

**Identificación de materiales innovadores y ecológicos en la construcción de infraestructura  
resistente a la corrosión marina en Santa Marta**

Saray Vega Jaraba

Tutora

Sugey Gonzalez

Universidad Nacional Abierta Y A Distancia -UNAD

Escuela de Ciencias Administrativas, Contables, Económicas y de Negocios - ECACEN

Tecnología en Gestión de obras civiles y Construcción

2026

### **Dedicatoria**

Le dedico este trabajo a Dios, ya que sin él nunca hubiese tenido la oportunidad de estudiar en primer lugar, y gracias a él es que he podido tener la fuerza, inteligencia y recursos para poder desarrollar este proyecto. Y en segundo lugar; me gustaría agradecer a la institución educativa ya que me ha permitido desarrollarme en el área profesional y me ha incursionado hacia una vida mejor en cada momento, muchas gracias.

## **Agradecimientos**

A Dios primeramente por mantenernos a todos aquí con medios y salud. Asimismo, agradezco infinitamente a esta hermosa comunidad Unadista y a mi familia que me impulsaron cada día a estar motivada y a nunca rendirme.

Finalmente, resalto a todas las personas que me apoyaron durante todo el proceso de perfeccionamiento de este proyecto como la profesora Sugely González así como los evaluadores y jurados de esta investigación.

## Resumen

El presente proyecto analiza de forma investigativa la problemática de corrosión presente en ciudades costeras tales como Santa Marta, Magdalena y como materiales que hoy en día son innovadores en nuestro y otros países tales como el FRP, el bambú tratado, el hormigón con aditivos, la fibra de vidrio y el acero inoxidable reciclado; estos, pueden mitigar este gran desafío que se presenta de manera recurrente en este tipo de escenarios, los cuales no son muy utilizados en nuestra cotidianidad. Para ello se tienen en cuenta no solo el factor económico; sino, el ambiental, geográfico y demás. Además se recopila información de referentes en cuestiones de resistencia, durabilidad, viabilidad y demás indicadores que nos ayudaran a saber si es una opción esplendida para nuestro proyecto de construcción o; por el contrario, es mejor optar por las herramientas convencionales debido a la deficiencia de beneficios o quizá, un aumento desproporcionado de los presupuestos y una desalineación con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

***Palabras clave:** materiales innovadores, materiales ecológicos, corrosión marina, infraestructura costera, sostenibilidad, viabilidad económica, pruebas experimentales, análisis comparativos, huella de carbono, Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), construcción sostenible, regiones costeras, impacto ambiental, estrategias de implementación.*

## Abstract

His project analyzes, from an investigative perspective, the problem of corrosion present in coastal cities such as Santa Marta, Magdalena, and examines how materials that are currently considered innovative both in our country and internationally—such as FRP, treated bamboo, concrete with additives, fiberglass, and recycled stainless steel—can mitigate this major challenge that recurrently arises in this type of environment, yet is not widely used in everyday practice. To this end, not only the economic factor is considered, but also environmental, geographical, and other relevant aspects. In addition, information from benchmark studies is compiled regarding resistance, durability, feasibility, and other indicators that will help determine whether these materials represent an excellent option for construction projects or, on the contrary, whether it is preferable to rely on conventional solutions due to insufficient benefits, a disproportionate increase in budgets, or misalignment with the Sustainable Development Goals (SDGs).

**Keywords:** *innovative materials, eco-friendly materials, marine corrosion, coastal infrastructure, sustainability, economic feasibility, experimental testing, comparative analysis, carbon footprint, Sustainable Development Goals (SDGs), sustainable construction, coastal regions, environmental impact, implementation strategies.*

## Tabla de Contenido

Introducción .....	9
Planteamiento del Problema .....	10
Justificación .....	13
Objetivos.....	15
Objetivo General .....	15
Objetivos específicos.....	15
Antecedentes y Revisión de la Literatura .....	16
Teorías y Modelos Relevantes.....	18
Teoría electroquímica de la corrosión .....	19
Modelos para predecir la corrosión y la vida útil.....	20
Modelos para evaluar la resistencia de materiales nuevos .....	22
Características de los Materiales Novedosos y Amigables con el Ambiente .....	22
Relación entre sostenibilidad y durabilidad de los materiales en ambientes marinos ..	26
Contexto Local: Santa Marta .....	31
Condiciones Geográficas y Ambientales.....	31
Contexto Socioeconómico y Urbano.....	31
Impacto Ambiental y Necesidad de Sostenibilidad.....	32
Importancia de usar materiales innovadores y ecológicos en Santa Marta.....	33

