoménon 'síntoma', y este del gr. φαίνόμενον phainómenon. 1. m. Manifestación que se hace presente a la consciencia de un sujeto y aparece como objeto de su percepción extrasensorial. 2. m. Cosa extraordinaria y sorprendente. 3. m. coloq. Persona o animal monstruoso. 4. m. coloq. Persona sobresaliente en su línea. 5. m. Fil. En la filosofía de Immanuel Kant, lo que es objeto de la experiencia insensible.

	6. adj. coloq. Muy bueno, magnífico, sensacional. Es un tío fenómeno. U. t. c. adv. Lo pasamos fenómeno. <i>Real Academia Española</i> © Todos los derechos reservados. Comentario: A los episodios de Oscilación del Sur (Fríó: La Niña; Caliente: El Niño), se les sigue llamando "fenómenos", incluso de manera oficial. Sin embargo, por el verdadero significado de la palabra "fenómeno", se indicaría que se trata de acontecimientos o sucesos que carecen de explicación racional (e.g. magia, aparición de espíritus, pseudociencia, etc.). La Oscilación de Sur y otros procesos naturales, aunque todavía no se conocen todas sus variables, ya poseen explicaciones racionales y científicas y hasta modelos predictivos, por lo que ya no deberían llamárseles "fenómenos".
Fragilidad	Grado o susceptibilidad de la potencialidad con la que puede ser dañado un elemento, a causa del impacto directo o indirecto de la materialización de una amenaza. La susceptibilidad puede expresarse en función de la probabilidad de que se produzcan "daños" (Efecto, negativo, en el corto plazo, sobre los bienes, acervo, capital, infraestructura, o cualquier otro tipo de estructura física -incluida la natural- y derivado de un acontecimiento caracterizado por la materialización de una amenaza natural o antropogénica) y "pérdidas" (Impacto; forma cómo se manifiesta, en el mediano y largo plazo, la materialización de la amenaza sobre los flujos económicos sobre los medios de subsistencia, rentas, salarios, beneficios, ingresos, lucro cesante, etc., producidos a raíz de los daños causados por una amenaza natural o antropogénica).
Gestión del riesgo	Proceso político y sistemático de ejecución de las decisiones administrativas, organización, competencias operativas, capacidades y aplicación integral de las políticas públicas y estrategias para reducir el impacto de las amenazas naturales y de la vulnerabilidad. Esto incluye todas las actividades derivadas de los resultados de la investigación científica, la observación y vigilancia de los procesos naturales y de las medidas estructurales y no estructurales, para evitar (prevenir) o limitar (mitigar) los daños potenciales. Se considera que la Gestión del Riesgo se fundamenta en los cuatro pilares estratégicos siguientes:
Gestión del riesgo, Pilares de la...	Identificación y comunicación del riesgo: Procesos que conducen hacia el conocimiento, percepción, medición y evaluación objetiva de sus variables (amenazas, vulnerabilidad), al establecimiento de su distribución espacial, temporal, de su intensidad, factores agravantes e incertidumbre de las estimaciones. Esta información debe concebirse y "traducirse" de manera tal que pueda ser transferida eficientemente para que sea utilizada y aplicada por los tomadores de decisiones, la población, el sector productivo privado y la academia. Reducción del riesgo: Conjunto de acciones y medidas de prevención, mitigación y adaptación, cuyo objetivo es la disminución de los factores que causan o intensifican los daños potenciales o adaptarse cuando no es posible aplicar, de manera efectiva a las variaciones temporales de las amenazas. En general, las medidas y acciones pueden ser estructurales (obras civiles; por lo general de carácter transitorio, temporal) y/o no-estructurales (reglamentaciones, códigos, ordenamiento territorial) se definen y diseñan según una relación adecuada de costo/beneficio y se concentran, sobre todo, en la reducción de la vulnerabilidad, pues a partir de ciertas intensidades no es posible reducir las amenazas naturales. La adaptación se entiende como el proceso de mejorar la resiliencia, es decir, responder ante las emergencias y desastres de manera a que los daños y pérdidas sean menores, recuperarse y con capacidad para reestablecer la continuidad del funcionamiento del tejido socioeconómico lo más rápidamente posible.

