

Estrategias de construcción para abordar la resiliencia frente al cambio climático: estructuras verdes, grises e híbridas

Castillo-Martínez, Kathleen Jhoan

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
ORCID ID 0009-0003-8276-6201

Mack-Vergara, Yazmin Lisbeth

Centro Experimental de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
ORCID ID 0000-0002-1313-9234

Guerra-Chanis, Gisselle

Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas, Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
ORCID ID 0000-0003-1098-4675

Abstract

Anthropogenic activities are the main emitters of greenhouse gases that drive climate change, intensifying the occurrence of extreme weather events that trigger a greater number of floods, landslides, strong winds, and sea level rise. In this context, infrastructure plays a fundamental role in protecting communities with infrastructure that contributes to resilience, such as green, gray, and hybrid infrastructure. On the one hand, gray infrastructure focuses on the use of hard structures built with concrete to guarantee durability and resistance properties, while green and hybrid infrastructure incorporate solutions based on mitigating the adverse effects of climate change. Through the identification of the most aggravating natural disasters in Panama and a literature review, this document explores alternatives for community resilience in the face of climate change events, with the use of green, gray, and hybrid infrastructure that are also environmentally sustainable.

Keywords: Natural disasters, concrete, infrastructure, Panama, sustainability.

Resumen

Las actividades antropogénicas son los principales emisores de gases de efecto invernadero que impulsan el cambio climático intensificando la aparición de fenómenos meteorológicos

extremos que desencadenan un mayor número de eventos de inundaciones, deslizamiento, vientos fuertes y el aumento del nivel del mar. En este contexto, la infraestructura desempeña un papel fundamental para la protección de las comunidades con infraestructuras que contribuyan a la resiliencia como las infraestructuras verdes, grises e híbridas. Por un lado, la infraestructura gris se enfoca en el uso de estructuras duras construidas con concreto para garantizar las propiedades de durabilidad y resistencia mientras que la infraestructura verde e híbrida incorpora soluciones basadas en la naturaleza para mitigar los efectos adversos del cambio climático. A través de la identificación de los desastres naturales más agravantes en Panamá y una revisión de la bibliografía, este documento explora las alternativas para la resiliencia de las comunidades frente a los eventos del cambio climático con el uso de infraestructura verde, gris e híbrida que a su vez sean sostenibles ambientalmente.

Palabras claves: desastres naturales, hormigón, infraestructura, Panamá, sostenibilidad.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático puede deberse a diversos procesos naturales, sin embargo, las actividades humanas son una de las principales causas de este fenómeno a través de emisiones de gases de efecto invernadero. El cambio climático altera los patrones meteorológicos que desencadenan deslizamientos de tierra, huracanes, tornados, inundaciones, aumento del nivel de mar, entre otros efectos; y tiene un impacto significativo en las comunidades tanto urbanas como rurales causando daños en las infraestructuras, pérdidas económicas y el desplazamiento de poblaciones.

Existen diversos tipos de estructuras que pueden contribuir a crear resiliencia frente a estos eventos como las infraestructuras grises basadas en el uso de hormigón, las infraestructuras verdes basadas en la naturaleza y una combinación de ambas conocida como infraestructura híbrida (Fig. 1). Todas estas soluciones abren paso a enfrentar los desafíos del cambio climático fortaleciendo la resiliencia y protección de las comunidades, especialmente las más vulnerables en distintas regiones de Panamá.

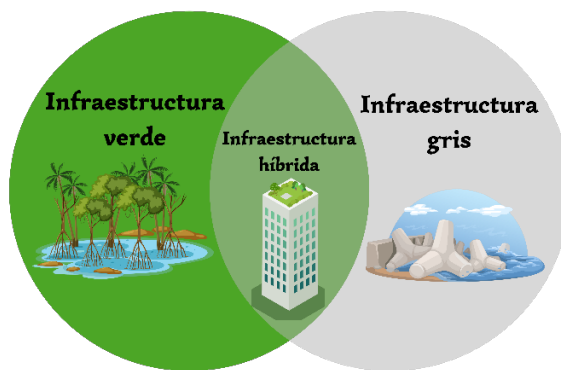


Fig. 1. Tipos de infraestructura: verde (soluciones basadas en la naturaleza), gris (obras de ingeniería tradicional) e híbrida (combina elementos de ambas para una gestión sostenible).

