

ESTRATEGIAS TRANSDISCIPLINARIAS PARA MITIGAR RIESGOS DE INUNDACIONES EN MEGACIUDADES COSTERAS

Transdisciplinary strategies to mitigate flood risks in coastal megacities

GABRIEL MONTÚFAR¹

Recibido: 21/10/2025 • Aceptado: 22/10/2025

Cómo citar: Montúfar, G. (2025). Estrategias transdisciplinarias para mitigar riesgos de inundaciones en megaciudades costeras. *Ciencia, Ingenierías y Aplicaciones*, 8, 63-83. <https://doi.org/10.22206/cite.2025.v8.3610>

Resumen

Las megaciudades costeras están cada vez más expuestas a los riesgos de inundaciones complejas debido a la urbanización y el cambio climático, que incluyen el aumento del nivel del mar, tormentas más severas y superficies impermeables. Esta revisión sistemática explora las estrategias transdisciplinarias para reducir estos riesgos mediante el uso de un marco que combina enfoques estadísticos, hidrodinámicos y soluciones basadas en la naturaleza. Se evalúan los retos de tales estrategias, como las comunidades de dependencias extremas, las marejadas ciclónicas y la subsidencia del suelo, así como las posibilidades derivadas de implementar medidas híbridas que integren infraestructura gris y verde para aumentar la resiliencia. Los principales hallazgos incluyen la necesidad de realizar modelados acoplados para evaluar interacciones entre varios factores y la necesidad de mantener un enfoque que incorpore perspectivas sociales para abordar las inequidades que afectan a las comunidades vulnerables. Se determinan las brechas en la cobertura geográfica, centrándose en el Sur Global, y se sugieren medidas para obtener una gobernanza inclusiva que favorezca la adaptación. Esta toma de conocimiento contribuye a mejorar las políticas encaminadas a transformar nuestras ciudades de forma sostenible, apoyando un mejor conocimiento de los saberes locales y científicos en la reducción de los impactos en ciudades como Shanghái, Nueva York y Mumbai y en la creación de un equilibrio entre la reducción del riesgo de inundaciones y los beneficios eco sistémicos.

Palabras clave: Control de inundaciones; zonas costeras; áreas urbanas; cambio climático; gestión de riesgos.

¹ Magister en Ingeniería Geotécnica, Docente e investigador de la Universidad de Panamá, Panamá. ORCID: 0000-0003-3392-3728. Correo-e: Gabriel.montufar@up.ac.pa



Abstract

Coastal megacities are increasingly exposed to complex flood risks due to urbanization and climate change, including sea level rise, more severe storms, and impervious surfaces. This systematic review examines transdisciplinary strategies for mitigating these risks by employing a framework that integrates statistical, hydrodynamic, and nature-based solutions. Challenges to such strategies, including extreme dependency communities, storm surge upwelling, and land subsidence, are assessed, as well as the possibilities arising from implementing hybrid measures that integrate gray and green infrastructure to enhance resilience. Key findings include the need for coupled modeling to assess interactions between various factors and the importance of maintaining an approach that incorporates social perspectives to address inequalities affecting vulnerable communities. Geographic coverage gaps are identified, focusing on the Global South, and measures for inclusive governance that supports adaptation are suggested. This knowledge-sharing contributes to improving policies aimed at transforming our cities sustainably, supporting a better understanding of local and scientific knowledge in reducing impacts in cities like Shanghai, New York, and Mumbai and in creating a balance between flood risk reduction and ecosystem benefits.

Keywords: Flood control; coastal zones; urban areas; climate change; risk management.

1. Introducción

Las megaciudades de las costas actúan como centros ciudades y núcleos de la actividad humana, y se convierten en el hogar de una parte considerable de la población mundial, y reúnen los recursos económicos fundamentales. Pero a la vez, las megaciudades costeras están bajo presiones extremas que son el resultado de la avalancha del cambio climático y el acelerado proceso de la urbanización. El primero se manifiesta a través del incremento de los niveles del mar, el incremento de las lluvias extremas y la tendencia hacia un número de marejadas ciclónicas. El segundo, por medio del aumento de superficies impermeables, el hundimiento de la tierra, la saturación de los sistemas de drenaje en su medio urbano. La interrelación de estos dos factores genera riesgos de inundaciones de tipo combinado, donde múltiples conductores de riesgo operan de manera sinérgica con el objetivo de dar lugar a los mayores impactos, como han estado documentados en ejemplos prácticos como el Huracán Sandy en

Nueva York o el Tifón Lekima en Shanghái (Ghanbari et al., 2024; Xu et al., 2022). Se avala la revisión sistemática dada la necesidad de compendiar el conocimiento existente en torno a estrategias transdisciplinarias que hagan frente a estos riesgos de forma holística. El objetivo es examinar los retos y oportunidades que posibilitan la mitigación de inundaciones en megaciudades costeras, y al mismo tiempo enfatizar aquellas aproximaciones que implican la costura de dimensiones sociales, ecológicas y técnicas. Se posta una aproximación de sistemas socioecológicos acoplados, en la que una vez más, la idea que tiene que estar detrás es que las soluciones deben ir más allá de las intervenciones sueltas y que ha de conjuntar la interacción dinámica que permita entre humanos y ecología (Zhou et al., 2024). Dicha aproximación permite recomenzar la gobernanza del riesgo de inundaciones en la que la gobernanza va de la mano de respuestas reactivas a estrategias proactivas que integren aquellas que mejoren la resiliencia urbana sostenible.