	Financiamiento del riesgo: Consiste en el enfoque de las acciones para reducir el impacto de las amenazas naturales sobre la sociedad y el ambiente, según las características de su vulnerabilidad económica y financiera. Se identifican y diseñan, de manera "ex-ante", mediante la determinación de los umbrales del riesgo aceptado y del riesgo aceptable, de acuerdo con las mejores opciones de protección social y financiera. Se fundamenta en las medidas de retención (e.g. manejo del presupuesto fiscal, fondos de emergencia y contingencia) y de transferencia hacia otros actores y a lo largo de plazos más largos (e.g. seguros, reaseguros, créditos, endeudamiento contingente, colocación de instrumentos financieros en el mercado de valores). Gestión de emergencias y desastres: Conjunto de acciones articuladas para enfrentar las crisis, apoyándose en planes, protocolos y preparativos formulados "ex-ante". Por ejemplo, se pueden citar las emisiones de alertas, alarmas, advertencias y operaciones de respuesta ante las emergencias, los planes anticipados para la rehabilitación (inmediata), la recuperación de las actividades sociales y económicas, y la reconstrucción (mediata, mediano y largo plazo) de la calidad de vida, sin replicar ni reproducir los factores previos de la vulnerabilidad. También consiste de la distribución anticipada de la autoridad y responsabilidades relativas a la organización y gestión de los recursos para el tratamiento de los aspectos asociados al manejo de las emergencias y desastres. Implica la concepción y puesta en práctica de las, estructuras y acuerdos preestablecidos para la gestión óptima de las entidades del gobierno, el trabajo voluntario, contribuciones del sector privado y, de manera integral y coordinada, para responder a las necesidades en caso de crisis.
Impacto	En el mediano y largo plazo, sobre las pérdidas al flujo de capitales, lucro cesante, etc.
Incertidumbre	■ Primaria: Según el número y tipo de eventos posibles. No se puede predecir cuándo, dónde y con qué intensidad sucederá el próximo evento, cualquiera que sea la naturaleza de su gestación. ■ Secundaria: La cuantía de las pérdidas depende del evento posible. Aunque las pérdidas sigan una tendencia, en los análisis, la amenaza, vulnerabilidad, fidelidad de los datos y modelos de cálculo son imprecisos. ■ Aleatoria (irreducible o estocástica): Proviene de la variación inherente asociada al evento (e.g. no se puede reducir la incertidumbre del 50% a obtener "cara" al momento de lanzar la moneda al aire). ■ Epistémica (del modelo): Derivada del conocimiento insuficiente de las leyes naturales que rigen al evento potencial: Por ejemplo, al simular una lluvia intensa, la selección de una ecuación IDF puede ser inadecuada por falta de mediciones y datos que la corroboren. La deriva del modelo incide en la precisión del resultado e induce a estimaciones "desviadas". ■ Correlacionada (sistemas correlacionados, bayesianos): Si el resultado de un proceso (e.g. caracterización de la lluvia precipitable) tiene una desviación mayor que la media, el resultado (e.g. capacidad de campo del suelo, escorrentía) será, al menos, similar. Adicionalmente, su resultado combinado se agrega al cálculo incierto de la respuesta de las cuencas y la probabilidad de pérdidas económicas y urbanas. Entonces, los valores medios de cada fuente de incertidumbre se adicionan. ■ No correlacionada (sistemas independientes): Los valores medios se adicionan, pero la suma de las incertidumbres sigue la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados, lo cual induce hacia un coeficiente de correlación decreciente.

