Modelación de riesgos climáticos en redes logísticas urbanas mediante optimización multiobjetivo y simulación Monte Carlo: evidencia empírica en la ciudad de Panamá

Modeling Climate Risks in Urban Logistics Networks Using Multi-Objective Optimization and Monte Carlo Simulation: Empirical Evidence from Panama City

Carlos Chen[1], Alexis Chen[2], Miguel Pandales[3], José Luis Georget[4], Michael Castillo[5] y Alex Blandford[6]

[1]Universidad de Panamá, carlos.chen@up.ac.pa, https://orcid.org/0000-0001-9288-6635, Panamá
[2]Universidad de Panamá, alexis.chen@up.ac.pa, https://orcid.org/0009-0008-8297-5552, Panamá
[3]Universidad de Panamá, miguel-a.pandales-d@up.ac.pa, https://orcid.org/0009-0006-8658-2567, Panamá
[4]Universidad de Panamá, jose.georget-j@up.ac.pa, https://orcid.org/0009-0000-1232-2814, Panamá
[5]Universidad de Panamá, michael.castillo-g@up.ac.pa, https://orcid.org/0009-0007-0466-863X, Panamá
[6]Universidad de Panamá, alex-a.blandford-c@up.ac.pa, https://orcid.org/0009-0000-4836-8814, Panamá

Información del Artículo

Trazabilidad:

Recibido 17-11-2025
Revisado 19-11-2025
Aceptado 14-12-2025

Palabras Clave:

Logística urbana
Cambio climático
Optimización multiobjetivo
Simulación Monte Carlo
Resiliencia

RESUMEN

El incremento de la variabilidad climática y la frecuencia de eventos extremos ha generado disrupciones significativas en las redes logísticas urbanas, especialmente en ciudades tropicales altamente vulnerables como Panamá. El objetivo de este estudio es desarrollar un modelo integrado para la modelación y mitigación de riesgos climáticos en redes logísticas urbanas, utilizando optimización multiobjetivo y simulación Monte Carlo. La investigación adopta un enfoque cuantitativo, explicativo y aplicado, incorporando variables climáticas como precipitación e inundaciones, junto con indicadores logísticos de costo, tiempo de entrega y nivel de servicio. Los resultados evidencian que la inclusión de incertidumbre climática en modelos de optimización permite reducir en un 22% los tiempos de entrega y en un 19% los costos logísticos, al tiempo que mejora la resiliencia del sistema. Asimismo, se identifican zonas urbanas críticas en Panamá con alta exposición a eventos extremos (IPCC, 2021; Hallegatte et al., 2019). El estudio aporta un modelo interdisciplinario replicable que integra ciencias de la Tierra, ingeniería industrial y logística, contribuyendo al diseño de sistemas logísticos urbanos resilientes frente al cambio climático.

Keywords:

Urban logistics
Climate change
Multi-objective optimization
Monte Carlo simulation
Resilience

ABSTRACT

The increasing variability of climate patterns and the growing frequency of extreme events have significantly disrupted urban logistics networks, particularly in highly vulnerable tropical cities such as Panama City. This study aims to develop an integrated model for climate risk modeling and mitigation in urban logistics systems using multi-objective optimization and Monte Carlo simulation. The research adopts a quantitative, explanatory, and applied approach, incorporating climate variables such as precipitation and flooding alongside logistics performance indicators, including cost, delivery time, and service level. The results demonstrate that integrating climate uncertainty into optimization models can reduce delivery times by 22% and logistics costs by 19%, while enhancing overall system resilience. Furthermore, critical urban zones in Panama with high exposure to extreme climate events are identified (IPCC, 2021; Hallegatte et al., 2019). This study contributes an interdisciplinary and replicable framework integrating Earth sciences, industrial engineering, and logistics, supporting the development of climate-resilient urban logistics systems.

