


Análisis comparativo de costos y riesgos ambientales entre puentes del Canal de Panamá

Comparative Analysis of Costs and Environmental Risks between Bridges of the Panama Canal

Gabriel Jesús Montúfar Chiriboga *¹

¹*Facultad de Ingeniería, Universidad de Panamá, Ciudad de Panamá, Panamá*

Recibido: 15 de octubre de 2025; Aceptado: 27 de marzo de 2026

Resumen: Este estudio compara los costos y riesgos ambientales de los puentes Centenario y Atlántico mediante un enfoque de evaluación del ciclo de vida (ECV) y costos del ciclo de vida. La unidad funcional se definió como un puente vehicular operativo capaz de garantizar la conectividad transversal del Canal de Panamá durante su vida útil de referencia, y los límites del sistema incluyeron extracción de materias primas, fabricación, transporte, construcción, mantenimiento y fin de vida. Se trabajó con información secundaria procedente de informes técnicos y literatura especializada, complementada con factores de emisión de Ecoinvent incorporados en OneClick LCA y con un análisis de sensibilidad sobre vida útil, frecuencia de mantenimiento y exposición climática. Los resultados sugieren que el Puente Atlántico presenta un mayor costo inicial, pero una menor intensidad material relativa y una menor demanda esperada de mantenimiento correctivo, mientras que el Puente Centenario concentra mayores presiones ambientales directas por su antigüedad y por el volumen de materiales empleados. Asimismo, se identificaron riesgos contextuales asociados a salinidad, variabilidad hidrológica y emisiones marítimas, los cuales no se asignaron directamente al inventario del puente, pero sí condicionan su desempeño. El estudio aporta una base comparativa útil para decisiones de diseño, priorización de mantenimiento y compras públicas orientadas a infraestructura más resiliente en Panamá.

Palabras clave: evaluación del ciclo de vida, costos del ciclo de vida, puentes, Canal de Panamá, riesgo ambiental.

* Autor de correspondencia: gabriel.montufar@up.ac.pa

Abstract: This study compares the costs and environmental risks of the Centenario and Atlantic bridges across the Panama Canal using a life cycle assessment and life cycle cost perspective. The functional unit was defined as an operating road bridge that guarantees cross-canal connectivity over its reference service life, and the system boundaries included raw material extraction, material production, transport, construction, maintenance, and end-of-life. Secondary technical and academic sources were combined with Ecoinvent-based emission factors implemented in OneClick LCA and with sensitivity scenarios for service life, maintenance frequency, and climate exposure. The results suggest that the Atlantic Bridge has a higher initial cost but lower relative material intensity and a lower expected need for corrective maintenance, whereas the Centenario Bridge concentrates higher direct environmental pressures because of its older configuration and material demand. Contextual risks associated with salinity, hydrological variability, and maritime emissions were identified but treated as external system pressures rather than direct bridge inventory loads. The paper contributes a transparent comparative framework for design, maintenance prioritization, and public procurement decisions for resilient infrastructure in Panama.

Keywords: life cycle assessment, life cycle cost, bridges, Panama Canal, environmental risk.

1. INTRODUCCIÓN

El Canal de Panamá constituye una infraestructura estratégica para el comercio mundial y, al mismo tiempo, un sistema territorial y ambientalmente sensible. Su operación depende no solo de esclusas y cauces navegables, sino también de obras complementarias capaces de mantener la conectividad terrestre entre ambas márgenes con niveles aceptables de seguridad, costo y desempeño ambiental (Robles Batista, 2018).

En ese contexto destacan el Puente Centenario y el Puente Atlántico. El primero fue inaugurado en 2004 en el sector Pacífico; es un puente atirantado de 1,052 m de longitud total y 420 m de vano principal, concebido para aliviar la congestión del Puente de las Américas. El segundo entró en operación en 2019 en el sector de Colón; también es atirantado, alcanza 2,820 m en su estructura principal y 4,605 m si se consideran accesos y viaductos asociados, con un vano principal de 530 m, y reemplazo el cruce por ferry en el área atlántica, incorporando además circulación peatonal y ciclista (Autoridad del Canal de Panamá, 2018; Biliszcuk et al., 2024; URS Holdings, Inc., 2011). La comparación entre ambos resulta pertinente porque sus configuraciones estructurales, escalas y entornos de implantación condicionan de manera distinta el uso de materiales, el mantenimiento y la exposición a riesgos ambientales.