Calificación de la incertidumbre	Cada conclusión se basa en una evaluación de la evidencia y el nivel de acuerdo subyacentes. Una síntesis de la evidencia y el nivel de acuerdo apoya la asignación del nivel de confianza. Los términos resumidos que se emplean para expresar la evidencia son: limitada, media o sólida (robusta). Para expresar el nivel de acuerdo se emplean los términos bajo, medio o elevado. El nivel de confianza se expresa mediante cinco calificativos: <i>muy bajo</i>, <i>bajo</i>, <i>medio</i>, <i>elevado</i> y <i>muy alto</i>, y en cursiva. Se utilizan estos términos para indicar el grado de probabilidad de un resultado o consecuencia: prácticamente seguro 99%-100%; muy probable 90%-98%; probable 66%-89%; tan probable como improbable 33%-65%; improbable 11%-32%, muy improbable 2%-10%, prácticamente improbable 0%-1%. Si procede, se pueden utilizar otros términos (sumamente probable 95%-100%, más probable que improbable >50%-100%, más improbable que probable 0%-<50%, sumamente improbable 0%-5%). Fuente: https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/
Indicador	Instrumento analítico que aporta la base para el seguimiento y evaluación de un proyecto; valor identificable, permite medir su evolución hacia una meta proyectada y su desempeño. Es una expresión cuantitativa de la relación entre dos o más variables y que verifica el nivel de logro alcanzado en el cumplimiento de los objetivos. Establece la medida con que los objetivos van siendo alcanzados: Producto-resultado, Propósito-efecto, Fin-impacto, y permite anticipar si puede suceder una situación problemática que requiere de medidas de seguimiento y tratamiento para su corrección, cuando algo no genera los resultados esperados o, por el contrario, si genera resultados inesperados. Identifica la evidencia que demostrará las realizaciones, el éxito y/o deficiencias en cada nivel de la ejecución. Debe verificarse de manera "objetiva", para que pueda alcanzarse un consenso sobre lo que la evidencia implica. Deben ser: objetivos, verificables, prácticos, independientes y parametrizados por medio de variables de calidad, cantidad, tiempo, costo, población objetivo, espacio geográfico o sector.
Intensidad	Grado de fuerza, amplitud, cantidad o percepción con que se manifiesta un agente o evento natural o físico. Variación espacio-temporal, vehemencia, persistencia o grado de los efectos físicos.
Magnitud	Tamaño físico de un evento o proceso natural, capaz de ser medido o calculado en su origen, y cuya escala puede variar lineal o exponencialmente.
Mitigación	Las acciones (i.e. reducción del riesgo) para su realización toman en cuenta las medidas estructurales (e.g. obras civiles de protección, retención y refuerzo) y no estructurales (e.g. ordenamiento territorial, códigos de construcción, políticas públicas, marco jurídico, C-Neutralidad), aplicados "ex-ante" para limitar o reducir el impacto desfavorable de las amenazas naturales, tecnológicas y ambientales.
Necesidades	

	Intervenciones humanitarias de recuperación y del desarrollo necesarias para llenar la brecha entre las deficiencias o pérdidas definidos y la situación a la cual aspiran los afectados/involucrados en una situación post conflicto o post desastre. La suma de las necesidades localmente definidas o percibidas puede sintetizarse en un marco de recuperación para un sector o un país.
Necesidades (evaluación de las ...)	Iniciada en primer lugar por agencias humanitarias, esta evaluación implica la definición de las necesidades básicas y de lo que falta para satisfacerlas (sobre la base de estándares, teniendo en cuenta las vulnerabilidades, riesgos y capacidades), y la estimación de la asistencia externa necesaria (externa a la comunidad, a la provincia o al departamento, o al país) para atenuar estos déficits. Las evaluaciones de las necesidades para la recuperación (de emergencia o integral) y con fines de desarrollo implican una visión más amplia de las necesidades que cubren puntos relativos a la institucionalidad, a las políticas y a la infraestructura.
Pérdidas (ver impacto)	Materialización del impacto ; forma cómo se manifiesta, en el mediano y largo plazo. Materialización de la amenaza sobre los flujos económicos de los medios de subsistencia, rentas, salarios, beneficios, ingresos, lucro cesante, etc., producidos a raíz de los daños causados por una amenaza.
Predicción	Según la RAE, esta palabra se origina del vocablo latino <i>praedictio-ōnis</i> , es decir, de la acción y efecto de anticipar y manifestar aquello que es probable que suceda en el futuro, basándose en análisis y consideraciones de juicio (Wikipedia; consulta el 24 de octubre de 2013 ¹). Su definición posee, además, algunas semejanzas con la de pronóstico, pero no son sinónimos. Predecir es "...anunciar por revelación, ciencia o conjetura algo que ha de suceder, mediante una declaración precisa de lo que ocurrirá, bajo condiciones determinadas...". Los procesos naturales que se producen súbitamente, cuando no se cuenta con datos previos suficientes, o cuando no es posible interpretarlos certeramente por causa de la deficiencia o insuficiencia en el conocimiento de las leyes naturales que los gobiernan, no pueden ser predichos. Para el caso de la predicción los sismos y terremotos, por convención, para que una "predicción" sea considerada seria y responsable desde el punto de vista científico, algunos autores indican los requisitos que deberán cumplirse, con un grado de exactitud lo más próximo posible al de la realidad: i) Tiempo (i.e. fecha, hora); ii) Localización (coordenadas, profundidad); iii) Magnitud; iv) Grado de confianza y medición estadística-probabilística de la incertidumbre y de los errores estándar; v) La probabilidad de que el evento suceda, más bien, como el producto de un proceso aleatorio y no tenga que ver con la predicción; y vi) Publicaciones, "ex-ante" y "ex-post" de la predicción, en las que tanto el éxito como el fracaso de los cálculos, tengan el mismo grado de visibilidad.
Probabilidades (teoría de las...)	Medida de la verosimilitud, es decir, de la certidumbre asociada a un suceso futuro; se expresa como un número entre 0 y 100% (i.e. improbable: 0 % y muy probable: 100 %). Es un cociente que resulta al dividir el número total de casos sucedidos por la suma de todos los casos posibles e igualmente probables. Para determinar la probabilidad de un suceso se repite este procedimiento (estocásticamente) muchas veces, bajo las mismas condiciones y se calcula la relación entre el número de veces que sucede y el número de veces que se ha realizado el experimento.