En este sentido, el objetivo de este estudio es explorar alternativas para la resiliencia de las comunidades frente a eventos del cambio climático, incluyendo el uso de estructuras verdes, estructuras grises e híbridas que a su vez sean sostenibles ambientalmente.

2. MÉTODO

Como primer paso, se han identificado los principales riesgos ambientales relacionados con el cambio climático en Panamá a través de los datos proporcionado por los mapa interactivos del proyecto Panamá Hub Resiliente del Georgia Tech Panama Logistics Innovation & Research Center [1] y el Atlas de Riesgos Climático de Panamá del Ministerio de Ambiente que brinda una proyección al 2050 de las zonas con inundación costera permanente [2]. Se realizó una revisión de la literatura en materia de construcción evaluando los documentos existentes en el uso del hormigón y las alternativas innovadoras de construcciones que utilizan la naturaleza para la protección y resiliencia de las comunidades. La base de datos utilizada para esta revisión fue Science Direct y Google Scholar y se seleccionaron los artículos científicos publicados que contienen una combinación de palabras clave apoyada por el operador booleano AND.

3. RESULTADOS

En Panamá, los principales riesgos ambientales incluyen inundación costera permanente asociada al aumento del nivel del mar, los deslizamientos, incendios e inundaciones de diferentes comunidades. La provincia de Panamá y Colón son las más afectadas por estos desastres naturales, sin embargo, no se consideran las zonas más vulnerables del país. En contraste, las regiones de Bocas del Toro, comarca Ngobe-Buglé, norte de Veraguas, suroeste de Darién, entre otros, son las más vulnerables.



Fig. 2. Mapa de inundación costera permanente (escenario SSP5-8.5 IPCC) y los desastres naturales con mayor frecuencia en Panamá. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos [1], [2].

Estos fenómenos causan grandes impactos en la infraestructura construida, por lo que existe una necesidad urgente de generar esfuerzo en materia de mitigación con la construcción de estructuras sólidas y que tengan la capacidad de adaptarse a las condiciones cambiantes. El uso del hormigón en la construcción tiene beneficios claves como la resistencia, durabilidad, bajo costo con relación a otros materiales de construcción, sin embargo, plantea desafíos como el aumento de la escorrentía superficial.

A. Infraestructura gris

Hormigón permeable

Se trata de un hormigón permeable que permite la infiltración del agua en el suelo y por ende la recarga en aguas subterráneas, a través de su estructura porosa reduciendo la escorrentía superficial. Contribuye no solo con la reducción del riesgo de inundaciones, sino, además, puede mitigar el efecto de la isla de calor. Este puede ser mezclado con áridos reciclados y polímeros, cenizas volantes, humo de sílice, favoreciendo la disminución del impacto ambiental que genera la construcción con hormigón. Sin embargo, se encuentra limitada por una menor resistencia que las infraestructuras convencionales, por lo que su uso es recomendable en aceras, parqueaderos, parques recreativos, calles residenciales y proyectos similares [3].

Casas elevadas

Son especialmente estratégicas en zonas costeras propensas a inundaciones, ofreciendo protección y permitiendo que el agua fluya por debajo de las viviendas generando la capacidad de adaptarse al cambio climático soportando las inundaciones. Sin embargo, los tomadores de decisiones requieren orientación para evaluar el impacto en la vulnerabilidad

de las inundaciones, ya que los niveles de riesgo asociados a amenazas de inundación aumentarán constantemente [4].

B. Infraestructura verde

La mayoría de los estudios se centran en la infraestructura verde para la gestión de las aguas pluviales, servicios ecosistémicos, la protección de la biodiversidad y el cambio climático.