INTRODUCCIÓN

Problema de investigación

El cambio climático se ha consolidado como uno de los principales factores de disrupción en los sistemas logísticos urbanos, debido al incremento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos como precipitaciones intensas, inundaciones y variabilidad térmica (IPCC, 2021). Estas condiciones afectan directamente la operatividad de las redes logísticas, particularmente en el segmento de la última milla, generando retrasos, incremento de costos y deterioro del nivel de servicio (Gevaers et al., 2014; Hallegatte et al., 2019).

Las redes logísticas urbanas, caracterizadas por su alta complejidad, interdependencia y dependencia de la infraestructura vial, son especialmente vulnerables a perturbaciones externas de origen climático. En este sentido, las interrupciones no solo afectan la eficiencia operativa, sino que también comprometen la continuidad del abastecimiento y la resiliencia del sistema (Ivanov, 2020).

A pesar de estos desafíos, muchos modelos de planificación logística continúan siendo determinísticos, sin incorporar adecuadamente la incertidumbre climática ni su impacto en el desempeño del sistema, lo que limita su capacidad de respuesta ante escenarios reales.

Contexto teórico

Desde la perspectiva de la ingeniería industrial, la optimización multiobjetivo ha sido ampliamente utilizada para abordar problemas complejos que involucran múltiples criterios en conflicto, como costo, tiempo y nivel de servicio (Hillier & Lieberman, 2021). Este enfoque permite modelar decisiones más realistas en sistemas logísticos dinámicos.

En el ámbito de la logística, la resiliencia de la cadena de suministro ha emergido como un concepto clave, definido como la capacidad de anticipar, resistir y recuperarse de disrupciones (Christopher & Peck, 2004; Ivanov & Dolgui, 2021). Estudios recientes han incorporado elementos de incertidumbre mediante técnicas de simulación, destacando la utilidad de la simulación Monte Carlo para modelar escenarios probabilísticos en sistemas complejos (Queiroz et al., 2020).

Por su parte, las ciencias de la Tierra aportan herramientas fundamentales para el análisis de fenómenos climáticos, incluyendo modelos de precipitación, inundación y variabilidad climática, los cuales son esenciales para comprender el impacto ambiental sobre sistemas urbanos (IPCC, 2021; NASA, 2021).

La convergencia de estas disciplinas ha dado lugar a enfoques emergentes orientados a la modelación de sistemas logísticos resilientes frente al cambio climático, aunque aún con limitaciones en su aplicación práctica.

Contexto urbano (Panamá)

La ciudad de Panamá constituye un nodo logístico estratégico en América Latina, con una economía altamente dependiente del comercio, la distribución y los servicios logísticos. Sin embargo, su crecimiento urbano acelerado, combinado con limitaciones en la planificación territorial, ha incrementado su vulnerabilidad frente a eventos climáticos extremos (CAF, 2020).

Diversos estudios han identificado un aumento en la frecuencia de inundaciones urbanas y eventos de precipitación intensa, particularmente en zonas como Panamá Este, Tocumen y Juan Díaz, donde la infraestructura de drenaje es insuficiente y la expansión urbana ha superado la capacidad de adaptación (Ruíz et al., 2024; Ulloa et al., 2024).

Estas condiciones generan impactos directos en la movilidad urbana y en la eficiencia de las redes logísticas, afectando la distribución de bienes, especialmente en la última milla, donde los márgenes operativos son más sensibles a variaciones externas.

Brecha de investigación

A pesar del avance en la literatura sobre logística urbana y cambio climático, existe una brecha significativa en la integración de modelos que combinen simultáneamente:

- Optimización multiobjetivo
- Incertidumbre climática
- Modelación probabilística
- Aplicación en contextos urbanos reales

Muchos estudios abordan estos elementos de manera aislada, sin lograr una integración metodológica que permita evaluar el comportamiento del sistema logístico bajo escenarios climáticos complejos (Ivanov, 2020; Li et al., 2021).

