



UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

Proyecto Estadística II

Autores:

Dixon Montero Hernández - B99109

Jose Andrey Prado Rojas - C36174

Joseph Romero Chinchilla - C37006

Holmar Adrian Rivera Castellon - B86564

Facultad de Ciencias Básicas, Universidad De Costa Rica
CA0307: Estadística Actuarial II

Profesor:

Dr. Maikol Solís Chacón

27 de noviembre de 2025

Resumen

El análisis de fenómenos naturales extremos requiere metodologías que permitan capturar tanto la variabilidad individual de las variables involucradas como la compleja estructura de dependencia que las vincula. En este estudio se desarrolla un enfoque probabilístico multivariado orientado a la evaluación del riesgo asociado a desastres naturales en Costa Rica, considerando eventos como inundaciones, deslizamientos y sismos. El proceso inicia con un análisis exploratorio exhaustivo que permite caracterizar la estructura de los datos, identificar patrones relevantes y garantizar su calidad antes del modelado estadístico.

Posteriormente, se implementa el método de simulación Monte Carlo para generar un conjunto amplio de escenarios estocásticos que representan la variabilidad potencial de los fenómenos estudiados. Esto posibilita la estimación de distribuciones empíricas y métricas de riesgo como el Valor en Riesgo (VaR) a distintos niveles de confianza. Para capturar adecuadamente la dependencia entre variables, se ajustan diferentes modelos de cópulas, lo que permite representar relaciones no lineales y comportamientos de cola que los métodos tradicionales no logran reflejar.

Adicionalmente, se emplean transformaciones empíricas y técnicas vinculadas a la teoría de valores extremos, lo que facilita el análisis diferenciado por provincia y categoría, así como la construcción de métricas de riesgo específicas para cada región. Finalmente, se elaboran visualizaciones y estructuras comparativas que permiten identificar patrones espaciales y sectoriales de riesgo.

En conjunto, la metodología desarrollada proporciona una evaluación integral y precisa de los fenómenos extremos, ofreciendo una base sólida para la toma de decisiones en gestión del riesgo y planificación ante eventos catastróficos.

Introducción

El estudio de fenómenos extremos asociados a catástrofes naturales, tales como inundaciones, deslizamientos o sismos, ha experimentado un notable desarrollo gracias a la incorporación de enfoques probabilísticos multivariados capaces de representar con mayor precisión la compleja interacción entre variables físicas clave. Dichos enfoques permiten abordar la incertidumbre inherente a los eventos extremos mediante técnicas que separan el análisis marginal del estudio de la dependencia, ofreciendo así una estructura metodológica más flexible y coherente. En este marco, las cópulas se han consolidado como una herramienta fundamental, pues permiten construir distribuciones conjuntas a partir de distribuciones marginales arbitrarias, capturando dependencias no lineales y comportamientos en cola que los métodos tradicionales basados exclusivamente en correlación no logran reflejar adecuadamente (Delfiner y Gutiérrez Girault, 2025; Pérez Fructuoso y García Pérez, 2004).

Paralelamente, la teoría de valores extremos (Extreme Value Theory, EVT) constituye un pilar esencial para el modelado de eventos raros y de alto impacto, proporcionando herramientas rigurosas para caracterizar el comportamiento de las colas de distribución y estimar la probabilidad de ocurrencia de fenómenos extraordinarios (Siddiqui, 2022). La combinación de EVT con modelos de dependencia basados en cópulas amplía significativamente la capacidad analítica, al permitir la evaluación conjunta de múltiples variables extremas, como la intensidad y duración de precipitaciones, o la simultaneidad de aceleraciones sísmicas en diversas direcciones estructurales.

Diversos estudios han demostrado la utilidad de esta integración metodológica en áreas como la hidrología y la ingeniería sísmica. Por ejemplo, en el análisis de riesgos de inundación, el empleo de vine copulas ha permitido modelar de manera precisa la dependencia entre la duración, el volumen y el pico de una crecida, obteniéndose probabilidades conjuntas más realistas y mejor fundamentadas que las que se derivarían de un análisis univariado (Delfiner y Gutiérrez Girault, 2025). De igual forma, en ingeniería estructural, la evaluación probabilística de la demanda sísmica basada en cópulas ha demostrado reducir la sobreestimación del riesgo que

típicamente surge cuando se ignora la dependencia entre aceleraciones espectrales en distintos modos de vibración (Siddiqui, 2022).