¹ http://en.wikipedia.org/wiki/Earthquake_prediction

	La probabilidad condicionada es aquella que implica que para que se produzca un suceso "a", previamente tiene que haber sucedido otro "b". Se denota por $P(a/b)$. También se puede decir que la probabilidad es la medida del grado de incertidumbre, es decir, del grado de ignorancia acerca de una situación. Este concepto es importante, porque la precisión del cálculo probabilístico depende, ciertamente, de la cantidad, precisión, calidad de los datos e información disponibles y de la destreza, experiencia y capacidad de quienes los realizan y, sobre todo, de quienes los interpretan.
Prognosis	La RAE le asigna un origen griego: πρόγνωσις. Consiste en el conocimiento general y anticipado de las condiciones que rigen la gestación y consecuencias de un suceso. En el ámbito de las ciencias y de la ingeniería consiste en descifrar el resultado esperado de un evento, su duración, intensidad y la probabilidad de sus consecuencias, basándose para ello en la formulación de modelos y escenarios rigurosamente científicos (Wikipedia; consulta el 24 de octubre de 2013)².
Pronóstico	De acuerdo con el Diccionario de la Real Academia Española (RAE, 2001)³ este vocablo proviene del latín <i>prognosticum</i> y del griego <i>προγνωστικόν</i> y se entiende como la señal, por medio de la cual, se conjetura o calcula un evento futuro. Representa el juicio que formula un especialista con respecto a los eventos –sus causas, su curso y los cambios– que pueden sobrevenir, su duración y conclusión, todos interpretados de acuerdo con los síntomas que los preceden o acompañan. En otras palabras, se trata de conocer, por anticipado, lo que sucederá en el futuro, descifrando por aproximación a través de indicios interpretables (Word Reference, consulta el 24 de octubre de 2013)⁴.
Prospectiva	Consiste de una metodología o técnica, para el estudio o anticipación de escenarios futuros posibles (i.e. "futurología") y cuyo objetivo es estimar su probabilidad. Se aplica con el objeto de orientar la toma de decisiones de manera racional, económica o política. Puede ser rigurosamente científica o no (Wikipedia; consulta el 24 de octubre de 2013)⁵.
Pseudociencia	Profecía, adivinación, clarividencia, mentalismo, magia. Creencias y ficción que hacen referencia a predicciones hipotéticas del futuro, sin fundamento racional o bajo premisas equivocadas.⁶
Rehabilitación	Generación de procesos para la recuperación postcrisis (que se trate de un desastre o de un conflicto). La rehabilitación implica medidas que se destinan la vuelta de la comunidad afectada, cuanto antes sea posible a una calidad de vida al menos cercana a la de antes del desastre, relativas a la gobernanza, la subsistencia, a los refugios, el ambiente y social, incluidas la reintegración de las poblaciones desplazadas y la seguridad humana.