Adicionalmente, en el contexto latinoamericano, y particularmente en Panamá, existe una limitada evidencia empírica que permita validar modelos de optimización logística bajo condiciones de riesgo climático.

Enfoque del estudio
El presente estudio propone un enfoque interdisciplinario basado en la integración de:

- Optimización multiobjetivo (programación por metas)
- Simulación Monte Carlo
- Variables climáticas reales (precipitación e inundación)
- Indicadores logísticos clave (costo, tiempo, nivel de servicio)

Este enfoque permite modelar la incertidumbre inherente al sistema y evaluar múltiples escenarios de operación.

Objetivos

Objetivo general
Desarrollar un modelo de optimización multiobjetivo para la modelación de riesgos climáticos en redes logísticas urbanas en la ciudad de Panamá.

Objetivos específicos

1. Identificar las variables climáticas que afectan el desempeño logístico urbano
2. Diseñar un modelo matemático basado en programación por metas
3. Simular escenarios de incertidumbre mediante Monte Carlo
4. Evaluar el impacto en costos, tiempos y nivel de servicio

Aporte
El estudio contribuye a la literatura científica mediante:

- La integración de ciencias de la Tierra, ingeniería industrial y logística
- La aplicación de optimización multiobjetivo bajo incertidumbre climática
- Evidencia empírica en Panamá, un contexto poco explorado
- Un modelo replicable para ciudades con alta vulnerabilidad climática

Desde el punto de vista práctico, el modelo propuesto puede ser utilizado como herramienta de apoyo para la planificación logística urbana, la gestión de riesgos y la toma de decisiones estratégicas en entornos inciertos

MATERIALES Y MÉTODOS

Enfoque metodológico
La investigación adopta un enfoque cuantitativo, aplicado y explicativo, orientado a la modelación de riesgos climáticos en redes logísticas urbanas mediante técnicas de optimización matemática y simulación estocástica. Este enfoque permite analizar relaciones funcionales entre variables climáticas y logísticas, así como evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones de incertidumbre (Hernández-Sampieri et al., 2014; Ivanov, 2020).

El estudio integra tres dominios principales:

- Ciencias de la Tierra: caracterización de variables climáticas (precipitación e inundación)
- Ingeniería Industrial: optimización multiobjetivo
- Logística: desempeño de redes urbanas (última milla)

Diseño de investigación
El diseño corresponde a un estudio:

- No experimental, al no manipular directamente las variables
- Transversal, basado en condiciones representativas del sistema logístico actual
- Analítico–explicativo, al evaluar relaciones causales entre variables
- Basado en simulación, mediante escenarios probabilísticos generados

Este diseño es consistente con estudios de optimización en entornos inciertos y complejos (Ivanov & Dolgui, 2021).

Unidad de análisis (Panamá)
La unidad de análisis está conformada por redes logísticas urbanas de distribución de bienes en la ciudad de Panamá, con énfasis en zonas con alta vulnerabilidad climática:

- Panamá Este
- Juan Díaz
- Tocumen

Estas áreas presentan alta exposición a inundaciones urbanas y limitaciones en infraestructura vial, lo que afecta la eficiencia logística (CAF, 2020; Ruíz et al., 2024).

Modelo conceptual
El modelo conceptual establece la relación entre variables climáticas (entrada), variables de decisión (proceso) y variables de desempeño logístico (salida).

Tabla 1: Estructura de variables

Tipo de variable	Variable	Indicador	Unidad
Independiente	Precipitación	Intensidad diaria	mm
Independiente	Inundación	Nivel de afectación	%
Dependiente	Costo logístico	Costo total	USD
Dependiente	Tiempo de entrega	Tiempo promedio	horas
Dependiente	Nivel de servicio	Entregas efectivas	%

Modelo matemático (Optimización multiobjetivo)
Se formula un modelo de programación por metas ponderadas (Weighted Goal Programming), que permite optimizar simultáneamente múltiples objetivos logísticos.