El ámbito asegurador también ha incorporado estas metodologías para mejorar la cuantificación de pérdidas asociadas a catástrofes naturales. La integración de cópulas con técnicas de simulación, particularmente con el método de Monte Carlo, ha permitido caracterizar escenarios de pérdidas extremas y estimar métricas de riesgo como el Valor en Riesgo (VaR), proporcionando una base más sólida para el establecimiento de primas y para la gestión estratégica del riesgo financiero (Pérez Fructuoso y García Pérez, 2004).

En consonancia con estas aplicaciones, el presente trabajo desarrolla un marco probabilístico integral orientado al estudio de desastres naturales en Costa Rica. Para ello, se emplea un enfoque estructurado que inicia con un análisis exploratorio detallado de los datos, continúa con la generación de escenarios mediante simulación Monte Carlo, incorpora posteriormente el modelado de dependencias a través de cópulas, y se complementa con la aplicación de técnicas de EVT y estimación del VaR a diferentes niveles de confianza. Asimismo, se realiza un análisis diferenciado por provincia y categoría utilizando transformaciones empíricas que permiten estudiar con mayor precisión la variación espacial y sectorial del riesgo.

En conjunto, este enfoque metodológico robusto permite capturar la complejidad inherente a los fenómenos naturales extremos, mejorar la representación de sus dependencias estadísticas y proporcionar estimaciones más realistas de los riesgos multivariados. Al integrar técnicas avanzadas de simulación, estadística multivariada y análisis de valores extremos, el presente estudio contribuye a fortalecer la capacidad de evaluación, prevención y toma de decisiones ante escenarios catastróficos en el contexto costarricense (Delfiner y Gutiérrez Girault, 2025; Siddiqui, 2022; Pérez Fructuoso y García Pérez, 2004).

Marco Teórico

Los *desastres naturales* son fenómenos que, al interactuar con condiciones de vulnerabilidad social y económica, producen efectos adversos en la población, la infraestructura y el entorno (Paniagua, 1995). Estos eventos no deben entenderse únicamente como expresiones de la naturaleza, sino también como hechos sociales, en tanto ponen de manifiesto desigualdades, falta de planificación y limitaciones en la capacidad de respuesta de las comunidades (Pérez-Mallaína, 2005). En el caso de América Central y particularmente Costa Rica, estudios recientes han documentado la recurrencia de eventos sísmicos, inundaciones y erupciones volcánicas, señalando que estos han generado tanto desplazamientos poblacionales como impactos fiscales de consideración (Centeno Morales, 2017; Orozco-Montoya, Brenes-Maykall, y Sura-Fonseca, 2022).

La gestión del riesgo financiero asociado a desastres naturales se ha abordado en el plano internacional con el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres, cuyo propósito central es minimizar las pérdidas económicas y materiales derivadas de fenómenos naturales (United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2015). Este marco global constituye una referencia fundamental, pues no se limita a proponer estrategias de respuesta, sino que impulsa la incorporación del riesgo en la planificación del desarrollo, tanto económico como social. En consecuencia, se reconoce que la reducción de pérdidas es también asunto de sostenibilidad fiscal y estabilidad macroeconómica. En el contexto de Costa Rica, la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias ha planteado el Plan Nacional de Gestión del Riesgo 2021–2025, el cual establece mecanismos que buscan cuantificar y enfrentar las consecuencias económicas de los desastres (Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias, 2022). De esta manera, se observa una transición de un modelo centrado en atender emergencias después de ocurridas, hacia un enfoque preventivo.

Las catástrofes naturales tienen efectos inmediatos y de largo plazo en la economía. Los costos directos incluyen daños a infraestructura, viviendas y sistemas de transporte, mientras que los indirectos abarcan la pérdida de productividad, la

interrupción de cadenas de suministro y el aumento en gastos sociales y de salud (Paniagua, 1995). En contextos de alta vulnerabilidad, estos gastos pueden comprometer seriamente la sostenibilidad financiera de los Estados. En América Latina y el Caribe, organismos internacionales como el Banco Mundial han advertido sobre la brecha existente entre los costos económicos de los desastres y la capacidad de respuesta fiscal, lo cual genera presión sobre los presupuestos públicos y limita el margen de acción para la inversión en desarrollo (Banco Mundial, 2021, p. 23). Consecuentemente, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe documentó que entre 1990 y 2012 las pérdidas económicas anuales de la región superaron en promedio el 1 % del PIB, cifra que ilustra no solo la magnitud del impacto financiero, sino también la vulnerabilidad estructural de los países ante eventos extremos (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2014, p. 45).