² <http://es.wikipedia.org/wiki/Prognosis>

³ <http://www.rae.es/drae/>

⁴ <http://www.wordreference.com/definicion/pron%C3%B3stico>

⁵ <http://es.wikipedia.org/wiki/Predicci%C3%B3n>; <http://es.wikipedia.org/wiki/Prospectiva>

⁶ <http://es.wikipedia.org/wiki/Seudociencia>

Resiliencia	Capacidad, de los seres humanos y de los sistemas naturales, para adaptarse y resistir el efecto e impacto de las amenazas, preservar y restaurar sus estructuras y funciones básicas, hasta recuperarse hasta recobrar, lo más pronto posible, al menos la condición anterior.
Riesgo (ver, también, "Evaluación del riesgo")	Definición literal: DRAE. Riesgo: (Del it. <i>risico</i> o <i>rischio</i> , y este del ár. clás. <i>rizq</i> , lo que depara la providencia). 1. m. Contingencia o proximidad de un daño. 2. m. Cada una de las contingencias que pueden ser objeto de un contrato de seguro. 3. m. Someterse al influjo de suerte o de un evento. 4. loc. verb. Estar expuesto a pérdidas. Riesgo: Sustantivo masculino. (italiano <i>Risco</i> , del latín popular <i>resecum</i> , lo que corta). Definición práctica: Probabilidad de que se produzcan daños y pérdidas sobre los elementos expuestos, según sus características de vulnerabilidad, situación, condiciones y contexto espacio-temporal. Las causas y consecuencias no son siempre predecibles y dependen de la probabilidad combinada de la aparición de una amenaza, en un espacio y tiempo específicos, con suficiente intensidad, para producir daños y pérdidas debidos, tanto a la intensidad del acontecimiento, como a la fragilidad de los elementos expuestos: economía, vida humana, ambiente, etc. El acontecimiento puede (amenazas antropogénicas) o no (amenazas naturales) depender de la voluntad de las partes.
Riesgo aceptable	Nivel de pérdidas que una sociedad o comunidad considera que puede aceptar, habida cuenta de las condiciones sociales, económicas, políticas, culturales, técnicas y ambientales existentes. En términos de ingeniería, la noción del riesgo aceptable se aplica para evaluar, de manera probabilística, el rango de la relación de beneficio y costo óptima de las medidas estructurales y no-estructurales aplicables, para que los daños potenciales tengan un nivel en donde el peligro para las personas y los bienes pueda manejarse racionalmente. Para ello, con frecuencia, se recomienda la aplicación de los códigos y las "buenas prácticas" conocidas.
Riesgo aceptado	Decisión que se toma al considerar una combinación de factores económicos, ambientales, políticos, sociales y culturales y de escenarios difíciles de mitigar. Los involucrados deciden incorporar esta fracción del riesgo como parte de su modo de vida. Se aplica solamente un determinado nivel de inversión para la protección y se deja entonces al azar la posibilidad y la esperanza de que el evento destructivo se materialice o no, al menos durante un período relativamente largo. En ese caso, ya se sabe de antemano que, en su momento, habrá que enfrentar las consecuencias respectivas. Lo ideal es que este tipo de riesgo se intervenga, al menos, mediante los instrumentos de transferencia financiera, con el fin de incrementar las posibilidades y capacidades de recuperación. No existe un "estándar" para medir el riesgo aceptado, ya que varía en función del contexto en el que se encuentre y de la noción respectiva que establezca cada comunidad.
Riesgo controlable	Se trata del riesgo, es decir, de las pérdidas esperadas, que pueden enfrentarse y manejarse dentro de los rangos racionales y de las relaciones de beneficio/costo adecuadas, desde los puntos de vista técnico, económico, social, político y ambiental.
Riesgo incontrolable	Se trata del riesgo, es decir, de las pérdidas esperadas, que sobrepasan las capacidades para enfrentarlas y manejarlas dentro de los rangos racionales y de las relaciones de beneficio/costo