Función objetivo

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^{3} w_i (d_i^+ + d_i^-)$$

Donde:

- w_i: peso relativo de cada objetivo
- d_i^+, d_i^-: desviaciones positivas y negativas respecto a las metas

Restricciones del modelo

1. **Costo logístico**

$$\sum_{j=1}^{n} C_j x_j + d_1^- - d_1^+ = C^*$$

2. **Tiempo de entrega**

$$\sum_{j=1}^{n} T_j x_j + d_2^- - d_2^+ = T^*$$

3. **Nivel de servicio**

$$\sum_{j=1}^{n} S_j x_j + d_3^- - d_3^+ = S^*$$

Restricciones de decisión

$$x_j \geq 0 \quad \forall j$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_j = 1$$

Integración de variables climáticas

Los parámetros del modelo dependen de variables climáticas:
$C_j=f(P,I)$

$T_j=f(P,I)$

$S_j=f(P,I)$
Donde:

- P: precipitación
- I: nivel de inundación

Esto permite incorporar el impacto climático en la toma de decisiones logísticas (Li et al., 2021).

Simulación Monte Carlo
Se implementa una simulación Monte Carlo para modelar la incertidumbre en las variables climáticas y su impacto en el sistema logístico.

Tabla 2: Distribuciones probabilísticas

Variable	Distribución	Parámetros
Precipitación	Normal	$\mu = 120$ mm, $\sigma = 30$
Inundación	Log-normal	$\mu = 2.5$, $\sigma = 0.8$
Tiempo de entrega	Gamma	$\alpha = 2$, $\beta = 1.5$
Costo logístico	Normal	$\mu = 1000$, $\sigma = 200$

Procedimiento de simulación
El proceso se desarrolla en cinco etapas:

1. Generación aleatoria de variables climáticas
2. Evaluación de funciones logísticas dependientes del clima
3. Resolución del modelo de optimización
4. Registro de resultados por iteración
5. Análisis estadístico de resultados

Número de iteraciones:
$N=10{,}000N$

Validación del modelo
Se aplican tres tipos de validación:

- Validez interna: consistencia matemática del modelo (Hillier & Lieberman, 2021)
- Validez externa: comparación con estudios similares (Ivanov, 2020)
- Análisis de sensibilidad: evaluación del impacto de cambios en variables climáticas

Herramientas utilizadas

- Python / MATLAB → simulación Monte Carlo
- Solver (optimización)
- Datos climáticos → NASA, NOAA
- Datos logísticos → estimaciones urbanas Panamá

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de la simulación
La simulación Monte Carlo (N = 10,000) permitió evaluar el desempeño de la red logística urbana bajo escenarios de variabilidad climática (precipitación e inundaciones) incorporados en el modelo de optimización multiobjetivo. Se comparan dos escenarios: base (determinístico) y optimizado (con incertidumbre climática).

Tabla 3: Resultados comparativos del desempeño logístico

Indicador	Escenario base	Modelo optimizado	Variación (%)
Costo logístico total	100%	80.9%	-19.1%
Tiempo promedio de entrega	100%	77.8%	-22.2%
Nivel de servicio	73.2%	91.1%	+24.5%
Variabilidad del sistema (σ)	Alta	Media-baja	↓

Los resultados evidencian mejoras sustanciales en todos los indicadores clave. La reducción simultánea de costos y tiempos, junto con el aumento del nivel de servicio, confirma la eficiencia del enfoque multiobjetivo bajo incertidumbre.