Estos fenómenos no solo afectan a las comunidades vulnerables, sino que también generan perturbaciones en sectores estratégicos como la agricultura, la energía y el turismo. Además, las proyecciones climáticas resaltan la necesidad de herramientas predictivas más robustas y de esquemas de financiamiento adaptativo que permitan a las instituciones responder de forma oportuna. En este sentido, el análisis del riesgo asociado a los desastres naturales se ha beneficiado de herramientas estadísticas avanzadas. Entre ellas destacan las *cópulas*, que permiten modelar dependencias entre variables extremas, lo cual resulta especialmente útil cuando se analizan fenómenos multivariados como lluvias intensas, caudales fluviales o movimientos sísmicos, donde la correlación tradicional no resulta suficiente para capturar la complejidad de la relación (Patton, 2012; Krupskii y Joe, 2013). En el ámbito regional, Rivera-Vargas y Heredia-Zavoni (2022) aplicaron cópulas en un análisis probabilístico de peligro sísmico, mostrando su utilidad para evaluar riesgos conjuntos y calcular pérdidas esperadas en escenarios de alta dependencia. Asimismo, Chand y cols. (2024) demostraron que el uso de cópulas en la evaluación de riesgo de inundaciones permite una estimación más precisa de los gastos potenciales en infraestructura y mitigación.

Desde una perspectiva actuarial y estadística, los métodos empleados en este trabajo se sustentan en los fundamentos expuestos por Klugman, Panjer, y Will-

mot (2019) en su obra *Loss Models: From Data to Decisions*. Los autores destacan que la modelización de pérdidas requiere comprender tanto la frecuencia como la severidad de los eventos, enfatizando que “*el comportamiento de la cola de la distribución juega un papel crítico en la cuantificación de los eventos extremos*” (Klugman y cols., 2019, p. 412). Esta afirmación respalda el uso de la teoría del valor extremo (EVT) como herramienta para estimar con precisión la probabilidad de pérdidas catastróficas. Según los mismos autores, “*la aproximación por valores extremos proporciona una base teórica sólida para extrapolar más allá de los datos observados, permitiendo inferencias sobre eventos raros pero de gran impacto*” (Klugman y cols., 2019, p. 415).

La *teoría del valor extremo* (EVT, por sus siglas en inglés) constituye así una herramienta fundamental para la modelación de desastres, ya que se centra en los eventos poco frecuentes pero de gran magnitud, precisamente los que generan los mayores impactos económicos (Siddiqui, 2022). Estudios pioneros aplicaron EVT al ajuste y modelación de catástrofes con el fin de estimar pérdidas máximas y diseñar mecanismos de financiamiento adecuados (Pérez Fructuoso y García Pérez, 2004). Investigaciones más recientes amplían esta perspectiva al contexto financiero y asegurador, subrayando su valor para la gestión del riesgo catastrófico (Delfiner y Gutiérrez Girault, 2025). En términos de modelación, Klugman et al. afirman que “*las distribuciones con colas pesadas, como Pareto o lognormal, son esenciales para reflejar adecuadamente la naturaleza de los riesgos extremos, donde pocas observaciones pueden dominar la media o la varianza*” (Klugman y cols., 2019, p. 260). Esta característica coincide con la lógica de la EVT, que busca estimar el comportamiento de las colas de distribución más allá del rango de observación empírica.

Asimismo, los métodos de cópulas empleados en este estudio también encuentran fundamento en la literatura actuarial moderna. Según Klugman y cols. (2019), “*las cópulas permiten construir modelos multivariados que capturan la dependencia entre riesgos sin requerir que las variables involucradas compartan la misma distribución marginal*” (Klugman y cols., 2019, p. 489). Esta propiedad resulta indispensable en el análisis de riesgos asociados a fenómenos naturales, donde las variables pueden presentar distribuciones heterogéneas y correlaciones no lineales. Por ello, la com-

binación de EVT y cópulas ofrece un marco robusto para estimar la probabilidad conjunta de pérdidas extremas, fortaleciendo la gestión del riesgo financiero y el cálculo de métricas como el *Value at Risk (VaR)* y el *Expected Shortfall (ES)*.

Los gastos tras un desastre natural suelen dividirse en atención inmediata, que incluye rescate, albergues temporales y distribución de víveres; reconstrucción, enfocada en la reparación de infraestructura, vivienda, sistemas de transporte y servicios públicos; y recuperación económica, mediante subsidios, reactivación de actividades productivas y apoyo a sectores estratégicos. La resiliencia económica de un país frente a desastres está determinada por la existencia de fondos de contingencia, seguros catastróficos y mecanismos de financiamiento internacional. La ausencia de estos mecanismos genera altos niveles de endeudamiento y limita la inversión futura en desarrollo (Centeno Morales, 2017; Orozco-Montoya y cols., 2022).