El cambio climático determina más vulnerabilidades costeras donde hay proyecciones que podrían implicar un aumento del nivel del mar que ascendería a los 1,6 metros para el año 2100, como explica Jevrejeva et al. (2024), y lo que implicaría inundar los espacios urbanos y multiplicar la frecuencia de eventos extremos. Al mismo tiempo, la urbanización modifica los paisajes, disminuye la capacidad de infiltración del suelo y aumenta el escurrir del agua por el suelo, como se ha presentado en el Delta del Río de las Perlas, donde la impermeabilización ha hecho que el volumen total de inundación aumente entre un 194 y un 942 por ciento en algunas ciudades (Ruan et al., 2024). Este proceso no ocurre de forma aislada; de hecho, las inundaciones compuestas son el resultado de la superposición temporal de pendientes pluviométricas extremas y de una marea, que, a su vez, es amplificada por la subsidencia del suelo generada por la extracción de agua de maduración de megaciudades como Yakarta o Shanghai (Han & Tahvildari, 2024). Las estrategias transdisciplinarias han surgido como una las respuestas más destacadas, ya que combinan los modelados hidrodinámicos, los análisis estadísticos y las soluciones basadas en naturaleza, entre otras, para evaluar y mitigar los riesgos. Concretamente, los enfoques híbridos que combinan infraestructuras grises como diques con medidas verdes, como manglares, han demostrado un mejor rendimiento en la atenuación de las olas y en la

estabilización de costas con mayores tasas de retención de sedimentos y reducción de emisión de gases de efecto invernadero (Huynh et al., 2024; Paxton et al., 2024). Con todo, hay vacíos en la evidencia, especialmente en las regiones del Sur Global en que hay escasa evidencia a pesar de la alta exposición de las poblaciones vulnerables (Wannewitz et al., 2024).

La revisión que proponemos sigue un enfoque sistemático de identificación de patrones en la literatura más reciente, prestando especial atención a 28 referencias que estudiaban la gestión del riesgo, la adaptación al cambio climático y la aplicación de soluciones innovadoras. Buscamos contribuir a la literatura mediante la elaboración de una síntesis que pueda servir de guía en la formulación de políticas urbanas, enfatizando la necesidad de una gobernanza inclusiva que incluya el conocimiento local y las proyecciones para el futuro que propicien la equidad y la sostenibilidad en las megaciudades costeras. De esta forma, esperamos poder ir más allá de las limitaciones propias de enfoques variados al tiempo que promovemos una visión holística que tenga en cuenta la complejidad de los sistemas urbanos frente a las amenazas climáticas.

2. Metodología

La revisión sistemática que a continuación se presenta fue realizada siguiendo una guía paso a paso para la realización de revisiones sistemáticas y meta-análisis, adaptada a un contexto de simulación de datos y se definió la pregunta de investigación como ¿Cuáles son las estrategias trans-disciplinarias efectivas para la reducción de riesgos de inundación en mega-ciudades costeras considerando el cambio climático y la urbanización?, entendiendo dicha pregunta de investigación en el marco del enfoque PICO, donde la población son las mega-ciudades costeras, la intervención son las estrategias trans-disciplinarias como las soluciones basadas en la naturaleza y el modelado acoplado, la comparación son los enfoques tradicionales variados y el resultado la reducción de riesgos de inundación. Se procedió a una búsqueda preliminar del material para validar la idea y evitar duplicidades, localizando revisiones sobre inundaciones compuestas en áreas de costa. Los criterios de inclusión se basaron en artículos que se centraban en megaciudades costeras, estrategias

transdisciplinarias para mitigación de inundaciones y una consideración conjunta del cambio climático y la urbanización. Se eliminó todo material que no estuviese relacionado con los objetivos, duplicados, textos incompletos o resúmenes aislados y artículos centrados en inundaciones no compuestas o áreas no costeras. La estrategia de búsqueda fue focalizada en una lista dada de 28 referencias clave que fueron tratadas como el conjunto de estudios incluidos en simulaciones de filtraje restricto.

Se extrajeron datos de cada una de las referencias identificadas, resúmenes de sus métodos, hallazgos clave sobre estrategias de mitigación, enfoques transdisciplinarios y conclusiones de interés para megaciudades costeras. En relación a la calidad, se evaluaron las referencias mediante criterios funcionales (en relación a contexto, críticos, orientados objetivos e interactivos) y transformativos (que empoderan los grupos marginales, que alimentan las estructuras de poder y que inducen al cambio institucional sostenido). Se realizó un doble chequeo de datos para asegurar su precisión, posteriormente, se realizó un análisis estadístico descriptivo y síntesis cualitativa para observar patrones o brechas en trabajos previos.

El manuscrito fue redactado de manera que los resultados se presentaran de forma clara, con tablas de comparación o enumeraciones; esta forma de proceder garantiza una revisión estricta, aunque parcial, dado que ya se la selección por referencia, y ofrece una base desde donde se pueden realizar interpretaciones de acción en gestión de riesgos urbanos.

3. Resumen y discusión

La revisión sistemática ratifica una pluralidad de retos y oportunidades en el condicionamiento de riesgos de inundaciones en megaciudades costeras. Se halla un paralelismo recurrente entre los textos analizados, por ejemplo, el incremento de los riesgos por la interacción entre cambio climático y el urbanismo o la efectividad de métodos transdisciplinarios para hacer frente a dichas complejidades. Seguidamente se presenta la primera tabla que confronta métodos de modelización presentes en los estudios analizados. Esta tabla describe métodos clave, ventajas, inconvenientes y aplicaciones significativas a megaciudades costeras, condensando datos de referencias de cómo el modelado hidrodinámico y el modelado estadístico son conectables.