Explicación del modelo conceptual.....	34
Beneficios estimados de materiales innovadores frente a opciones tradicionales .....	35
Indicadores Comparativos de Materiales Innovadores vs. Tradicionales .....	36
Marco Teórico .....	37
Definición de conceptos clave.....	39
Marco Metodológico.....	40
Enfoque .....	40
Diseño e índole de la investigación.....	41
Población, muestra y elemento de análisis.....	44
Métodos y herramientas para recopilar información.....	46
Conclusiones .....	56
Impacto Ambiental.....	59
Bibliografía .....	62

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Proceso electroquímico de la corrosión en ambientes marinos</i> .....	20
<b>Figura 2</b> <i>Pérdida estimada de masa en acero en condiciones corrosivas</i> .....	21
<b>Figura 3</b> <i>Comparativa técnica de materiales para estructuras costeras sostenibles</i> ...	28
<b>Figura 4</b> <i>Diagrama conceptual de estudio</i> .....	33
<b>Figura 5</b> <i>Beneficios estimados de materiales innovadores</i> .....	35
<b>Figura 6</b> <i>Indicadores comparativos de materiales</i> .....	36
<b>Figura 7</b> <i>Comparativas Clave en Materiales para Infraestructura Costera</i> .....	36
<b>Figura 8</b> <i>Comparación de huellas de carbono entre materiales</i> .....	60
<b>Figura 9</b> <i>Costo en el ciclo de vida por materiales</i> .....	60
<b>Figura 10</b> <i>Durabilidad proyectada en ambientes marinos</i> .....	61

## Introducción

El presente proyecto de grado se enfoca en el uso de materiales innovadores y ecológicos en la construcción de infraestructuras resistentes a la corrosión marina, un problema crítico que afecta especialmente a las regiones costeras como Santa Marta, donde el entorno marino y las condiciones climáticas extremas aceleran el deterioro de las edificaciones. Lo que se pretende con esta investigación es evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de nuevos materiales como el FRP (polímero reforzado con fibra), el bambú tratado, el hormigón con aditivos reciclados y el acero inoxidable reciclado, con el fin de proponer alternativas más duraderas y sostenibles frente a los materiales tradicionales.

El epicentro de este estudio radica en su impacto directo en el ámbito social y profesional debido a que; primeramente, puede mejorar la calidad de vida de comunidades costeras al promover infraestructuras más seguras y duraderas; en segundo lugar tenemos que ofrece soluciones prácticas para ingenieros, arquitectos y constructores que enfrentan los retos del ambiente marino y, podríamos decir que incluso desde el punto de vista científico, aporta datos experimentales y análisis comparativos que fortalecen el conocimiento sobre tecnologías constructivas sostenibles.

Todo esto se realiza con el objetivo de transicionar hacia una sociedad no solo mas desarrollada, segura y cómoda; sino, a gozar de unas infraestructuras mas sostenibles, duraderas y alineadas a los tan perseguidos objetivos del desarrollo sostenible u ODS (especialmente aquellos relacionados con la infraestructura, el desarrollo urbano y la acción climática); Se espera que los resultados obtenidos no solo sirvan de base para futuras investigaciones, sino que también sean aplicables en proyectos reales en zonas costeras de Colombia y otros contextos similares.

## Planteamiento del Problema

Santa Marta, ciudad capital del departamento del Magdalena; está ubicada en la costa caribeña colombiana, es una de las ciudades más antiguas del continente americano, destacando por su proximidad al mar, sus extensas playas y la presencia de la Sierra Nevada, que propicia una diversidad de microclimas. Predomina un clima cálido y húmedo, con temperaturas que varían entre los 26 °C y 32 °C, una fuerte exposición solar casi todo el año y una humedad relativa que supera el 75 %, estas características, junto con la constante influencia de los vientos alisios cargados de sal marina, crean un entorno muy agresivo para los materiales de construcción habituales.