Humedales

Panamá ha perdido un gran porcentaje de sus manglares que tienen un gran potencial de secuestro y almacenamiento de CO₂ además de ser refugio de diversas especies que, a su vez, algunas son especies muy valiosas para las comunidades pesqueras. Además, juegan un papel importante como infraestructura de protección costera como barrera natural que amortigua la energía de las olas y las tormentas a través de su compleja red de raíces disipando hasta un 60% de la energía, todo esto sin comprometer la conectividad ecológica.

Espacios verdes

Sirve de infraestructura para la resiliencia de las ciudades, mitigando los efectos del cambio climático con la disminución del riesgo de inundaciones porque favorecen la infiltración del agua, actúan como reguladores térmicos reduciendo el efecto de la isla de calor urbano, y brindan otros servicios ecosistémicos como la purificación del aire y espacios para la recreación. Sin embargo, debe ir acompañada de una plantación gestionada que se adapte a las condiciones y necesidades locales.

C. Infraestructura híbrida

Arrecifes artificiales

El aumento del nivel del mar, los eventos meteorológicos extremos y la presión antropológica hacen que las comunidades costeras sean más vulnerables a los efectos del cambio climático. Los arrecifes artificiales representan una herramienta valiosa que aporta beneficios a las comunidades costeras atenuando la energía del oleaje y permitiendo que las costas se vean menos afectadas por la erosión. Se debe prestar mucha atención a los materiales utilizados para una adecuada colonización de las especies [6], [7] y la geometría con la que son diseñados para aumentar su rendimiento de disipación de energía [8]. Adicionalmente, se puede aprovechar otras tecnologías como la impresión en 3D para su elaboración de arrecifes de corales artificiales reduciendo así costos de producción, el desperdicio de material, las emisiones producidas por el transporte y facilita la elaboración de arrecifes estructuras complejas tratando así de simular los esqueletos de los corales.

Techos verdes

Entre sus diferentes beneficios destacan la regulación de la temperatura, ya que tienen el potencial de reducir la temperatura circundante hasta 3°C y el control de la escorrentía

superficial [9]. En países como Panamá, con abundante precipitación y alta humedad, los techos verdes requerirán mantenimiento como el deshierbe y monitoreo para detectar enfermedades en las plantas. Sin embargo, los costos elevados, mantenimiento constante y la falta de planes que fomenten su adopción son algunos de los obstáculos que dificultan su implementación.

D. Limitaciones y ventajas

Si bien es cierto, las infraestructura verde aunque aporta un importante hábitat para la biodiversidad, contribuye significativamente con el secuestro y almacenamiento de carbono (especialmente los humedales y bosques), su costo es menor que las infraestructura gris y brindan servicios ecosistémicos, también enfrentan ciertos desafíos por la falta de conocimiento sobre como el diseño afecta la dinámica de los sedimentos en los entornos costeros, no son estrategias estandarizadas además de existir poca información disponible sobre su eficacia, son algunas de las razón que complican su implementación.

Por su parte, la infraestructura gris a sido a través de los años, una de las fuentes más confiables para la protección de las cosas gracias a sus excelentes propiedades mecánicas de resistencia y durabilidad, además de adquirir solidez inmediatamente luego de su construcción, sin embargo, no tiene la capacidad de adaptarse a las condiciones cambiantes, impiden el crecimiento de la vegetación, rompe la conectividad ecológica, aumenta la escorrentía superficial que desencadena en un mayor número de eventos de inundaciones y algunos de los materiales por lo que está compuesto contribuye significativamente a la emisión de gases como el CO₂.

Algunas de estas limitaciones pueden ser solventadas parcialmente con la inclusión de la infraestructura híbrida. Presenta una sinergia de la infraestructura verde y gris reduciendo los costos de construcción y la extracción de materia prima al mismo tiempo que aumentan la confiabilidad y resiliencia, pero su implementación requiere de métricas detalladas de diseño al igual que planes, políticas y financiamiento para lograr que sean llevadas a cabo. En este sentido, el sector de la gobernanza debe prestar especial atención a implementar planes y políticas que incluyan las soluciones basadas en la naturaleza para enfrentar los desafíos del cambio climático creando ciudades más resilientes y sostenibles debido a que Panamá está mayormente enfocada en la construcción con ingeniería convencional, es decir, infraestructura gris.