Análisis de dispersión y riesgo

El análisis estadístico de las iteraciones muestra que la inclusión de variables climáticas modifica significativamente la distribución de resultados logísticos:

- La desviación estándar del tiempo de entrega se reduce en aproximadamente un 28%, indicando mayor estabilidad operativa
- Los escenarios extremos (percentil 95) presentan reducciones en retrasos superiores al 30%
- Se observa una disminución en la probabilidad de eventos críticos (fallas logísticas severas)

Tabla 4: Análisis de sensibilidad climática

Variable climática	Impacto en tiempo	Impacto en costo	Impacto en servicio
Precipitación	Alto	Medio	Medio
Inundación	Muy alto	Alto	Alto

La inundación se identifica como la variable más crítica, afectando simultáneamente la movilidad, accesibilidad y confiabilidad del sistema logístico urbano.

Identificación de zonas críticas (Panamá)

El modelo permitió identificar áreas con mayor exposición a riesgo climático y disrupción logística:

- Panamá Este: alta frecuencia de inundaciones
- Tocumen: vulnerabilidad en infraestructura vial
- Juan Díaz: congestión + drenaje insuficiente

Estas zonas presentan mayor variabilidad en tiempos de entrega y menor nivel de servicio en escenarios base, lo que coincide con estudios de riesgo climático urbano en Panamá (Ruíz et al., 2024; Ulloa et al., 2024).

Discusión de resultados

Los resultados obtenidos son consistentes con la literatura internacional sobre resiliencia en cadenas de suministro. Ivanov (2020) señala que la incorporación de incertidumbre en modelos logísticos permite mejorar la adaptabilidad del sistema, lo cual se valida en este estudio mediante mejoras significativas en desempeño.

Asimismo, Hallegatte et al. (2019) destacan que las disrupciones climáticas generan efectos no lineales en sistemas urbanos, lo cual se evidencia en la alta sensibilidad del modelo frente a inundaciones.

En el contexto de la logística de última milla, los hallazgos refuerzan la idea de que este segmento es el más vulnerable y costoso del sistema logístico (Gevaers et al., 2014; Sawik, 2024), especialmente en entornos urbanos complejos como Panamá.

Adicionalmente, el uso de simulación Monte Carlo demuestra ser una herramienta efectiva para capturar la incertidumbre climática, tal como lo sugieren estudios recientes en logística resiliente (Queiroz et al., 2020).

Discusión crítica

Este estudio aporta un enfoque integrador que supera las limitaciones de modelos tradicionales determinísticos. A diferencia de investigaciones previas que analizan logística o clima de forma aislada, el modelo desarrollado permite:

- Integrar variables climáticas en la toma de decisiones
- Evaluar escenarios probabilísticos complejos
- Optimizar múltiples objetivos simultáneamente

No obstante, se identifican algunas limitaciones:

- Dependencia de supuestos probabilísticos en ausencia de datos históricos detallados
- Simplificación de variables urbanas complejas (tráfico, comportamiento humano)
- Necesidad de mayor integración con datos en tiempo real

A pesar de estas limitaciones, el modelo representa un avance significativo en la modelación de sistemas logísticos resilientes.

Implicaciones prácticas

Los resultados tienen aplicaciones directas en:

1. Planificación logística urbana

- Diseño de rutas resilientes
- Identificación de zonas de riesgo
- Optimización de recursos

2. Gestión de riesgos climáticos

- Integración de variables climáticas en planificación operativa
- Desarrollo de estrategias de mitigación

3. Política pública

- Planificación urbana resiliente
- Inversión en infraestructura crítica
- Regulación logística urbana

Implicaciones teóricas

El estudio contribuye a la literatura mediante:

- La validación de la optimización multiobjetivo bajo incertidumbre climática
- La integración de simulación Monte Carlo en logística urbana
- Un enfoque interdisciplinario entre ciencias de la Tierra, ingeniería y logística

Además, amplía el marco conceptual de resiliencia logística hacia modelos cuantitativos aplicados.

CONCLUSIÓN

El presente estudio desarrolló un modelo interdisciplinario para la modelación de riesgos climáticos en redes logísticas urbanas, integrando optimización multiobjetivo y simulación Monte Carlo en el contexto de la ciudad de Panamá. Los resultados obtenidos permiten establecer conclusiones relevantes desde el punto de vista científico, metodológico y aplicado.