En este panorama, Santa Marta y ciudades costeras ya sean cercanas o no, se enfrentan a un problema continuo: el *rápido deterioro* de edificios, carreteras y obras públicas debido a la corrosión marina (Este efecto ocurre cuando la salinidad, la humedad, la intensa radiación solar y los cambios de temperatura actúan en conjunto sobre materiales como el acero y el hormigón armado, disminuyendo de forma importante su tiempo de vida útil); La consecuencia de este proceso se observa en infraestructuras esenciales como puentes, muelles y edificaciones, donde la oxidación de los elementos internos causa grietas, desprendimiento de revestimientos y debilitamiento estructural. Además de poner en riesgo la seguridad de las personas, este desgaste genera altos costos de mantenimiento, aumenta la necesidad de reparaciones frecuentes y produce más residuos de construcción que dañan el medio ambiente.

Muchos de los estudios de este tema que se han realizado de manera internacional muestran que la corrosión marina causa pérdidas económicas millonarias anualmente y aunque se han aplicado técnicas de protección, el uso común de materiales tradicionales poco resistentes sigue siendo insuficiente para hacer frente a las condiciones ambientales de Santa Marta y otras ciudades costeras; por ello, es necesario explorar materiales innovadores y sostenibles que no solo aumenten la durabilidad de las obras, sino que también ayuden a reducir el impacto ecológico vinculado a su deterioro.

Aunque nuestros antepasados se centraban más en realizar construcciones resistentes en lo cual sacrificaban la estética y la “ligereza” de las construcciones; este nuevo desafío atañe directamente a ingenieros civiles, arquitectos, constructores y autoridades públicas responsables de la planificación urbana actuales que nos centramos aparte de la resistencia, en la parte visual de las construcciones. Asimismo, insta a instituciones académicas y científicas a proponer alternativas que aseguren construcciones más seguras, resilientes y ecológicas en un contexto de cambio climático y presión ambiental que sufrimos actualmente y, que al parecer, se agravara con los años debido a nuestra inacción.

### **Pregunta problema**

¿Cuáles son los materiales innovadores y sostenibles que ofrecen una solución eficaz y ecológica frente a los efectos de la corrosión marina en la construcción de infraestructuras?

### **Preguntas de Investigación**

1. ¿Qué nivel de resistencia y durabilidad presentan los materiales innovadores y ecológicos (FRP, bambú tratado, hormigón con aditivos reciclados y acero inoxidable reciclado) frente a condiciones ambientales marinas simuladas en diferentes referentes de investigación?
2. ¿En qué medida estos materiales representan una alternativa más sostenible y económicamente viable en comparación con los materiales tradicionales utilizados en infraestructuras costeras?
3. ¿Qué estrategias de implementación pueden desarrollarse para facilitar el uso de estos materiales en proyectos constructivos en zonas costeras como Santa Marta, cumpliendo con normativas y principios de sostenibilidad?

## Justificación

La corrosión en ambientes marinos es la principal causa del deterioro de las estructuras situadas en zonas costeras, como las de Santa Marta, con climas cálidos y húmedos, este tipo de ambientes se caracterizan por la presencia de agentes corrosivos como el *cloruro*, una humedad constante, la *radiación solar*, la brisa marina y otras condiciones que favorecen el proceso de corrosión de materiales convencionales como el acero al carbono o el concreto tradicional. El deterioro prematuro de estas estructuras además de poner en riesgo la seguridad de la edificación, incrementa en gran medida el coste asociado a su mantenimiento e intervención, que en este caso recae en la administración pública y también en la iniciativa privada.

Asimismo; y sin tener en cuenta el coste económico, el continuo uso de materiales que precisan de renovación periódica tiene consecuencias negativas para el medio ambiente, la *producción* de acero o cemento, por ejemplo, está vinculada a la emisión de grandes cantidades de *gases de efecto invernadero*, y la generación de residuos y escombros derivados de la ejecución constante de obras también impacta negativamente en el entorno natural de las áreas costeras. Ante este problema, la búsqueda de nuevos materiales de construcción que sean menos susceptibles a la corrosión y que, además, supongan un beneficio para el medio ambiente se hace más necesario que nunca; materiales como los polímeros reforzados con fibra (FRP), el bambú tratado, los concretos con aditivos reciclados o el acero inoxidable reciclado, son solo algunas de las alternativas que aparecen como soluciones sostenibles y eficientes para afrontar el futuro de la construcción en el litoral.