4. CONCLUSIONES

Tanto las infraestructuras verdes y grises presentan desafíos en su implementación. Por su parte, las estructuras verdes no son estandarizadas, es decir, su aplicación requiere de una evaluación rigurosa para que puedan ser puestas en práctica tomando en cuenta aspectos sociales, ambientales y económicos. Por otro lado, las estructuras grises tienden a ser más costosas y requieren de mantenimiento constante, además, pueden alterar los hábitats naturales y la dinámica costera.

Las infraestructuras híbridas aprovechan los poderes regenerativos de la naturaleza y la resiliencia estructural de la ingeniería convencional para crear sinergia entre los dos tipos de estructuras, aumentando la capacidad de resiliencia de las comunidades mayormente afectadas por los efectos del cambio climático. Estructuras como los techos verdes, pavimentos de hormigón permeable, espacios verdes y la reforestación pueden ayudar a reducir las temperaturas y el riesgo de inundaciones; los arrecifes artificiales y la reforestación de humedales costeros ayudan a mitigar la erosión costera causada por la energía de las olas.

Referencias

- [1] Georgia Tech Panama, «Panamá Hub Resiliente - Mapa riesgos ambientales». Accedido: 22 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://resilienciamapa.gatech.pa/ambiente>
- [2] Ministerio de Ambiente, «Climate Risk Atlas of Panama». [En línea]. Disponible en: <https://atlasderiesgoclimatico.miambiente.gob.pa/atlas>
- [3] J. Nilimaa, «Smart materials and technologies for sustainable concrete construction», *Developments in the Built Environment*, vol. 15, p. 100177, oct. 2023, doi: 10.1016/j.dibe.2023.100177.
- [4] N. K. Mohammad et al., «Rising Above the Waters: Pioneering Flood Resilient Housing Development Strategies», *BEJ*, vol. 22, pp. 102-121, 2025, doi: 10.24191/bej.v22iSI.6495.
- [5] X. Xu, J. J. O'Sullivan, S. Abolfathi, J. Keenahan, J. M. Pearson, y M. Salauddin, «Advances in understanding the challenges and opportunities of hybrid sea defence approaches for coastal resilience», *Environmental Challenges*, vol. 19, p. 101130, jun. 2025, doi: 10.1016/j.envc.2025.101130.
- [6] M. Rupasinghe, R. S. Nicolas, B. S. Lanham, y R. L. Morris, «Sustainable oyster shell incorporated artificial reef concrete for living shorelines», *Construction and Building Materials*, vol. 410, p. 134217, ene. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134217.
- [7] X. Huang, Z. Wang, Y. Liu, W. Hu, y W. Ni, «On the use of blast furnace slag and steel slag in the preparation of green artificial reef concrete», *Construction and Building Materials*, vol. 112, pp. 241-246, jun. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.088.
- [8] B. K. Norris et al., «Designing modular, artificial reefs for both coastal defense and coral restoration», *Coastal Engineering*, vol. 199, p. 104742, jun. 2025, doi: 10.1016/j.coastaleng.2025.104742.
- [9] J. Langemeyer, D. Wedgwood, T. McPhearson, F. Baró, A. L. Madsen, y D. N. Barton, «Creating urban green infrastructure where it is needed – A spatial ecosystem service-based decision analysis of green roofs in Barcelona», *Science of The Total Environment*, vol. 707, p. 135487, mar. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135487.

Autorización y Licencia CC

Los autores autorizan a APANAC XVIII a publicar el artículo en las actas de la conferencia en Acceso Abierto (Open Access) en diversos formatos digitales (PDF, HTML, EPUB) e integrarlos en diversas plataformas online como repositorios y bases de datos bajo la licencia CC:

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

Ni APANAC XVIII ni los editores son responsables ni del contenido ni de las implicaciones de lo expresado en el artículo.