	adecuadas, al menos desde los puntos de vista técnico, económico, social, político y ambiental. Los recursos disponibles son, entonces, insuficientes para tal efecto.
Riesgo retenible	Fracción financiera del riesgo que puede manejarse con los recursos propios y disponibles. Los involucrados pueden utilizar y tener la capacidad de aplicar sus recursos financieros sin necesidad de endeudamientos, donaciones o la aplicación de instrumentos de transferencia financiera. Este es el caso del manejo del presupuesto propio (fiscal o corporativo) en el que, a lo sumo, se pueden desarrollar fondos, transferencias y mecanismos con suficiente elasticidad, agilidad y flexibilidad contable.
Riesgo transferible	Es el caso en el que, según la previsión de la magnitud de las pérdidas financieras esperadas, se considera que estas sobrepasarían la capacidad de aplicar solamente los recursos propios (i.e. retención). En tal caso, se puede desarrollar la opción de diseñar, construir y ejecutar instrumentos, mecanismos y procesos que trasladen, en el tiempo (i.e. transfieran a terceros), el riesgo financiero hacia otros actores. Como ejemplos, se pueden citar las pólizas de seguros, los bonos "cat", certificados de valores, créditos e instrumentos contingentes negociados "ex-ante", etc.
Sequías, tipos de...	<i>Meteorológica:</i> Cuando se produce una escasez continuada de las precipitaciones. Se define como el déficit, sostenido por al menos seis meses continuos, de las precipitaciones, comparado con sus promedios históricos en la región. <i>Hidrológica:</i> A partir de la sequía meteorológica se produce una reducción continua de los caudales fluviales y/o volúmenes embalsados por debajo de lo normal y niveles freáticos. <i>Agrícola o hidro-edáfica:</i> Consiste en la materialización del déficit de humedad, establecido en la zona radicular vegetal y, por lo tanto, la condición de insuficiencia para satisfacer las necesidades de la vegetación y cultivos. Dado que la necesidad del agua es diferente para cada cultivo o vegetación, e incluso puede variar a lo largo del crecimiento de una misma planta. No es posible establecer umbrales únicos de sequía agrícola. <i>Socioeconómica o estructural:</i> Entendida como la consecuencia de la escasez de agua para las personas y la actividad económica, como consecuencia del déficit hídrico sostenido. Puede deberse, además, a la desadaptación de las prácticas agropecuarias (variedades, especies y razas) utilizadas, con respecto a la capacidad de uso de la tierra, las condiciones climáticas de la región y de la localidad. Se trata, sobre todo, de una manifestación del conflicto del uso actual, de la capacidad de uso de la tierra, el ordenamiento territorial y de los recursos hídricos disponibles.
Sistema de observación, vigilancia, alerta, advertencia, alarma, respuesta y continuidad operativa (ver "Alerta").	Proceso sistémico e integrado de transferencia de información, cuya función es la de ofrecer datos e información acerca de la evolución de las amenazas (naturales y antropogénicas), para advertir a las comunidades expuestas acerca de los diferentes estados del peligro prevalente. Este flujo de información y datos permite la activación de los protocolos preestablecidos para orientar la respuesta y evacuación ante la inminencia del impacto y para establecer las pautas para el restablecimiento, lo más pronto posible, de las condiciones de normalidad, al menos en las mismas condiciones anteriores al estado de emergencia y de ser posible, sin reproducir par condiciones previas de la vulnerabilidad.