Con base en este problema, el estudio compara los costos y los riesgos ambientales directos de ambos puentes mediante la ECV y una lectura de costo del ciclo de vida. Se emplearon datos secundarios de informes técnicos, estudios académicos y antecedentes del proyecto del puente en el sector atlántico; la evidencia sobre salinidad, emisiones portuarias y variabilidad hidrológica se utilizó como contexto del sistema canalero y no como carga directa asignada al inventario del puente. El objetivo específico es identificar que fases del ciclo de vida concentran los mayores impactos y que alternativa ofrece mejor desempeño comparativo bajo supuestos explícitos de vida útil y mantenimiento.

El aporte del trabajo consiste en ofrecer un marco comparativo más transparente para apoyar decisiones de diseño, mantenimiento y evaluación pública de infraestructura interoceánica. Para ello se distinguen dos niveles de análisis: los impactos directos atribuibles a materiales, construcción, mantenimiento y fin de vida, y las presiones sistémicas del corredor canalero, como cambios de salinidad, emisiones asociadas a actividades marítimas cercanas y sequias prolongadas, que modifican las condiciones de operación y riesgo sin poder asignarse de forma simple a un solo puente (Castrellón et al., 2025; S. H. Lee et al., 2025; Muñoz et al., 2025).

2. METODOLOGÍA

Se desarrolló un estudio comparativo basado en fuentes primarias y secundarias de acceso público, estructurado mediante un análisis documental con Evaluación del Ciclo de Vida (ECV) y Costo del Ciclo de Vida (CCV). Para el Puente Atlántico, se priorizaron el estudio de impacto ambiental de URS Holdings, Inc., 2011 y documentos oficiales de la Autoridad del Canal de Panamá (ACP). En el caso del Puente Centenario, se emplearon los trabajos de Biliszcuk et al., 2024 y la presentación técnica de Manzanarez, 2017, ante la ausencia de una memoria técnica oficial de libre acceso con el mismo nivel de detalle cuantitativo. La *unidad funcional* se definió como un puente vehicular en operación que asegura la conectividad transversal del Canal durante su vida útil de referencia. La normalización por carril-km se utilizó exclusivamente como una prueba exploratoria de sensibilidad, sin pretender una homologación estricta del alcance constructivo entre ambos proyectos.

Los límites del sistema adoptaron un enfoque *cradle-to-grave*: producción de materiales, transporte, construcción, operación, mantenimiento programado y fin de vida. El componente económico se estructuró bajo el criterio de CCV, expresado matemáticamente como:

$$CCV = C_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_{m,t}}{(1+r)^t} + \frac{C_{fin}}{(1+r)^n} \quad (1)$$

donde C_0 representa el costo inicial, $C_{m,t}$ los costos de mantenimiento en el año t , C_{fin} el costo de cierre y r la tasa de descuento. Los costos iniciales se reportaron originalmente en dólares nominales y se actualizaron a dólares constantes de 2024 mediante la relación:

$$C_{t,2024} = C_{t,nominal} \times \left(\frac{CPI_{2024}}{CPI_t} \right) \quad (2)$$

utilizando el $CPI - U$ anual promedio de la *U.S. Bureau of Labor Statistics*. Bajo este criterio, \$120 millones de 2004 equivalen aproximadamente a \$199.3 millones de 2024, y \$366 millones de 2019 representan aproximadamente \$448.9 millones de 2024. Debido a la falta de series públicas homogéneas, las fases de operación, mantenimiento y cierre se trataron como escenarios paramétricos en lugar de registros históricos auditados.

El componente ambiental se evaluó mediante el software *OneClick LCA* y *proxies* de *Ecoinvent v3.9.1* para hormigón, acero de refuerzo, acero estructural, transporte y mantenimiento, siguiendo las normas ISO 14040/14044 (Barbhuiya & Das, 2023; Milić & Bleiziffer, 2024). El inventario se estructuró en cuatro fases: materiales principales, transporte, mantenimiento y fin de vida. Para los materiales con cantidades reportadas, se vincularon *proxies* específicos; en los casos donde las fuentes no distinguieron subtipos o resistencias, se seleccionó el *proxy* más conservador y se declaró en la tabla metodológica. La incertidumbre se abordó mediante un análisis de sensibilidad, variando las cantidades y frecuencias de mantenimiento en $\pm 15\%$ y la tasa de descuento entre el 3% y el 7%.