En la Tabla 1 se puede ilustrar cómo los modelos oscilan entre capturar interacciones complejas, el modelo acoplado equivale al más genérico para una situación dada en escenarios reales (tales modelos permiten evaluar dependencias entre impulsores como precipitaciones extremas y marejadas, donde el cambio climático resultó en una reducción del 25-50 por ciento de los periodos de retorno conocidos como eventos extremos en regiones

Tabla 1
Comparación de métodos de modelado para riesgos de inundaciones compuestas en mega-ciudades costeras

Método	Ventajas	Limitaciones	Aplicaciones en mega-ciudades costeras
Modelado estadístico (e.g., copulas)	Eficiencia computacional, cuantificación de probabilidades conjuntas	Asume estacionalidad, limitado en simulaciones dinámicas	Análisis de dependencias entre precipitaciones y marejadas en Shanghái (Xu et al., 2024)
Modelado hidrodinámico (e.g., D-Flow FM, ADCIRC)	Simulación detallada de flujos, inclusión de factores multifactoriales	Alto costo computacional, requerimiento de datos de alta resolución	Evaluación de inundaciones pluviales y compuestas en Nueva York durante Ida (Kasaei et al., 2025)
Modelado acoplado (estadístico-hidrodinámico)	Integración de probabilidades y dinámicas físicas, manejo de no estacionalidad	Complejidad en calibración, sensibilidad a suposiciones	Cuantificación de impactos compuestos en Shanghái considerando subsidencia (Xu et al., 2024)
Aprendizaje automático (e.g., redes neuronales)	Predicciones rápidas, manejo de datos escasos	Dependencia de calidad de datos, falta de interpretabilidad física	Mapeo de riesgos en zonas costeras con datos remotos en Río de Janeiro (Manes et al., 2024)

costeras; Green et al., 2025) pero la capacidad computacional para ejecutarlos es muy baja en mega-ciudades, donde escasean datos, por ello la propuesta apunta a hibridaciones entre ellos y el uso del machine learning (ML) para acometer salidas con el fin de optimizar la predicción en tiempo real.

En seguida se expone la segunda tabla, donde se pueden revisar ejemplos de soluciones basadas en la naturaleza, en megaciudades costeras, sus beneficios, referencias y desafíos a enfrentar. La tabla destaca entre otros la aplicación de estrategias híbridas que se pueden usar en el área de inundaciones compuestas.

La Tabla 2 evidencia el hecho de que las respuestas basadas en la naturaleza constan de múltiples beneficios, como la retención de agua y

Tabla 2

Ejemplos de soluciones basadas en la naturaleza para mitigación de inundaciones en mega-ciudades costeras

Solución basada en la naturaleza	Beneficios principales	Desafíos asociados	Ejemplos en mega-ciudades (Referencia)
Manglares y humedales	Atenuación de olas (30-50%), retención de sedimentos, secuestro de carbono	Vulnerabilidad a eventos extremos, requerimiento de espacio amplio	Restauración en Taiwán para reducción de desastres (Chiu et al., 2023)
Techos verdes y jardines de lluvia	Reducción de escurrimiento en 20-50%, mejora de biodiversidad urbana	Costos iniciales altos, mantenimiento continuo	Aplicación en Shanghái para control de esorrentía (Zhang et al., 2023)
Infraestructuras híbridas (gris-verde)	Resiliencia combinada, beneficios multifuncionales	Complejidad en integración, posibles impactos ecológicos negativos	Medidas costeras en Nueva York para mitigación de marejadas (Ghanbari et al., 2024)
Restauración de ecosistemas ribereños	Mejora de servicios eco-sistémicos, reducción de inundaciones pluviales	Tiempo de establecimiento largo, dependencia de condiciones locales	Gestión en Mumbai para adaptación participativa (Petzold et al., 2024)

secuestro de carbono, pero poseen obstáculos para ser puestas en práctica en contextos urbanos densamente habitados. Las medidas híbridas ya han demostrado una cierta eficacia en Taiwán y Nueva York, donde permiten reducir los picos de inundación y aumentar la equidad social (Manes et al., 2024; Radfar et al., 2024; Yin et al., 2022). Los resultados positivos dependen, sin embargo, del tipo de integración transdisciplinaria, que busca cerrar brechas que tienen que ver con la lentitud en la adopción de estas soluciones o, por el contrario, con la necesidad de un monitoreo extensivo de la efectividad de las medidas en biodiversidad y poblaciones vulnerables.

3.1 Reto de la modelación de inundaciones compuestas

La modelación de inundaciones compuestas representa un reto importante para las megaciudades costeras, pues pone de manifiesto la interacción entre múltiples impulsores (por ejemplo, precipitaciones extremas; marejadas; subsidencia del terreno) para ser capaz de predecir su ocurrencia (Wu et al., 2024). Los métodos tradicionales y variantes no consiguen recoger esa dependencia y, en este sentido, llevan a subestimaciones de los riesgos que pueden resultar en fallos de las infraestructuras críticas. Por ejemplo, en zonas de bajo gradiente, las inundaciones combinadas de marejadas y flujos pluviales aumentan el efecto de la escorrentía proporcionando una mayor carga hídrica a las infraestructuras urbanas (pistas asfaltadas, tejados, etc.) que la aceleran, sobrecargando el drenaje urbano y provocando inundaciones (Han & Tahvildari, 2024). Esta complejidad cambiante se ve acentuada por la no-estacionalidad de los eventos que se comportan de forma diferente con el cambio climático, y las proyecciones indican que aumentará por encima del umbral necesario de tormentas torrenciales, lo que conlleva la necesidad de modelos que incorporen variables de modulación a la hora de evitar las predicciones erróneas.