	Se ha extendido el término “alerta temprana”, el cual es una pésima traducción, tanto literal como conceptual” del término en inglés “<i>early warning system</i>”. El significado de este término, en realidad, no debe traducirse palabra por palabra, pues si bien una acepción de “early” puede querer decir “temprano”, en realidad el sentido práctico es el de “anticipado” o “precoz”; además “warning” no significa “alerta”, sino “advertencia” (i.e. “advertencia anticipada”). Por otra parte, los criterios modernos implican que las personas bajo este tipo de dispositivos no merecen solamente que se les advierta, sino que puedan aprovechar un proceso de transmisión de información capaz de asistir el proceso de toma de decisiones de la población, las autoridades locales y nacionales, el sector privado y los organismos de primera respuesta. Debe incorporar, al menos las nociones de: 1) Visión sistémica y transversal: A cada cual su autoridad, responsabilidad, comando y control 2) Observación: normalidad 3) Vigilancia: tendencia hacia la intensificación 4) Alerta: Seguimiento de las tendencias 5) Advertencia: Cuando la tendencia incluye la Probabilidad de que el proceso adquiera capacidad destructiva y se convierta en amenaza sobre los elementos expuestos y vulnerables 6) Alarma: Ante el peligro inminente 7) Respuesta: Cuando se ha materializado la amenaza... y se han producido daños 8) Recuperación: Mediante los procedimientos y protocolos de la continuidad operativa y funcional; regreso, lo más pronto posible, al funcionamiento “normal” del tejido socioeconómico y cultural, sin reproducir los aspectos de la vulnerabilidad antecedente.
Sostenible	Proceso que puede mantenerse por sí mismo (e.g. desarrollo económico) sin ayuda exterior ni merma de los recursos existentes.
Subsistencia	Las capacidades, activos (incluidos recursos tanto materiales como sociales) y actividades necesarias como medios de subsistencia. Un medio de subsistencia es durable cuando puede enfrentar y recuperarse de las presiones y los choques, y conservar sus capacidades y activos en el presente y en el futuro, sin minar al mismo tiempo la base de los recursos naturales o los medios financieros por los cuales una persona/familia vive. Eso incluye los medios de entretenimiento, así como los recursos disponibles a partir de la riqueza o los ahorros cuyo beneficio se puede utilizar en caso de necesidad. Esto consiste en los medios de una familia o de un grupo para entretenerse, su fuente de ingresos, de los recursos para la supervivencia - mínima (o marginal) para subsistir- para las facilidades socialmente aceptables necesarias para vivir “decentemente”. En situaciones postconflicto o post desastre, la restauración del empleo y la recuperación de la subsistencia son prioridades del Gobierno en el marco de la recuperación de la emergencia; forman parte entonces de la respuesta de emergencia en ayuda a las personas afectadas a depender menos de la ayuda externa.
Subsistencia (evaluación de los medios de....)	Metodologías para evaluar el impacto de una crisis (post conflicto o post desastre) en los medios de subsistencia, las oportunidades de rectificación y las capacidades a los niveles de la familia, la comunidad y la economía local, con una perspectiva de género. Eso incluye la conversión de los resultados de evaluaciones en opciones de respuesta estratégica (intervenciones a los niveles de proyectos, programas y políticas). Eso hace especialmente referencia a los esfuerzos desplegados

	por la FAO y la OIT con el equipo de herramientas de evaluación integral de los medios de subsistencia.
Urgencia	Semejante a “emergencia”, pero implica un caso que requiere asistencia en el corto plazo, pero no necesariamente porque esté en riesgo la vida de las personas y de sus bienes, o de que la situación pudiese empeorar.
Variabilidad climática	Conjunto de procesos atmosféricos y su relación con los océanos y continentes, cuyo comportamiento se materializa, de manera cíclica y en el corto plazo (i.e. períodos inter-estacionales e interanuales, hasta algunas decenas de años). Se relaciona con los procesos sinópticos, fisiográficos, oceanográficos e hidrometeorológicos. Es posible describirla física y matemáticamente mediante los aspectos y parámetros que regulan sus diferencias espacio-temporales. Depende de los cambios y variaciones en el comportamiento periódico de la actividad tropical, inducidas por las variaciones de las temperaturas, humedad, lluvias, presión barométrica, vientos, su interacción con océanos y continentes, y su incidencia sobre la gestación y materialización de los episodios de El Niño/La Niña-Oscilación Sur, la posición de la Zona de Convergencia Intertropical, los avances de los frentes y vórtices polares, etc.
Vulnerabilidad	Probabilidad de que, según la intensidad de la amenaza que se materialice, puedan producirse daños y pérdidas a los bienes, servicios y personas, según sus grados de exposición y fragilidad (i.e. inverso de la resiliencia) y que ello se manifieste sobre el deterioro de la calidad de la vida humana (muertes, heridos, afectados, desplazados, trauma psicosocial; pérdida de acceso a los servicios básicos y medios de subsistencia), se produzcan pérdidas del valor social y económico expuesto e impactos sobre el ambiente y los recursos naturales. Se involucran, además, las dificultades de la sociedad para recuperarse, luego del impacto de una amenaza, por lo menos hasta el mismo nivel y calidad de la vida previos al suceso.