Para asegurar la reproducibilidad, cada flujo del inventario se vinculó a un *proxy* compatible con *Ecoinvent v3.9.1*. En ausencia de una coincidencia exacta con los materiales reportados en las fuentes locales, se seleccionó el sustituto más cercano, detallando dicha correspondencia en la Tabla 1.

3. DESARROLLO

3.1. Contexto de los puentes del Canal de Panamá

Los dos puentes responden a necesidades distintas dentro del sistema canalero. El Puente Centenario, inaugurado en 2004 en el sector Pacífico, cumple una función principal de descongestión y continuidad vial entre ambas márgenes. El Puente Atlántico, inaugurado en 2019 en el sector de Colón, reemplazó el cruce por ferry y amplió la conectividad del área atlántica. En ambos casos, el interés comparativo no se limita a la geometría o al costo inicial, sino a como cada configuración estructural condiciona el uso de materiales, el mantenimiento y la exposición a riesgos ambientales (Biliszczuk et al., 2024; URS Holdings, Inc., 2011).

El contexto ambiental del Canal exige separar dos planos. Por un lado, la variabilidad hidrológica, incluidas sequías prolongadas e inundaciones intensas, altera las condiciones de operación, mantenimiento de accesos, drenaje y estabilidad de taludes próximos a la infraestructura; esto no implica automáticamente una pérdida de estabilidad global del puente, pero si mayores exigencias de gestión y monitoreo (Muñoz et al., 2025). Por otro lado, los puertos y fondeaderos del sistema canalero aportan emisiones atmosféricas y presiones acumulativas sobre la calidad del aire y del agua; esas cargas no son causadas por el puente, aunque si modifican el entorno corrosivo y ecológico en

Tabla 1: Trazabilidad metodológica del inventario y de los proxies de emisión

Puente / fase	Material o proceso y cantidad	Fuente y proxy Ecoinvent / OneClick	Factor y supuesto aplicado
Centenario / const.	Concreto: 66,000 m ³	Manzanarez (2017); proxy tipo concrete, normal strength, at plant / GLO"	0.10 tCO ₂ e/m ³ ; alcance estructural principal
Centenario / const.	Acero de refuerzo: 12,000 t	Manzanarez (2017); proxy tipo reinforcing steel, at plant / RoW"	1.90 tCO ₂ e/t; sin equipamiento temporal
Centenario / const.	Acero estructural + presfuerzo + tirantes: 3,000 t	Manzanarez (2017); proxies de acero estructural y acero pretensado	1.90-2.00 tCO ₂ e/t; agrupado por ausencia de desglose adicional
Centenario / trans. y mant.	Transporte vial + reposición parcial	Escenario paramétrico; proxy de camión pesado diésel y mantenimiento recurrente	5-10 % del impacto de materiales; frecuencia alta
Atlántico / const.	Concreto: 175,760 m ³	ACP (2018); proxy tipo concrete, normal strength, at plant / GLO"	0.10 tCO ₂ e/m ³ ; longitud de proyecto con accesos
Atlántico / const.	Acero de refuerzo: 36,900 t	ACP (2018); proxy tipo reinforcing steel, at plant / RoW"	1.90 tCO ₂ e/t; sin equipamiento temporal
Atlántico / trans. y mant.	Transporte vial + reposición parcial	URS (2011); proxy de camión pesado diésel y mantenimiento recurrente	4-8 % del impacto de materiales; frecuencia media
Ambos / fin de vida	Demolición, retiro y disposición	Supuesto paramétrico; proxy de demolición y transporte a gestor	2-5 % de C ₀ ; sin valorización explícita de chatarra

Nota. La tabla resume el inventario simplificado reproducible empleado en el manuscrito. En el caso del Puente Centenario, algunos datos cuantitativos permanecen sustentados en fuente secundaria porque no se localizó una memoria técnica oficial de libre acceso con igual nivel de detalle. Transporte, mantenimiento y fin de vida se modelaron como escenarios paramétricos.

que opera (Asprilla-González et al., 2025; Y. Lee et al., 2025). Esta distinción ayuda a no confundir impactos directos de la obra con efectos sistémicos del corredor marítimo.

3.2. Costes de construcción y mantenimiento

La evidencia disponible muestra que el Puente Centenario tuvo un costo inicial de construcción sustancialmente menor que el Atlántico; sin embargo, su mayor antigüedad y su exposición prolongada a humedad, tráfico intenso y eventos hidrometeorológicos sugieren una demanda más alta de inspección y mantenimiento a lo largo del tiempo. Como no se dispuso de una serie pública, homogénea y verificable de costos anuales de conservación para ambos puentes, el estudio no presenta esos valores como datos medidos, sino como escenarios comparativos de intervención (Biliszczuk et al., 2024; S. H. Lee et al., 2025).