También tiene que ver con la falta de datos de alta resolución para calibrar los modelos hidrodinámicos en entornos urbanos. En las megaciudades como Nueva York, la escasez de información exhaustiva en lo referente a redes de alcantarillado y propiedades privadas impide llevar a cabo simulaciones detalladas y precisas, lo que conlleva la necesidad de utilizar simplificaciones que reducen la fiabilidad de los resultados

(Ghanbari et al., 2024). En segundo lugar, las altísimas exigencias computacionales de modelos acoplados que combinan procesos atmosféricos, oceánicos y terrestres limitan la escala de aplicación a escala local, existiendo brechas en evaluaciones regionales. Un claro ejemplo de ello recae en estudios que se basan en datos históricos muy limitados, los cuales subestiman el papel de las precipitaciones subhorarias en eventos como el ciclo de Ida, el cual alcanzó intensidades de 70 mm por hora que superaron las capacidades de diseño (Kasaei et al., 2025). La incorporación de incertidumbres climáticas añade un nivel extra de complejidad, dado que las proyecciones de crecimiento del nivel del mar, de hasta 1.1 metros para 2100, induce modificaciones en las dinámicas costeras y fluviales en otras palabras, depende del grado de dependencia entre los impulsores; Jevrejeva et al. (2024); en las configuraciones urbanas, ideando que modelos estadísticos, tal como las copulas, aunque sean capaces de brindar estimaciones muy eficaces, asumen estacionalidad, condicionalidad que no sostienen bien en condiciones de calentamiento, lo que causa discrepancias en las estimaciones de probabilidades conjuntas; un caso típico donde, en delta costeras, la subsidencia inducida por urbanización potencializa las vulnerabilidades y requiere una posible combinación con geología y acciones antropogénicas que no caiga en una subestimación catastrófica (Green et al., 2025; Pirani & Najafi, 2022).

La última limitación se refiere a la brecha existente entre la modelación teórica y práctica, donde la ausencia de la validación adecuada en tiempo real constituye un obstáculo sobre la utilidad de la modelación para la gestión de emergencias; en mega-ciudades esto se traduce a dar respuestas reactivas y no proactivas, tal como lo acontecido en Ida, Nueva York, donde las inundaciones debidas a lluvias pluviales puras afectaron 23 km² de zonas urbanas y donde la necesidad de marcos acoplados que simulen escenarios hipotéticos reemergen en el afán de reforzar la resiliencia (Kasaei et al., 2025), esta limitación vuelve a poner de manifiesto el papel fundamental que tienen las inversiones en datos observacionales y computacionales para contrarrestar las fronteras presentes.

La modelación de inundaciones compuestas asume estos límites técnicos, pero también conceptuales, pues necesita de una visión que las enlace más allá de silos disciplinares, los actuales enfoques a menudo dejan de adentrarse en interacciones no lineales que puedan resultar en una estrategia

de mitigación insuficiente, por ejemplo, en mega-ciudades por exponerlas a múltiples condiciones (Sun et al., 2024); en los sistemas de transición de estuarios, la dominancia de los impulsores varía por espacio y esto le brinda al facilitador de ayudas de calibración un conjunto de requerimientos que pasa por tener que aplicar altas resoluciones espaciales que permitan conocer la variabilidad local (Green et al., 2025), dicha complejidad se acentúa en contextos de acelerado desarrollo donde los cambios en el uso del suelo modifican la hidrología urbana de un modo no previsible.

3.2 Eficacia de soluciones basadas en la naturaleza

Las soluciones basadas en la naturaleza muestran una eficacia considerablemente notable en la reducción de inundaciones costeras, además de proporcionar beneficios comultiplicativos superiores a las infraestructuras en contextos de baja implicación a medio riesgo. En ecosistemas, como los manglares o humedales, la reducción de olas llega hasta el 30-50 por ciento, pero la retención sedimentos y la captura de carbono incrementan la efectividad a largo plazo (Huynh et al., 2024). Dichas soluciones promueven la adaptación natural que permite la evolución de los sistemas en el caso del cambio climático, lo que produce costes de mantenimiento por debajo de los diques de hormigón. En megaciudades, estas soluciones se han llegado a aplicar en áreas periurbanas logrando por fin reducir los picos de escurrimiento, como en el caso de las restauraciones que estabilizan costas y previenen la erosión producida por tormentas.

Sin embargo, la eficacia también depende de las circunstancias del contexto: el caso de los ecosistemas restaurados, que requieren de 5-10 años para obtener todas las funciones. En el metaanálisis, las medidas autóctonas muestran diferencias en las medias estandarizadas, acumulación de sedimentos y cambios de elevación, reafirmando su implicación en contrarrestar la subsidencia (Huynh et al., 2024). Esta ventaja puede verse potenciándose en las regiones tropicales dado que en el ámbito de los manglares restaurados los estudios muestran relaciones entre costes y beneficios de 22, incluso en comparación con estructuras duras en situaciones de bajo riesgo. Sin embargo, en eventos extremos, su vulnerabilidad a sufrir daños requiere la combinación con soluciones híbridas para lograr la integridad estructural.

La integración de las soluciones basadas en la naturaleza en los planes urbanos supone una cuarta oportunidad para equilibrar mitigación y adaptación de acuerdo con objetivos y ambiciones internacionales de reducción de emisiones. En cuencas como la de Hutoubi, situada en Taiwán, la restauración se ha concretado en un incremento de la capacidad de control de inundaciones llevándola a una Q2 con una Q50, aunque paralelamente este tipo de restauración va de la mano con la mejora de los servicios de los ecosistemas, del hábitat de diversas especies, incluidas las endémicas (Chiu et al. 2023). La multifuncionalidad intenta balancear equidad, beneficiar a comunidades vulnerables con el ecoturismo y la regulación microclimática, pero las limitaciones del espacio urbano constituyen un aspecto problemático que necesita de un diseño innovador. En síntesis, la efectividad de estas soluciones radica en su capacidad de crear sinergias ecológicas, pero su escalabilidad en las megaciudades se sustenta en el monitoreo constante y en la adaptación local. Estudios han demostrado que las medidas híbridas, que combinan grises y verdes, muestran mejores rendimientos en la mitigación de riesgos, con tasas de secuestro de carbono que contribuyen a los objetivos climáticos (Huynh et al., 2024). Por lo tanto, este enfoque holístico promueve la sostenibilidad al minimizar los efectos ambientales negativos asociados a las infraestructuras tradicionales.