En este contexto, la articulación entre el sector público, el sector privado y la academia desempeña un papel crucial en la creación de mecanismos financieros innovadores, como los seguros paramétricos y los bonos catastróficos. Estos instrumentos no solo distribuyen el riesgo, sino que también fortalecen la resiliencia financiera frente a eventos de gran magnitud (Quesada-Román y Barrantes-Castillo, 2020). Sin embargo, aún persisten desafíos importantes en la coordinación de actores y en la generación de confianza, lo que limita la efectividad de estas herramientas. Además, el involucramiento activo del sector privado sigue siendo una tarea pendiente, especialmente en países en vías de desarrollo donde las estructuras de mercado no siempre favorecen la adopción de soluciones financieras de carácter preventivo.

En síntesis, el estudio de los desastres naturales y los gastos que estos implican requiere una aproximación interdisciplinaria que combine historia, ciencias sociales, economía, estadística avanzada y gestión pública. Este trabajo plantea la necesidad de integrar perspectivas tradicionales sobre vulnerabilidad y desigualdad con marcos de gobernanza internacional y modelos probabilísticos modernos, con el fin de diseñar estrategias de mitigación y financiamiento que reduzcan los impactos económicos y sociales de los desastres en la región y contribuyan a garantizar la estabilidad económica y social a largo plazo.

Metodología

La metodología empleada en el presente estudio se basó en una combinación de técnicas estadísticas avanzadas orientadas al análisis de datos, la simulación estocástica y el modelado de dependencias. El proceso inició con un análisis exploratorio exhaustivo de la base de datos con el propósito de comprender la estructura de la información, identificar patrones relevantes y evaluar la presencia de valores atípicos, inconsistencias o posibles problemas de calidad. Durante esta etapa se examinaron distribuciones marginales, se generaron representaciones gráficas como histogramas, diagramas de cajas y mapas de correlación, y se efectuaron las transformaciones y limpiezas necesarias para garantizar la integridad de los datos utilizados en las fases posteriores.

Posteriormente, se implementó el método de simulación Monte Carlo con el fin de modelar la variabilidad inherente a las variables de interés y generar escenarios alternativos que permitieran aproximar el comportamiento estocástico del sistema bajo estudio. Para ello, se ajustaron distribuciones a los datos observados y se efectuó un número elevado de simulaciones, lo que permitió obtener distribuciones empíricas de resultados, cuantificar la incertidumbre y estimar medidas de riesgo como el Valor en Riesgo (VaR) bajo diversos niveles de confianza.

Con el objetivo de capturar la estructura de dependencia entre las variables, se procedió al ajuste de diferentes modelos de cópulas, los cuales resultan especialmente adecuados para representar relaciones no lineales y comportamientos de cola que no pueden ser descritos mediante la correlación tradicional. Este procedimiento incluyó la selección de familias de cópulas apropiadas, la estimación de sus parámetros mediante métodos de máxima verosimilitud y el análisis de medidas de dependencia como el coeficiente τ de Kendall. A partir de estas cópulas ajustadas se generaron simulaciones conjuntas que preservan la estructura dependiente observada en los datos originales.

Finalmente, se aplicaron técnicas de Transformación de Variables Empíricas (TVE) para analizar de manera más precisa las dependencias entre categorías y provincias específicas, complementando así el modelado previo. Esta etapa permitió

transformar las variables a una escala uniforme, calcular matrices de dependencia diferenciadas y estimar el Valor en Riesgo tanto al 95 % como al 99 % para cada combinación de provincia y categoría. Con base en estos resultados se elaboraron representaciones visuales como mapas de calor, que facilitaron la identificación de patrones espaciales y sectoriales en los niveles de riesgo. En conjunto, todas estas etapas proporcionaron un enfoque metodológico robusto y coherente, permitiendo analizar de forma integral el comportamiento de las variables bajo estudio y obtener conclusiones fundamentadas en técnicas cuantitativas de alta precisión.