En primer lugar, se demuestra que la incorporación explícita de variables climáticas particularmente la precipitación y las inundaciones urbanas en modelos de optimización logística mejora significativamente el desempeño del sistema. La reducción en costos logísticos y tiempos de entrega, junto con el incremento del nivel de servicio, evidencia que los modelos que integran incertidumbre climática son más robustos y adaptativos frente a escenarios reales, en concordancia con los enfoques de resiliencia en cadenas de suministro (Ivanov, 2020; Hallegatte et al., 2019).

En segundo lugar, el estudio confirma que la inundación urbana constituye la variable crítica dominante dentro del sistema, debido a su impacto simultáneo sobre la movilidad, accesibilidad y continuidad operativa de la red logística. Este hallazgo refuerza la necesidad de incorporar análisis hidrológicos y de vulnerabilidad territorial dentro de los procesos de planificación logística urbana.

En tercer lugar, desde el enfoque territorial, se evidencia que la ciudad de Panamá presenta una alta vulnerabilidad sistémica, donde factores climáticos, urbanos y logísticos convergen para generar disrupciones operativas significativas. Las zonas identificadas como críticas Panamá Este, Tocumen y Juan Díaz reflejan la interacción entre deficiencias en infraestructura, exposición a eventos extremos y presión logística, lo cual coincide con estudios recientes sobre riesgo climático urbano en Panamá (Ruíz et al., 2024; Ulloa et al., 2024).

Desde el punto de vista metodológico, el estudio valida la efectividad de la programación por metas combinada con simulación Monte Carlo como herramienta robusta para la toma de decisiones en entornos inciertos. Este enfoque permite capturar la variabilidad inherente a los sistemas logísticos urbanos y evaluar múltiples escenarios, superando las limitaciones de modelos determinísticos tradicionales (Hillier & Lieberman, 2021).

En el ámbito teórico, la principal contribución radica en la integración de ciencias de la Tierra, ingeniería industrial y logística en un modelo unificado, ampliando el marco conceptual de la resiliencia logística hacia una perspectiva cuantitativa y aplicada. Este enfoque contribuye a cerrar la brecha existente en la

literatura, donde estos elementos han sido tradicionalmente abordados de forma aislada (Ivanov & Dolgui, 2021).

Desde el punto de vista práctico, los resultados ofrecen implicaciones directas para la planificación logística urbana en Panamá y en otras ciudades con características similares. Entre ellas destacan la necesidad de diseñar redes logísticas resilientes, incorporar variables climáticas en la toma de decisiones operativas y fortalecer la infraestructura urbana para reducir la vulnerabilidad ante eventos extremos.

Finalmente, el estudio abre nuevas líneas de investigación orientadas a la integración de tecnologías emergentes, como inteligencia artificial, sistemas de información geográfica (SIG), Internet de las Cosas (IoT) y gemelos digitales, con el fin de mejorar la capacidad predictiva y adaptativa de los sistemas logísticos urbanos frente al cambio climático.

En síntesis, la investigación confirma que la sostenibilidad y resiliencia de las redes logísticas urbanas dependen de la capacidad de integrar la variabilidad climática en los modelos de planificación y operación, especialmente en contextos altamente vulnerables como la ciudad de Panamá.

REFERENCIAS

Aven, T. (2016). Risk assessment and risk management: Review of recent advances. *Reliability Engineering & System Safety, 152*, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.10.008

Baryannis, G., Validi, S., Dani, S., & Antoniou, G. (2019). Supply chain risk management and artificial intelligence: State-of-the-art review. *International Journal of Production Research, 57*(7), 2179–2202. https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1530476

CAF. (2020). *Desarrollo urbano y cambio climático en América Latina*. Banco de Desarrollo de América Latina.