Estas alternativas presentan beneficios como, por ejemplo, una mayor *resistencia química*, menor velocidad de degradación, mayor durabilidad y un reducido impacto ambiental durante su vida útil; su aplicación puede llevar a que las estructuras no deban ser intervenidas

con tanta frecuencia, a que se reduzcan los gastos de mantenimiento y a que se alargue de manera considerable la vida útil de las estructuras marinas aunque su costo inicial sea un poco más elevado.

Este proyecto se convierte en información vital al poder evaluar y comparar estos materiales desde un punto de vista técnico, ambiental y económico, al colocar además de esto; las necesidades de la región como un foco fundamental que se considera en cada punto. Los estudios que se llevaron a cabo por investigaciones aisladas podrán dar respuesta a cómo se comportan estos materiales cuando son sometidos a condiciones similares a las de Santa Marta, aportando datos de utilidad a la toma de decisión, a los ingenieros, a los arquitectos o a las entidades públicas encargadas del desarrollo territorial y urbano. Además, la investigación juega un punto a favor en la lucha contra el problema de la durabilidad de las infraestructuras costeras, un aspecto vital en un contexto de cambio climático y de aumento de fenómenos asociados como la corrosión acelerada, la húmeda extrema o la subida del nivel del mar.

Por último, el trabajo realizado se entrelaza y sigue la ruta de cerca de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, principalmente con el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y el ODS 13 (Acción por el clima); La apuesta por materiales innovadores y respetuosos con el medio ambiente es un gran paso para que el sector de la construcción se acerque más a un modelo constructivo responsable, eficiente y amigable con el planeta. Por ello, esta investigación no solo es la respuesta a una necesidad técnica urgente, sino que, además, es una gran aportación a la sostenibilidad ambiental, al desarrollo social y a la consolidación de la infraestructura costera de Santa Marta y de otras zonas que compartan sus características.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Identificar materiales innovadores y ecológicos que puedan ser utilizados en la construcción de infraestructuras con alta resistencia a la corrosión marina, con el fin de promover soluciones sostenibles y duraderas en entornos costeros.

### **Objetivos específicos**

Analizar los factores que influyen en la corrosión marina en infraestructuras costeras.

Identificar y evaluar materiales innovadores y ecológicos con potencial para resistir la corrosión en ambientes marinos.

Comparar estos materiales con los tradicionales y proponer recomendaciones para su uso en proyectos de infraestructura costera sostenible.

## Antecedentes y Revisión de la Literatura

En toda América Latina, los plásticos reforzados con fibras (PRFV), junto con las mezclas de concreto que incorporan nanomateriales, emergen como sustitutos sólidos de los materiales tradicionales. Con respecto a esto; el trabajo de Dualam en 2019 sugiere que el FRP neutraliza las regiones del *ánodo* y *del cátodo*, mitigando así la corrosión. De manera similar; según el informe de 2022 de ArchDaily, las mezclas de concreto que incorporan *nanosílice* exhiben una mayor resistencia contra la penetración de agua y, al mismo tiempo, disminuyen el impacto ambiental a través de la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>. El IRSO de Colombia (s. f.), centrado en el reciclaje de recursos para el desarrollo sostenible, aboga por el uso de productos ecológicos derivados de componentes reutilizados en sus iniciativas para crear una sociedad ambientalmente consciente.

Adicionalmente a esto, se han llevado a cabo numerosos proyectos de investigación que examinan cómo los diferentes entornos afectan los resultados de la oxidación; en consecuencia, Seechurn et al. En 2022, observó que se producen aumentos significativos en la corrosión cada vez que el contenido de humedad del aire supera el 75%, junto con niveles elevados de iones de cloruro presentes; Corvus et al. En 1997, determinó mediante criterios de clasificación basados en estándares internacionales como *ISO 9223*, que categorizaba ciertas regiones costeras tropicales como Cuba, México y Venezuela en *categorías de alto riesgo de corrosión* que iban desde niveles *C4-C5* debido a que tenían un elevado contenido de sal y exposición a la luz solar intensa; Los resultados se aplican específicamente a Santa Marta, dadas sus circunstancias similares.