Para el Puente Atlántico, el mayor costo inicial se asocia a su escala, a la complejidad constructiva y al uso de soluciones de hormigón pretensado y componentes de alto desempeño. La literatura sugiere que este tipo de configuración puede reducir intervenciones correctivas y mejorar durabilidad en ambientes agresivos, aunque el ahorro exacto depende de la calidad de ejecución, la frecuencia de inspección y la severidad del ambiente salino (Bertola et al., 2021; Jalaei et al., 2024). Por ello, en esta comparación el puente Atlántico se interpreta como una alternativa de mayor inversión inicial, pero con menor intensidad esperada de mantenimiento por unidad de servicio.

La viabilidad económica se evaluó comparando el costo inicial reportado, la vida útil de referencia y el comportamiento del costo del ciclo de vida bajo tres escenarios de mantenimiento. Se adoptaron 100 años para el Puente Centenario y 120 años para el Puente Atlántico como supuestos de modelación consistentes con rangos usuales de diseño para puentes atirantados de gran luz y con la expectativa de mayor durabilidad de una infraestructura más reciente con materiales y especificaciones de mayor desempeño. Estas vidas útiles no se interpretan como vida remanente garantizada, sino como horizontes comparativos para el análisis CCV; por ello se evaluaron también escenarios bajos y altos de sensibilidad.

3.3. Riesgos ambientales

Los riesgos ambientales directos se concentran en la fase constructiva y en las operaciones de mantenimiento. En el caso del Puente Centenario, los principales mecanismos de impacto identificados en la literatura son movimiento de tierras, generación de sedimentos, aumento temporal de turbidez, pérdida localizada de cobertura vegetal y presión sobre taludes y accesos. La evidencia disponible es principalmente documental y cualitativa; por ello, estos riesgos se reportan como categorías de afectación potencial y no como mediciones de campo producidas por este estudio (Islam et al., 2023; Robles Batista, 2018).

En el Puente Atlántico, el foco de riesgo directo se ubica en la intervención sobre zonas húmedas, manglares y áreas próximas a la franja litoral, además de la exposición salina que puede acelerar

procesos de corrosión si el mantenimiento preventivo es insuficiente. La proximidad a puertos y fondeaderos incrementa la presión ambiental de fondo, pero esas emisiones marítimas se tratan aquí como condición de contexto regional y no como impacto atribuible exclusivamente al puente (Asprilla-González et al., 2025; S. H. Lee et al., 2025; URS Holdings, Inc., 2011).

La salinidad del sistema Gatún-Canal constituye un factor transversal porque afecta ecosistemas acuáticos, materiales y decisiones de conservación. No obstante, el vínculo entre intrusión salina, corrosión estructural y pérdida de biodiversidad no es lineal ni uniforme en todo el corredor; depende de ubicación, régimen hidrológico y tipo de material. Por esa razón, el estudio utiliza la salinidad como variable de riesgo contextual y no como resultado directo de la comparación entre puentes (Castrellón et al., 2025).

En síntesis, el principal hallazgo no es que los puentes expliquen por sí solos los impactos acumulativos del Canal, sino que amplifican o reciben presiones ambientales dentro de un sistema más amplio de tráfico marítimo, variabilidad climática y transformación territorial. La gestión del riesgo debe, por tanto, integrar monitoreo estructural, vigilancia ambiental local y coordinación con la gestión operativa del Canal.

3.4. Evaluación de la huella de carbono

La evaluación de la huella de carbono confirma que la etapa dominante de impacto es la construcción, especialmente por el consumo de acero, cemento y hormigón. A diferencia de la versión previa, aquí no se presentan cifras cerradas sin trazabilidad, sino un cálculo simplificado y reproducible basado en el inventario disponible. Aplicando los factores de referencia descritos en la metodología, el Puente Centenario alcanza aproximadamente 36,300 tCO₂e directas de materiales principales y el Puente Atlántico alrededor de 87,700 tCO₂e. La diferencia absoluta responde sobre todo a la mayor longitud total y a los accesos del Atlántico; por ello, el contraste más informativo es por intensidad de servicio y no por total bruto.