Resultados

Anexos

Link del Repositorio de GitHub : <https://github.com/CA0307-II-2025/grupo-2>

Referencias

- Banco Mundial. (2021). *Evaluación de riesgos y resiliencia en américa latina y el caribe*. Washington, DC. Descargado de <https://documents.worldbank.org>
- Centeno Morales, J. (2017, May). *¿nos encontramos preparados (as)? desastres naturales y desplazamiento ambiental en costa rica*. Presentación institucional, Instituto de Estudios Sociales en Población (IDESPO), Universidad Nacional de Costa Rica. Descargado de <https://repositorio.una.ac.cr/items/e1ae7cf7-1c47-4c7a-84ea-130bc58dc941> (Subido en el repositorio académico de la Universidad Nacional (UNA))
- Chand, R., Nguyen-Huy, T., Deo, R. C., Ghimire, S., Ali, M., y Ghahramani, A. (2024). Copula-probabilistic flood risk analysis with an hourly flood monitoring index. *Water*, 16(11), 1560. Descargado de <https://doi.org/10.3390/w16111560> (Published: 29 May 2024) doi: 10.3390/w16111560
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2014). *Impacto de los desastres naturales en américa latina y el caribe, 1990–2012*. Santiago de Chile. Descargado de <https://www.cepal.org>
- Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias. (2022). *Plan nacional de gestión del riesgo 2021–2025*. San José, Costa Rica. Descargado de <https://www.cne.go.cr>
- Cordero, R. R., y Quesada-Román, A. (2019). Natural hazards and climate change in costa rica: A review. *Natural Hazards*, 99(1), 1–25. doi: 10.1007/s11069-019-03728-0
- Delfiner, M. T., y Gutiérrez Girault, M. A. (2025). *Aplicación de la teoría de valores extremos al gerenciamiento del riesgo* (Working Paper / Documento). UCEMA. Descargado de <https://ucema.edu.ar/publicaciones/download/documentos/217.pdf> (Descargado de: UCEMA, 23 de agosto de 2025)
- DesInventar. (2023). *Sistema de inventario de desastres*. Descargado de <https://www.desinventar.net> (Base de datos en línea)

- Gelman, A., Carlin, J. B., Stern, H. S., Dunson, D. B., Vehtari, A., y Rubin, D. B. (2020). *Bayesian data analysis* (3rd ed.). Boca Raton, FL: Chapman and Hall/CRC.
- Joe, H. (2014). *Dependence modeling with copulas*. Boca Raton, FL: Chapman and Hall/CRC.
- Klugman, S. A., Panjer, H. H., y Willmot, G. E. (2019). *Loss models: From data to decisions* (5th ed.). Hoboken, New Jersey: Wiley.
- Krupskii, P., y Joe, H. (2013). Factor copula models for multivariate data. *Journal of Multivariate Analysis*, 120, 85–101.
- Nelsen, R. B. (2006). *An introduction to copulas* (2nd ed.). New York, NY: Springer.
- Orozco-Montoya, R. A., Brenes-Maykall, A., y Sura-Fonseca, R. (2022). Inventario histórico de desastres en costa rica en el periodo 1970-2020. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 6(1), 66–82.
- Paniagua, S. (1995). Los desastres naturales y sus implicaciones en américa central. *Revista Geológica de América Central*(18).
- Patton, A. J. (2012). A review of copula models for economic time series. *Journal of Multivariate Analysis*, 110, 4–18.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2014). *Gestión del riesgo de desastres: Enfoque para el desarrollo sostenible*. Nueva York. Descargado de <https://www.undp.org>
- Pérez Fructuoso, M. J., y García Pérez, A. (2004). *Aplicación de la teoría del valor extremo al ajuste y modelación de catástrofes*. Descargado de <https://documentacion.fundacionmapfre.org/documentacion/en/media/group/1026232> (Accedido el 21 de agosto de 2025)
- Pérez-Mallaína, P. E. (2005). Las catástrofes naturales como instrumento de observación social: el caso del terremoto de lima en 1746. *Anuario de Estudios Americanos*, 62(2), 47–76.
- Quesada-Román, A., y Barrantes-Castillo, G. (2020). Disaster risk reduction in costa rica: A review of progress and challenges. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50, 101707. doi: 10.1016/j.ijdr.2020.101707

Rivera-Vargas, D., y Heredia-Zavoni, E. (2022). Análisis probabilístico multivariado de peligro sísmico usando cópulas. *Ingeniería sísmica*(107), 22–46. Descargado de <https://doi.org/10.18867/ris.107.588> (Epub 29 de agosto de 2022) doi: 10.18867/ris.107.588

Siddiqui, O. (2022). *Extreme value theory*. Descargado de <https://www.learnsignal.com/blog/extreme-value-theory/> (Accedido el 21 de agosto de 2025)

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2015). *Marco de sendai para la reducción del riesgo de desastres 2015–2030*. Ginebra, Suiza. Descargado de <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>