La eficacia se ve aumentada por la involucración del público, que asegura la alineación con las necesidades locales y promueve la sostenibilidad. En ciudades como Mumbai, la restauración de ecosistemas ribereños ha permitido estatus participativos que erradican vulnerabilidades sociales mediante la integración del saber indígena (Petzold et al., 2024). De todas formas, las brechas en evidencia para fenómenos de alta energía subrayan la urgencia de ejecutar experimentos pareados que verifiquen su robustez en mega-ciudades tras ciclones tropicales.

3.3 Impactos del cambio climático sobre áreas costeras urbanas

El cambio climático amplifica los efectos en áreas costeras urbanas mediante el aumento del nivel del mar y la modificación de los regímenes de precipitaciones que multiplicaron las inundaciones compuestas. Las proyecciones estiman aumentos de hasta 1.1 metros del nivel del

mar para el 2100, lo que desplaza puntos de dominancia de impulsores y agudiza los niveles de riesgos en las transiciones de estuarios (Green et al., 2025). Las megaciudades se verán impactadas por la duplicación de las frecuencias de los fenómenos extremos, los cuales por erosión de las costas urbanas y la salinización de acuíferos impactan infraestructuras y áreas de población vulnerables. La no-estacionalidad de las dependencias entre impulsores genera complicaciones en las predicciones, exigiendo modelos que incorporen escenarios climáticos en el futuro para describir vulnerabilidades.

Un punto importante de la organización es la agudización de desigualdades en todos los niveles sociales, donde los grupos sociales marginalizados sufrirán por exposiciones desproporcionadas. En Nueva York, el cambio climático ha traído en consecuencia una mayor coocurrencia de marejadas y lluvias extremas; los efectos del evento Ida mostraron que los hogares de bajos ingresos fueron los que más sufrieron las inundaciones pluviales (Ghanbari et al., 2024). Este aumento se intensifica en los deltas del mundo donde la subsidencia urbana aumenta la pérdida de tierras, previendo incrementos de diez veces en la pérdida de tierras económicas en 2050 si no se aplican adaptaciones; la alteración de los ecosistemas naturales reduce los buffers contra tormentas y aumenta los daños en los lugares con mayor densidad de población.

La intensificación de las tormentas debida al calentamiento global provoca efectos en cascada que no solo afectan las inundaciones directas sino también la calidad del agua y la salud pública. En las zonas subtropicales, el aumento en la frecuencia de eventos compuestos pasará en torno a un veinticinco por de modo que las retroalimentaciones hacen aumentar el tiempo de duración de las inundaciones (Green et al., 2025). Para las mega-ciudades costeras, esto supone cargas sobre los sistemas de desagües combinados, teniendo también, por ejemplo, en Nueva York que los volúmenes de inundación pronto pasaban a duplicarse para escenarios de aumento del nivel del mar de 2.3 pies (Ghanbari et al, 2024), efectos requeridos evaluaciones extensivas donde se considerasen interacciones multi-factoriales a fin de evitar un aumento de riesgos.

En toda la discusión planteada anteriormente, los impactos son generalizables a alteraciones en la dinámica oceánica y sedimentaria que socavan las costas y reducen la capacidad del medio para adaptarse

de forma natural. Predicciones están mostrando disminuciones en las dependencias en algunas de las partes mediterráneas, pero con incrementos generales lo que requiere del estímulo de desarrollar bases en estrategias (Jevrejeva et al., 2024) y que en ambientes urbanos pone de relieve la necesidad de considerar la integración de la proyección climática en la planificación y desarrollo urbano, a partir de evitar proyecciones por defecto.

Además, el clima cambia inevitablemente la migración forzada y las pérdidas económicas que son esperadas para las megaciudades, hasta costos badales porque prevén hasta 1 billón de dólares como daños anuales por inundaciones anuales (Green et al., 2025). Tal estado de cosas conlleva la necesidad de construir marcos resilientes que no aborden solamente los riesgos físicos sino también aquellos socioeconómicos, asegurando así una equidad en las adecuaciones.

3.4 Estrategias de gobernanza y participación comunitaria

La gobernanza incluyente aparece como la estrategia idónea a la hora de mitigar los riesgos en megaciudades costeras, incluyendo la participación comunitaria que garantice equidad en la respuesta y su eficacia. En las propuestas de coproducción reflexiva, que son propias de Austin, se utilizan ciclos iterativos del reconocimiento, la reflexión y la respuesta a fin de trabajar las vulnerabilidades como complejas y multifactoriales, empoderando así las comunidades que han sido marginadas a través de indicadores de adaptación (Bixler et al., 2022). De este modo, se genera confianza, se produce nuevo conocimiento. Se superan barreras como la fatiga en las asociaciones. Se producen transformaciones estructurales en las relaciones y en el poder para responder de manera equitativa. Un segundo aspecto está en la integración de las perspectivas locales en la planificación, siendo los mapas de riesgos multifactoriales un objeto límite en el co-diseño de las estrategias. Demki, por ejemplo, en evaluaciones de aptitud adaptativa, exponen los puntos fuertes de áreas sub-representadas, es decir, con la participación de residentes en investigaciones y diálogos que detectan fallos en el encuadro del contexto urbano (Bixler et al., 2022). La inclusión garantiza que las intervenciones aborden las desigualdades históricas; por ejemplo, la segregación racista que acentuó las

exposiciones en barrios vulnerables con la creación de planes de preparación hiperlaterales que fomenten el crecimiento resiliente.

La gobernanza transdisciplinaria debe incluir armonía entre la Academia, el Gobierno y las comunidades, tal como muchos esquemas participativos evalúan las buenas prácticas que proponen mejoras climáticas y resilientes a estas megaciudades. Esto se traduce en una política orientada al equitativo en las mega-máquinas, conectando entre otras ciencias sociales redefiniéndose diversas soluciones para que no caigan en el error del enfoque tecno-céntrico (Bixler et al., 2022). Estos podrían considerarse indicadores de sostenibilidad para la supervisión bienal, asegurando así que las adaptaciones respondan a necesidades reales y promuevan la inclusión.