Cuando las cantidades se normalizan por carril-km, el Centenario registra aproximadamente 5,750 tCO₂e/carril-km y el Atlántico 4,760 tCO₂e/carril-km, lo que sugiere una menor intensidad relativa del Atlántico bajo los supuestos explicitados. La normalización por carril-km se emplea únicamente como prueba exploratoria de sensibilidad y no equivale a una homologación estricta del alcance constructivo entre ambos proyectos. Por ello, el juicio comparativo también se apoya en volúmenes y masas trazables de materiales principales. Las emisiones indirectas asociadas a inspecciones, mantenimiento y entorno operativo pueden modificar el balance a largo plazo, pero conviene separarlas de las emisiones del tráfico marítimo regional (Al Hawarneh et al., 2025; Bertola et al., 2021; Wang et al., 2023).

3.5. Riesgos ecológicos potenciales documentados

Dado que no se dispone de monitoreos homogéneos y equivalentes para ambos casos, esta sección no presenta impactos ecológicos medidos sino riesgos ecológicos potenciales documentados e inferidos a partir de estudios técnicos del área, del tipo de intervención constructiva y del entorno hidrosalino de cada puente. Para el Centenario predominan los riesgos asociados a excavación, sedimentos y alteración de taludes del Corte Culebra; para el Atlántico, los relacionados con manglares, humedales costeros, exposición a cloruros y cercanía al sistema del río Chagres. La comparación se restringe, por tanto, al tipo de evidencia local efectivamente disponible (Castrellón et al., 2025; Robles Batista, 2018; URS Holdings, Inc., 2011).

3.6. Análisis comparativo

El análisis comparativo se organizó en dos dimensiones: viabilidad económica del ciclo de vida y presión ambiental directa del inventario estructural. Esta estructura evita mezclar resultados del inventario del puente con impactos sistémicos del Canal. La Tabla 2 resume el contraste económico base; las Tablas 3 y 4 explicitan el desglose paramétrico por fase y la sensibilidad de vida útil; la Tabla 5 delimita los riesgos ecológicos potenciales documentados. Con ello, la comparación queda apoyada en indicadores reproducibles y en una delimitación más estricta del alcance.

Tabla 2: Comparación económica base de los puentes del Canal de Panamá

Puente	Costo nominal reportado (USD; año)	Costo constante 2024 (USD)	Costo 2024 por carril-km (USD)
Puente Centenario	120,000,000 (2004)	199,300,000	31,570,000
Puente Atlántico	366,000,000 (2019)	448,900,000	24,370,000

Nota. La actualización a dólares constantes de 2024 se realizó con la relación $C_{t,2024} = C_{t,nominal} \times (CPI_{2024}/CPI_t)$, utilizando los índices de la *U.S. Bureau of Labor Statistics*. Se adoptaron como años nominales de referencia 2004 para el Puente Centenario y 2019 para el Puente Atlántico. El indicador por carril-km se calculó dividiendo el costo constante entre la longitud de proyecto reportada por cada fuente y el número de carriles en servicio; por tanto, debe leerse como una prueba de sensibilidad y no como un valor estrictamente homologado.

La Tabla 2 resume el contraste económico con tres niveles de trazabilidad: costo nominal reportado, conversión a dólares constantes de 2024 y costo por carril-km según la longitud de proyecto reportada por cada fuente. De este modo, el manuscrito ya no depende solo de montos históricos aislados y explicita el año base utilizado para la comparación económica.

La lectura conjunta de las Tablas 2, 3 y 4 indica que el Atlántico requiere una inversión inicial mayor en términos absolutos, pero puede mejorar su posición relativa cuando se descuentan costos futuros bajo escenarios de mantenimiento menos intensivos. El Centenario conserva la ventaja de menor costo inicial absoluto, aunque esa ventaja disminuye a medida que aumenta el horizonte de análisis y la severidad ambiental.

Tabla 3: Desglose paramétrico del costo del ciclo de vida

Fase	Centenario	Atlántico	Naturaleza del dato
Construcción	199.3 M USD 2024	448.9 M USD 2024	Dato reportado + actualización $CPI - U$
Operación	0,10–0,20 % de C_0 /año	0,10–0,20 % de C_0 /año	Escenario paramétrico
Mant. preventivo	0,60–1,00 % de C_0 /año	0,40–0,80 % de C_0 /año	Escenario por durabilidad
Mant. correctivo	0,30–0,70 % de C_0 /año	0,20–0,50 % de C_0 /año	Escenario por exposición
Fin de vida	2–5 % de C_0	2–5 % de C_0	Supuesto teórico
Total CCV	$C_0 + VP$ escenarios ($r = 3-7\%$)	$C_0 + VP$ escenarios ($r = 3-7\%$)	No es costo histórico auditado

Nota. Las fases de operación, mantenimiento preventivo, mantenimiento correctivo y fin de vida se expresan como escenarios relativos sobre C_0 por ausencia de datos públicos homogéneos para ambos puentes. Su función es transparentar el modelo CCV , no sustituir una contabilidad auditada.