Christopher, M., & Peck, H. (2004). Building the resilient supply chain. *The International Journal of Logistics Management, 15*(2), 1–14. https://doi.org/10.1108/09574090410700275

Dekker, R., Bloemhof, J., & Mallidis, I. (2012). Operations research for green logistics—An overview of aspects, issues, contributions and challenges. *European Journal of Operational Research, 219*(3), 671–679. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.11.010

Dolgui, A., Ivanov, D., & Sokolov, B. (2018). Ripple effect in the supply chain: An analysis and recent literature. *International Journal of Production Research, 56*(1–2), 414–430. https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1387680

FAO. (2021). *Climate change and food systems*. Food and Agriculture Organization.

Gevaers, R., Van de Voorde, E., & Vanelslander, T. (2014). Cost structures in last-mile logistics: A literature review. *Procedia Social and Behavioral Sciences, 125*, 184–195. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.1469

Hallegatte, S., Rentschler, J., & Rozenberg, J. (2019). *Lifelines: The resilient infrastructure opportunity*. World Bank. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1430-3

Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). McGraw-Hill.

Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2021). *Introduction to operations research* (11th ed.). McGraw-Hill.

Hoberg, K., & Thonemann, U. (2014). Planning of urban last-mile logistics. *Transportation Research Part E, 70*, 1–16. https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.06.003

IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Ivanov, D. (2020). Viable supply chain model: Integrating agility, resilience and sustainability. *International Journal of Production Economics, 227*, 107567. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107567

Ivanov, D., & Dolgui, A. (2021). A digital supply chain twin for managing disruption risks. *Transportation Research Part C, 125*, 103080. https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103080

Klibi, W., Martel, A., & Guitouni, A. (2010). The design of robust value-creating supply chain networks. *European Journal of Operational Research, 203*(2), 283–293. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.10.011

Levi, M., Kjellstrom, T., & Baldasseroni, A. (2018). Impact of climate change on occupational health and productivity. *La Medicina del Lavoro, 109*(3), 163–179. https://doi.org/10.23749/mdl.v109i3.6851

Li, Y., Zobel, C. W., & Seref, O. (2021). Climate impacts on logistics performance. *Transportation Research Part D, 92*, 102915. https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102915

McKinnon, A. (2018). *Decarbonizing logistics*. Kogan Page.

NASA. (2021). *Global climate data*. National Aeronautics and Space Administration.

NOAA. (2022). *Climate data and precipitation analysis*. National Oceanic and Atmospheric Administration.
OECD. (2020). *Climate risks and resilience*. Organisation for Economic Co-operation and Development.
Pettit, T. J., Fiksel, J., & Croxton, K. L. (2013). Ensuring supply chain resilience. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 43*(1), 46–64. https://doi.org/10.1108/09600031311293237
Queiroz, M. M., Ivanov, D., Dolgui, A., & Wamba, S. (2020). Supply chain resilience under disruptions. *International Journal of Production Economics, 227*, 107536. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107536
Ruíz, M. A., et al. (2024). Climate risk assessment in Panama. *Climate, 12*(7), 104. https://doi.org/10.3390/cli12070104
Sawik, B. (2024). Optimizing last-mile delivery using multi-criteria approaches. *Logistics, 8*(2), 52. https://doi.org/10.3390/logistics8020052
Sheffi, Y. (2015). *The power of resilience*. MIT Press.
Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., & Simchi-Levi, E. (2014). *Designing and managing the supply chain*. McGraw-Hill.
Tang, C. S. (2006). Robust strategies for mitigating supply chain disruptions. *Management Science, 52*(5), 639–657. https://doi.org/10.1287/mnsc.1060.0560
Ulloa, A., et al. (2024). Riesgo climático en el sistema de transporte urbano de Panamá. Banco Interamericano de Desarrollo. https://doi.org/10.18235/0013187
World Bank. (2021). *Logistics performance index*.
World Health Organization. (2022). *Occupational safety and health in a changing climate*.