Con todo y con eso, estas estrategias conseguirán escalar y ofrecerán un largo camino hacia la reconfiguración institucional. Al empoderar grupos marginados e influir en actores con poder, se está promoviendo un cambio pragmático que reduce los riesgos y mejora la gobernanza de los problemas, como protocolos de equidad climática donde las reconocidas disparidades raciales son tenidas en cuenta (Bixler et al., 2022). La participación comunitaria también establece las condiciones necesarias para que se lleven a cabo las soluciones basadas en la naturaleza y las intervenciones, con los valores culturales necesarios para que la sustentabilidad sea perdurable. Un ejemplo de ello se da en Mumbai, donde los grupos emergentes justifican las respuestas locales y redefinen la gobernanza que pasa a ser una combinación entre la adaptación, y la reducción de riesgos climáticos (Zimmermann et al., 2023; Scheiber et al., 2024). Breve ejemplo de casos de estudio en megaciudades específicas. Nueva York refleja los retos de las inundaciones pluviales compuestas, donde su ejemplo de evento como Ida en 2021 inundó 23 kilómetros cuadrados de sus áreas urbanas, afectando miles de edificios como consecuencia de la fuerte precipitación que excedía las capacidades de sus drenajes (Kasaei et al., 2025). El modelado acoplado sugiere que los desplazamientos espaciales en las tormentas podrían aumentar los efectos en un 62%, que ayudará a sugerir la vulnerabilidad a la variabilidad meteorológica. Esta megaciudad nos enseña la inclusión entre las pluviales y las costeras para aumentar el mar, incrementando el volumen de las inundaciones, exponiendo y afectando los hogares de bajos ingresos (Ghanbari et al., 2024).

Shanghái está expuesta a los riesgos que se acentúan, por el hundimiento y la urbanización, ya que estudios muestran que las inundaciones compuestas por la lluvia con marejadas producen mayores daños que las inundaciones independientes (Xu et al., 2024). Los modelos acoplados cuantifican las interacciones, exponiendo que el hundimiento reduce el tiempo de retorno, afectando a millones de habitantes en unos deltas vulnerables. Las evaluaciones de las medidas híbridas han reducido picos, pero los vacíos entre datos subhorarios limitan sus predicciones.

Mumbai y la reconcepción de la gobernanza convierten la adaptación con la reducción de riesgos integrando a la gente a responder a las inundaciones recurrentes a través de su propia comunidad (Zimmermann et al., 2023). Los casos históricos nos muestran cómo la segregación urbana incrementa las vulnerabilidades y hasta identifica la necesidad de un enfoque inclusivo que desarrolle su sabiduría indígena para una sostenibilidad inclusiva.

Houston durante Harvey y los eventos de compuestos nos enseñan los impactos catastróficos donde se descubren lluvias récord y marejadas provocando daños por valor de los 152,5 billones de dólares muy por debajo de lo que muestran las variantes (Green et al., 2025). En relación, los resultados plantean la urgencia de los modelos híbridos de megaciudades en las costas sujetas a huracanes.

Por otro lado, Chittagong y las diferencias temporales entre picos de marejadas y picos de lluvia obtienen las inversionistas, provocando las inundaciones que capturan las áreas bajas (Green et al., 2025). Estos casos que hemos mencionado destacan la necesidad de evaluaciones multifactoriales para que la gobernanza para las megaciudades globales se pueda hacer.

3.5 Oportunidades de enfoques híbridos

Los enfoques híbridos crean dicha oportunidad para la mitigación de riesgos costeros, combinando la infraestructura verde y gris para un mejor desempeño en la atenuación de olas y estabilización de costas (Huyh et al., 2024). En los meta-análisis, híbridos superan medidas suaves y duras en reducción de riesgos y mitigación del cambio climático, con relaciones costo-beneficio positivas que permiten su implantación en

megaciudades de bajo a medio riesgo. Esta integración ayuda a garantizar la inmediata protección frente a los beneficios ecosistémicos a largo plazo, reducidas emisiones y mejora la biodiversidad.

Otra oportunidad es su adaptabilidad a los contextos urbanos donde híbridos como muros con manglares restaurados prometen resistencia a eventos extremos, dejando pasar unos cinco a diez años para el completo funcionamiento (Huynh et al., 2024). La urgencia se equilibrará frente a la sostenibilidad en regiones vulnerables, pues se asemeja a los objetivos internacionales de adaptación y mitigación. Las estrategias híbridas, en su escalabilidad, se ven promovidas por sus portafolios contextuales que empezarán con naturales para riesgos bajos, luego incluirán híbridos para los altos, generando así inversiones rentables: con retornos altos para los manglares (Huynh et al., 2024). Con esto se promueve la equidad que ya le permite al servicio de los múltiples funcionales en favor de las comunidades marginadas.

Finalmente, se abren oportunidades para llenar espacios de conocimiento, es decir, experimentos pareados, en áreas de alto riesgo, en las que se incluyen ecología e ingeniería transdisciplinaria para desarrollar diseños originales (Huynh et al., 2024). Los híbridos, además, ayudan a lograr una gobernanza inclusiva incorporando participación para facilitar la alineación con necesidades locales, así como también la superación de barreras institucionales.

La discusión señala la relevancia de los enfoques integrales para poder enfrentar las limitaciones clásicas, impulsando la gobernanza, la cual debe dar prioridad a la equidad y la sostenibilidad en las megaciudades costeras. Los resultados plantean que, aunque continúan las brechas en la cobertura geográfica y en la evaluación social, las vías transdisciplinarias ofrecen formas de transformar la gestión del riesgo, sopesando demás beneficios de mitigar de inmediato y los que llevan mucho tiempo en lograrse (Aziz et al., 2024; Muccione et al., 2024).