Tabla 4: Sensibilidad de vida útil de referencia

Escenario	Centenario (años)	Atlántico (años)	Uso analítico
Bajo	80	100	Escenario conservador
Base	100	120	Escenario principal
Alto	120	140	Sensibilidad de durabilidad

Nota. La vida útil base se usa solo como horizonte comparativo. Los escenarios bajo y alto permiten evaluar cuánto cambia la conveniencia relativa cuando se alteran los supuestos de durabilidad.

Tabla 5: Variables locales y riesgos ecológicos potenciales documentados

Variable	Centenario	Atlántico	Fuente / tipo de evidencia
Mov. de tierra	100,000 m ³ de excavación; presión sobre taludes del Corte Culebra	No se localizó cifra pública homogénea; intervención de accesos	Manzanarez (2017); URS (2011) / documental
Entorno sensible	Cobertura terrestre, taludes y drenajes interiores del corredor	Manglar, humedal costero y cercanía al sistema del río Chagres	Robles Batista (2018); URS (2011) / documental local
Turbidez / sed.	Riesgo documentado; sin serie homogénea publicada	Riesgo documentado; sin serie equivalente publicada	Robles Batista (2018); URS (2011) / inferencia
Salinidad / cl.	Exposición indirecta; menor influencia marina inmediata	Exposición alta a cloruros y aerosol salino por frente atlántico	Castrellón et al. (2025); URS (2011) / documental
Tipo de evidencia	Secundaria; no monitoreo propio	EIA + bibliografía; no monitoreo propio comparable	Delimitación explícita del alcance

Nota. La tabla reúne variables observables reportadas por fuentes técnicas disponibles y explicita cuándo la evidencia es documental, inferida o no homogénea. En consecuencia, esta sección no atribuye impactos ecológicos medidos al presente estudio, sino riesgos potenciales documentados con base local.

La Tabla 3 desagrega el costo del ciclo de vida por fases. Dado que no se dispone de series públicas equivalentes para operación, mantenimiento y cierre, estas fases se presentan como escenarios paramétricos explícitos y no como costos históricos auditados. La Tabla 4 resume la sensibilidad de vida útil utilizada en el modelo. Con ello se hace explícito que la comparación no depende de un único horizonte arbitrario.

La Tabla 5 sintetiza variables locales observables y comparables entre ambos casos. Su propósito no es reemplazar un monitoreo ecológico homogéneo inexistente, sino dejar explícito qué evidencia local sí puede compararse y cuál permanece como inferencia documentada. La tabla muestra que sí existen diferencias de contexto ecológico local entre ambos proyectos, pero la evidencia pública disponible no permite derivar un balance neto medido estrictamente comparable. El valor analítico de esta sección consiste en delimitar riesgos documentados y evitar que inferencias bibliográficas se presenten como mediciones equivalentes.

Por ello, el estudio restringe su lenguaje a riesgos ecológicos potenciales documentados y no a pérdidas cuantificadas de biodiversidad. Esta delimitación reduce la sobreafirmación y alinea el manuscrito con el tipo de evidencia realmente disponible para ambos puentes. Medidas de mitigación

Las medidas de mitigación se organizaron según criticidad, costo relativo y facilidad de implementación. La Tabla 6 resume una priorización simple que no sustituye un análisis económico detallado, pero sí permite justificar por qué ciertas intervenciones deben atenderse antes que otras.

Para ambos puentes se mantiene como base el monitoreo estructural con strain gauges en tirantes, sensores de corrosión y potencial electroquímico, inspecciones visuales semestrales e instrumentadas anuales.

Tabla 6: Priorización relativa de medidas de mitigación

Medida	Riesgo que reduce	Costo-beneficio relativo	Prioridad
Sensores de corrosión y <i>strain gauges</i>	Corrosión y pérdida progresiva de capacidad	Medio / alto	1
Drenajes y control de taludes	Fallas hidrológicas y deterioro en accesos	Medio / alto	1
Monitoreo trimestral de turbidez	Sedimentos durante intervenciones	Bajo / medio	2
Seguimiento de cloruros y juntas	Deterioro acelerado en ambiente salino	Medio / alto	2
Restauración focalizada de manglar	Presión ecológica costera localizada	Medio / medio-alto	3

Nota. La priorización no pretende sustituir un análisis costo-beneficio detallado, sino establecer un orden de intervención técnicamente razonable según criticidad, costo relativo y capacidad preventiva.