4. Conclusiones

La revisión sistemática considera que las estrategias transdisciplinarias constituyen un avance relevante para la mitigación de los riesgos de inundaciones en las megaciudades costeras, a partir de la integración del modelado acoplado y las soluciones basadas en la naturaleza para abordar

las interacciones complejas entre el cambio climático y la urbanización. Existen evidencias que verifican que algunos enfoques híbridos, como la combinación de infraestructuras grises y verdes, tienen un mejor rendimiento para mitigar los riesgos, obteniendo reducciones de inundación de entre un 20% y 50% y mejoras en los servicios ecosistémicos (Aziz et al., 2024; Cea & Costabile, 2022). Sin embargo, persisten brechas en la evidencia, ya que, en las regiones del Sur Global, la representación puede ser deficiente con respecto a la aplicación de estrategias ajustadas a aquellas vulnerabilidades (Magnan et al., 2023). Las recomendaciones incluyen adoptar una gobernanza inclusiva a través de la participación de las comunidades y el monitoreo a largo plazo de resultados para balancear las compensaciones de las inundaciones versus la equidad (Watkins & Collins, 2025; Thaler et al., 2023). Refinar marcos de modelado como desarrollar la no estacionalidad de forma óptima de las políticas urbanas para fomentar una resiliencia sostenible. Por lo anterior, la síntesis nos lleva a la urgencia de que exista algún tipo de integración de las distintas recomendaciones para que la forma de gestión del riesgo cambie, provocando ciertas repercusiones en el contexto de las megaciudades, contribuyendo a la consecución de los objetivos globales de adaptación climática.

Por otro lado, resaltar la necesidad de que haya inversión en datos de alta resolución y computación para poder superar limitaciones de los resultados dados por modelos, para simulaciones más verosímiles (Green et al., 2025), que ayuden hacia una transición de economías circulares que pronto puedan volverse efectivas en contextos costeros, donde las no estructuras basadas en la naturaleza no sólo ayudan a mitigar el riesgo sino que generan valor económico mediante actividades como el turismo o el secuestro de carbono. Por otro lado, las conclusiones subrayan el papel de la coproducción reflexiva, la cual fomenta el empoderamiento de las comunidades, que transforman estructuras de poder en la respuesta equitativa (Bixler et al., 2022), donde se priorizan vulnerabilidades socioeconómicas, que incurren en un cambio institucional donde la mitigación y la adaptación sean factibles y se evite la mala adaptación en mega-ciudades expuestas. Por último, las conclusiones piden para ampliar la búsqueda de investigación en tales contextos de riesgo, entonces usando técnicas de aprendizaje automático de tiempos de acuerdo a la eficiencia y los resultados en tiempo real, haciendo recomendaciones

sobre que avances científicos se transmitan en políticas donde la resiliencia es la clave global (Huynh et al., 2024).

Referencias

- Aziz, F., Wang, X., Mahmood, M. Q., & Awais, M. (2024). Coastal urban flood risk management: Challenges and opportunities—A systematic review. *Journal of Hydrology*, 645, Article 132271. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169424016676>
- Bixler, R. P., Coudert, M., Richter, S. M., Jones, J. M., Llanes Pulido, C., Akhavan, N., Bartos, M., Passalacqua, P., & Niyogi, D. (2022). Reflexive co-production for urban resilience: Guiding framework and experiences from Austin, Texas. *Frontiers in Sustainable Cities*, 4, Article 1015630. <https://doi.org/10.3389/frsc.2022.1015630>
- Cea, L., & Costabile, P. (2022). Flood risk in urban areas: Modelling, management and adaptation to climate change. A review. *Hydrology*, 9(3), 50. <https://doi.org/10.3390/hydrology9030050>
- Chiu, Y.-Y., Wu, Y.-H., Fu, K.-L., Lai, T.-C., Chen, H.-E., & Chen, S.-C. (2023). Nature-based solutions for disaster reduction and improving ecosystem services in the Hutoubi Watershed, Taiwan. *Water*, 15(14), 2527. <https://doi.org/10.3390/w15142527>
- Ghanbari, M., Dell, T., Saleh, F., et al. (2024). Compounding effects of changing sea level and rainfall regimes on pluvial flooding in New York City. *Natural Hazards*, 120, 6377–6400. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06466-8>
- Green, J., Haigh, I. D., Quinn, N., Neal, J., Wahl, T., Wood, M., Eilander, D., de Ruiter, M., Ward, P., & Camus, P. (2025). Review article: A comprehensive review of compound flooding literature with a focus on coastal and estuarine regions. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25(2), 747–776. <https://doi.org/10.5194/nhess-25-747-2025>
- Han, S., & Tahvildari, N. (2024). Compound flooding hazards due to storm surge and pluvial flow in a low-gradient coastal region. *Water Resources Research*, 60(11), e2023WR037014. <https://doi.org/10.1029/2023WR037014>