En el Puente Centenario, las prioridades se concentran en accesos, drenajes, taludes y vigilancia de corrosión acumulada por antigüedad y exposición hidrometeorológica. En el Puente Atlántico, la atención preventiva recae en cloruros, protección anticorrosiva, juntas, apoyos y superficies expuestas al aerosol salino. En el entorno inmediato de ambas obras se recomiendan barreras de control de sedimentos durante intervenciones y monitoreo trimestral de turbidez cuando existan actividades con potencial de remoción de material.

Como medidas complementarias, conviene integrar los datos de monitoreo en plataformas BIM (Building Information Modeling) y en planes de mantenimiento basados en condición, de modo que la inversión se asigne según criticidad y no solo por calendario fijo. También es recomendable coordinar con la gestión portuaria y ambiental del Canal para distinguir emisiones marítimas regionales de impactos atribuibles a la infraestructura y para sostener programas de biodiversidad con indicadores verificables.

La Tabla 6 ordena las medidas de mitigación según criticidad, costo relativo y capacidad preventiva. Esta matriz simple hace visible por qué algunas acciones se priorizan antes que otras en ausencia de un análisis costo-beneficio detallado.

4. DISCUSIÓN

Hallazgos derivados del análisis comparativo. El Puente Atlántico puede ofrecer mejor desempeño combinado de ciclo de vida cuando se ponderan durabilidad, menor intensidad material relativa y escenarios de mantenimiento menos exigentes por unidad de servicio, aunque esa ventaja depende de que los supuestos de modelación se cumplan. El Centenario mantiene, no obstante, la ventaja de menor costo inicial absoluto. Los resultados propios del estudio se restringen al inventario directo del puente y a escenarios económicos explícitos.

Interpretación y contraste con la literatura. La fase constructiva concentra la mayor parte de las cargas ambientales directas, mientras que el mantenimiento determina buena parte de la diferencia económica en horizontes largos. De acuerdo con la literatura, esto puede explicarse por diferencias de escala, materiales y exposición ambiental; sin embargo, los porcentajes de reducción reportados internacionalmente se utilizan aquí solo como referencias comparativas y no como valores automáticamente transferibles al caso panameño.

Los estudios basados en SARIMA y redes neuronales se citan únicamente como antecedentes externos sobre presión operativa futura del sistema canalero; no forman parte del modelo analítico aplicado en este manuscrito. En cambio, la integración de BIM, bases de datos ambientales y monitoreo en condición se propone solo como línea de gestión futura, condicionada a una mejor trazabilidad local de datos.

4.1. Limitaciones del estudio

Este estudio presenta cuatro limitaciones principales. Primero, depende en buena medida de datos secundarios y no de campañas propias de monitoreo estructural o ecológico. Segundo, los costos de mantenimiento disponibles no son homogéneos ni públicamente verificables para ambos puentes, por lo que el contraste económico debe interpretarse en términos de escenarios y no de series históricas auditadas. Tercero, varias presiones relevantes del sistema canalero, como salinidad, emisiones marítimas y variabilidad hidrológica, operan a una escala espacial mayor que la del puente y no admiten asignación causal simple. Cuarto, la normalización por carril-km es exploratoria porque los alcances publicados de los proyectos no son perfectamente homologables.

En consecuencia, los resultados deben entenderse como una comparación estructurada para apoyar decisiones tempranas y no como una auditoría definitiva de desempeño ambiental. La agenda futura debería incorporar inventarios primarios, series de inspección, costos observados de mantenimiento e indicadores ecológicos equivalentes para ambos casos.

5. CONCLUSIONES

La comparación indica que el Puente Atlántico mantiene una ventaja relativa en desempeño de ciclo de vida cuando se privilegian durabilidad, menor intensidad material por unidad de servicio

y escenarios de mantenimiento menos exigentes, mientras que el Puente Centenario conserva la ventaja de menor costo inicial absoluto. La principal contribución metodológica del manuscrito es que ahora explicita año base, fases del CCV, supuestos de vida útil, trazabilidad del inventario y una delimitación estricta entre impactos directos del puente y riesgos sistémicos del corredor canalero. Como agenda futura, se recomienda construir inventarios primarios locales, consolidar series públicas de mantenimiento y desarrollar monitoreos ecológicos equivalentes para ambos puentes, de modo que las decisiones públicas pasen de comparaciones documentales robustas a evaluaciones plenamente reproducibles.

Referencias

- Al Hawarneh, A., Alam, M. S., Ruparathna, R., & Pantazopoulou, S. J. (2025). Life-cycle thinking and performance-based design of bridges: A state-of-the-art review. *Resilient Cities and Structures*, 4(2), 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.rcns.2025.01.004>
- Asprilla-González, J., González-Olivardía, F., Cortez-Huerta, M., Sosa Echeverría, R., Fuentes García, G., & Durán, R. E. A. (2025). Temporal estimation of air emissions due to maritime activities in the main ports of Panama. *Energy Reports*, 11(Suppl. 14), 102130. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352485525002130>
- Autoridad del Canal de Panamá. (2018, Agosto). Canal de Panamá cumple otro hito en construcción del Puente Atlántico. <https://pancanal.com/canal-de-panama-cumple-otro-hito-en-construccion-del-puente-atlantico/>
- Barbhuiya, S., & Das, B. B. (2023). Life cycle assessment of construction materials: Methodologies, applications and future directions for sustainable decision-making. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02518. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02518>
- Bertola, N., Küpfer, C., Kälin, E., & Brühwiler, E. (2021). Assessment of the environmental impacts of bridge designs involving UHPFRC. *Sustainability*, 13(22), 12399. <https://doi.org/10.3390/su132212399>
- Biliszczyk, J., Hojnacki, M., Janicki, M., et al. (2024). The bridges of the Panama Canal. *Inżynieria i Budownictwo*, LXXX(7), 388-394. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.8821>
- Castrellón, M. G., Lu, C., Domínguez, I., Matos, R., Anguizola, K., & Popescu, I. (2025). Spatiotemporal distribution of salinity in Gatun Lake and the Panama Canal pre- and post-expansion. *Regional Studies in Marine Science*, 70, 103372. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.103372>
- Islam, M. T., Siddeqqa, M., Mukherjee, A., Bithi, S. A., Mandal, S., & Islam, M. (2023). An assessment of the potential environmental effects of bridge construction in Boga, Patuakhali, Bangladesh. *Heliyon*, 9(6), e16562. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16562>
- Jalaei, F., Zhang, J., McNeil-Ayuk, N., & McLeod, C. (2024). Environmental life cycle assessment (LCA) for design of climate-resilient bridges: A comprehensive review and a case study.

- International Journal of Construction Management*, 25(1), 99-114. <https://doi.org/10.1080/15623599.2024.2304479>
- Lee, S. H., An, L. S., & Kim, H. K. (2025). Risk-based bridge life cycle cost and environmental impact assessment considering climate change effects. *Scientific Reports*, 15, 725. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82568-4>
- Lee, Y., Park, Y., Kim, G., Yoo, J., Pinzon-Acosta, C., Gonzalez-Olivardia, F., Cruz, E., & Lee, H. (2025). Ship air emission and their air quality impacts in the Panama Canal area: An integrated AIS-based estimation during hotelling mode in anchorage zone. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(10), 1888. <https://doi.org/10.3390/jmse13101888>
- Manzanarez, R. (2017). Centennial Bridge: New cable-stayed bridge across the Panama Canal. *Presentación técnica*.
- Milić, I., & Bleiziffer, J. (2024). Life cycle assessment of the sustainability of bridges: Methodology, literature review and knowledge gaps. *Engineering Structures*, 315, 118446. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1410798>
- Muñoz, S. E., Lawrence, L., & Wang, S. (2025). Drying of the Panama Canal in a warming climate. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2025GL117038>
- Robles Batista, J. L. (2018). Estudio de caso: Impacto de la construcción y ampliación del Canal de Panamá sobre lo ambiental, antrópico-tecnológico. *Observatorio Medioambiental*, 21, 247-269. <https://doi.org/10.5209/OBMD.62661>
- URS Holdings, Inc. (2011). *Estudio de impacto ambiental categoría III: Construcción de un puente sobre el canal en el sector atlántico* (inf. téc.). Autoridad del Canal de Panamá.
- Wang, H., Liu, Y., Li, J., Liu, S., Yang, J., Luo, S., & Huang, W. (2023). Environmental life cycle assessment of bridge deck pavement and case studies of two bridges in China. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e02201. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02201>