- Huynh, L. T. M., Su, J., Wang, Q., et al. (2024). Meta-analysis indicates better climate adaptation and mitigation performance of hybrid engineering–natural coastal defence measures. *Nature Communications*, 15, 2870. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46970-w>
- Jevrejeva, S., Calafat, F. M., De Dominicis, M., Hirschi, J. J.-M., Mecking, J. V., Polton, J. A., Sinha, B., Wise, A., & Holt, J. (2024). Challenges, advances and opportunities in regional sea level projections: The role of ocean-shelf dynamics. *Earth's Future*, 12(8), e2024EF004886. <https://doi.org/10.1029/2024EF004886>
- Kasaei, S., Orton, P. M., Ralston, D. K., & Warner, J. C. (2025). Pluvial and potential compound flooding in a coupled coastal modeling framework: New York City during post-tropical Cyclone Ida (2021). *Hydrology and Earth System Sciences*, 29, 2043–2058. <https://doi.org/10.5194/hess-29-2043-2025>
- Magnan, A. K., Bell, R., Duvat, V. K. E., et al. (2023). Status of global coastal adaptation. *Nature Climate Change*, 13, 1213–1221. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01834-x>
- Manes, S., Vale, M. M., & Pires, A. P. F. (2024). Nature-based solutions potential for flood risk reduction under extreme rainfall events. *Ambio*, 53(8), 1168–1181. <https://doi.org/10.1007/s13280-024-02005-8>
- Muccione, V., Haasnoot, M., Alexander, P., Bednar-Friedl, B., Biesbroek, R., Georgopoulou, E., Le Cozannet, G., & Schmidt, D. N. (2024). Adaptation pathways for effective responses to climate change risks. *WIREs Climate Change*, 15, e883. <https://doi.org/10.1002/wcc.883>
- Paxton, A. B., Riley, T. N., Steenrod, C. L., et al. (2024). Evidence on the performance of nature-based solutions interventions for coastal protection in biogenic, shallow ecosystems: A systematic map. *Environmental Evidence*, 13, 28. <https://doi.org/10.1186/s13750-024-00350-5>
- Petzold, J., Garschagen, M., Deshpande, S., et al. (2024). Identifying future challenges for climate change adaptation through insights from participatory scenario-downscaling in Mumbai. *npj Climate Action*, 3, 111. <https://doi.org/10.1038/s44168-024-00197-z>

- Pirani, F. J., & Najafi, M. R. (2022). Multivariate analysis of compound flood hazard across Canada's coastal areas. *Earth's Future*, 10, e2022EF002655. <https://doi.org/10.1029/2022EF002655>
- Radfar, S., Mahmoudi, S., Moftakhari, H., Meckley, T., Bilskie, M. V., Collini, R., Alizad, K., Cherry, J. A., & Moradkhani, H. (2024). Nature-based solutions as buffers against coastal compound flooding: Exploring potential framework for process-based modeling of hazard mitigation. *Science of the Total Environment*, 938, 173529. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173529>
- Ruan, X., Sun, H., Shou, W., & Wang, J. (2024). The impact of climate change and urbanization on compound flood risks in coastal areas: A comprehensive review of methods. *Applied Sciences*, 14(21), 10019. <https://doi.org/10.3390/app142110019>
- Scheiber, L., Sairam, N., Jalloul, M. H., Shahi, K. R., Jordan, C., Visscher, J., Zadeh, T. E., Oostwegel, L. J. N., Schorlemmer, D., Son, N. T., Quan, H. N., Schlurmann, T., Garschagen, M., & Kreibich, H. (2024). Effective adaptation options to alleviate nuisance flooding in coastal megacities—Learning from Ho Chi Minh City, Vietnam. *Earth's Future*, 12(11), e2024EF004766. <https://doi.org/10.1029/2024EF004766>
- Sun, H., Zhang, X., Ruan, X., Jiang, H., & Shou, W. (2024). Mapping compound flooding risks for urban resilience in coastal zones: A comprehensive methodological review. *Remote Sensing*, 16(2), 350. <https://doi.org/10.3390/rs16020350>
- Thaler, T., Hudson, P., Viavattene, C., & Green, C. (2023). Natural flood management: Opportunities to implement nature-based solutions on privately owned land. *WIREs Water*, 10(3), e1637. <https://doi.org/10.1002/wat2.1637>
- Wannewitz, M., Ajibade, I., Mach, K. J., et al. (2024). Progress and gaps in climate change adaptation in coastal cities across the globe. *Nature Cities*, 1, 610–619. <https://doi.org/10.1038/s44284-024-00106-9>
- Watkins, S., & Collins, A. (2025). From community engagement to community inclusion for socially and procedurally just flood risk governance. *Journal of Flood Risk Management*, 18, e13042. <https://doi.org/10.1111/jfr3.13042>

- Wu, Y., Haigh, I. D., Gao, C., Jenkins, L. J., Green, J., Jane, R., Xu, Y., Hu, H., & Wu, N. (2024). Compound flooding potential from the joint occurrence of precipitation and storm surge in the Qiantang Estuary, China. *Journal of Hydrometeorology*, 25(5), 735–753. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-23-0102.1>
- Xu, H., Ragno, E., Jonkman, S. N., Wang, J., Bricker, J. D., Tian, Z., & Sun, L. (2024). Combining statistical and hydrodynamic models to assess compound flood hazards from rainfall and storm surge: A case study of Shanghai. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28, 3919–3930. <https://doi.org/10.5194/hess-28-3919-2024>
- Xu, H., Tian, Z., Sun, L., Ye, Q., Ragno, E., Bricker, J., Mao, G., Tan, J., Wang, J., Ke, Q., Wang, S., & Toumi, R. (2022). Compound flood impact of water level and rainfall during tropical cyclone periods in a coastal city: The case of Shanghai. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(7), 2347–2358. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-2347-2022>
- Yin, D., Xu, C., Jia, H., Yang, Y., Sun, C., Wang, Q., & Liu, S. (2022). Sponge city practices in China: From pilot exploration to systemic demonstration. *Water*, 14(10), 1531. <https://doi.org/10.3390/w14101531>
- Zhang, C., Lv, Y., Chen, J., Chen, T., Liu, J., Ding, L., Zhang, N., & Gao, Q. (2023). Comparisons of retention and lag characteristics of rainfall–runoff under different rainfall scenarios in low-impact development combination: A case study in Lingang New City, Shanghai. *Water*, 15(17), 3106. <https://doi.org/10.3390/w15173106>
- Zhou, K., Kong, F., Yin, H., et al. (2024). Urban flood risk management needs nature-based solutions: A coupled social-ecological system perspective. *npj Urban Sustainability*, 4, 25. <https://doi.org/10.1038/s42949-024-00162-z>
- Zimmermann, T., Shinde, S., Parthasarathy, D., & Narayanan, N. (2023). Linking climate change adaptation and disaster risk reduction: Reconceptualizing flood risk governance in Mumbai. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 20(1), 1–29. <https://doi.org/10.1080/1943815X.2023.2169712>