Estudios recientes han destacado la importancia de comprender los procesos de corrosión dentro de los entornos marítimos y crear materiales duraderos capaces de resistir dicha degradación; debido a los importantes gastos financieros y ecológicos asociados con las costas dañadas prematuramente; *Nace International* informó en 2016 que los gastos relacionados representan el 3,4 por ciento de la producción económica mundial, destacando la necesidad de implementar medidas preventivas y recursos ecológicos; Por su parte, los autores *Koch et al* en 2001, sugirieron métodos innovadores para predecir fallas en los equipos y utilizar medidas de protección ecológicas para aliviar sus impactos.

Tiempo después, *Danehrian et al.* En el año 2023 concluyó que tanto la temperatura como la humedad influyen significativamente en el deterioro de los metales; sin embargo, las pinturas ecológicas reducen eficazmente los índices de corrosión. Estos estudios subrayan la importancia de utilizar recursos ecológicos para proyectos de construcción en regiones como la nuestra, dadas sus duras condiciones ambientales caracterizadas por un clima ácido (niveles de pH entre C4-C5) junto con una alta humedad ambiental de alrededor del 80%.

Dentro de esta región, Santa Marta exhibe una disminución de fuerza estructural notable en sus instalaciones marítimas e infraestructuras relacionadas con el turismo, lo que resulta en gastos sustanciales en reparaciones y, en tiempos de “crisis” afectan significativamente el atractivo visual de la ciudad. En consecuencia, la utilización de componentes de construcción duraderos y respetuosos con el medio ambiente desempeña un papel indispensable para garantizar la longevidad y el crecimiento tanto de la red de infraestructura de la región como de su industria turística, así como para fomentar la prosperidad económica.

En resumen, este estudio identifica tres desarrollos clave: un énfasis cada vez mayor en la utilización de metales avanzados para una protección rentable contra la oxidación en todo el mundo; mayor conciencia sobre la susceptibilidad que enfrentan las regiones ubicadas en los trópicos debido a factores ambientales; y avances hacia la adopción de diseños ecológicos capaces de mejorar tanto la durabilidad.

Podríamos decir que los antecedentes reflejan tres tendencias principales:

1. La **necesidad global** de reducir los costos de la corrosión usando materiales más avanzados.
2. La **gran vulnerabilidad** de las áreas costeras tropicales —como Santa Marta— a la sal y a la humedad del aire.
3. El **Cambio hacia construcciones más sostenibles**, con materiales ecológicos, reciclados y muy resistentes, como una parte fundamental de la innovación tecnológica y ambiental.

### **Teorías y Modelos Relevantes**

El estudio de la corrosión en ambientes marinos y la búsqueda de materiales resistentes y ecológicos se basa en diferentes teorías y modelos que explican cómo se deterioran los materiales, su resistencia y los principios para cuidar el medio ambiente en la construcción. Es importante entender estos conceptos para crear soluciones que funcionen bien en el clima del Caribe colombiano, donde el aire salino, la humedad y la temperatura hacen que la corrosión sea más rápida.

## Teoría electroquímica de la corrosión

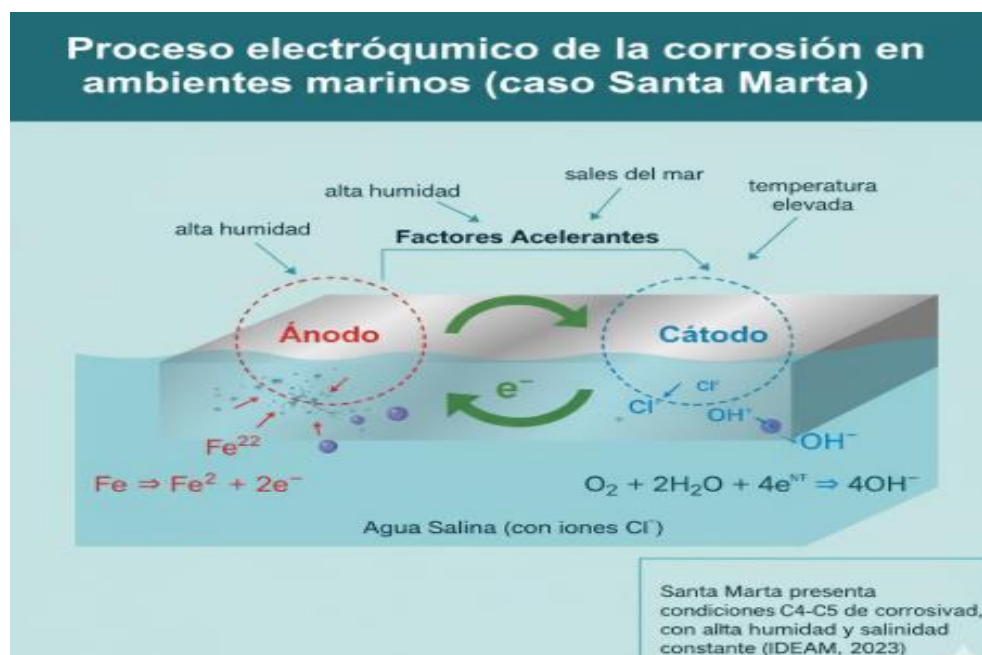
Los principios electroquímicos aclaran los fenómenos de corrosión que ocurren en entornos marítimos. Según el estudio de *Fontana de 2005*, este fenómeno ocurre cuando los metales funcionan como *electrodos* a la vez. Al involucrar al ánodo, el hierro metálico se oxida, produciendo iones ferrosos junto con la liberación de electrones ( $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$ ); al mismo tiempo, en presencia del cátodo, el oxígeno elemental se transforma en ion hidróxido mediante una reacción de reducción ( $O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$ ). Los iones disueltos en aire salado se adhieren a superficies metálicas, ayudando en la creación de circuitos eléctricos mediante reacciones electroquímicas. En el ambiente marino de Santa Marta, este proceso se acelera debido a tres factores principales:

- **Alta salinidad:** los iones cloruro ( $Cl^{-}$ ) del aerosol marino penetran las micro fisuras del metal, rompiendo la capa pasiva protectora y facilitando la formación de nuevas celdas electroquímicas.
- **Elevada humedad relativa (80–85 %):** mantiene la superficie metálica cubierta por una fina película de agua, que actúa como electrolito y permite el flujo de electrones.
- **Altas temperaturas (28–32 °C):** aumentan la velocidad de las reacciones electroquímicas, acelerando la oxidación del metal.

Que, a su vez, promueven una mayor electrólisis debido a las elevadas salinidades, lo que acelera la corrosión de los metales mediante reacciones químicas aceleradas. Ese hecho explica el rápido deterioro de las barandillas, los muelles y los edificios costeros.

## Figura 1

*Proceso electroquímico de la corrosión en ambientes marinos*



Fuente. ArchDaily. (2022). <https://www.archdaily.co/>

### Modelos para predecir la corrosión y la vida útil

Para saber cuánto duran los materiales en el mar, se usan modelos empíricos y teóricos que consideran las condiciones del ambiente. Uno muy usado es el modelo de potencia, propuesto por *Morcillo et al. (1999)*, que dice:  $M = A \cdot tn$ ; Donde M indica cuánto pierde de peso el material, t la cantidad de tiempo que estuvo expuesto, A depende del clima (humedad, cloruros, temperatura) y n el ritmo de corrosión. Este modelo funciona bien en zonas húmedas en regiones tropicales para estimar cuánto se desgasta el acero y otros metales con el tiempo.

La **norma ISO 9223:2012** ayuda a clasificar qué tan corrosivo es el aire (de C1 a C5), considerando cómo se acumulan contaminantes ( $SO_2$ , cloruros), la temperatura y la humedad.

Según esta norma, Santa Marta, por su clima cálido y su cercanía al mar, estaría en las categorías C4 (alta) o C5 (muy alta). Esto muestra la importancia de usar materiales fuertes o aplicar tratamientos que extiendan la vida de las estructuras

## Figura 2

*Pérdida estimada de masa en acero expuesto a condiciones de corrosión*

TIEMPO	A (CS)	n	PERDIDA (s/m <sup>2</sup> )
1	200	0,65	200
5	200	0,65	570
10	200	0,65	890
20	200	890	1370

Fuente. *(Adaptado de Morcillo et. Al (1999)).*

### ***Ideas de sostenibilidad y ecoeficiencia en materiales de construcción***

Las prácticas ecoeficientes defendidas por el WBCSD enfatizan "usar los recursos con moderación"; estas estrategias implican minimizar las huellas ecológicas a lo largo del ciclo de vida de un artículo manteniendo al mismo tiempo su funcionalidad; según esto, podemos decir que los entornos marinos permiten el uso de componentes de construcción ecológicos como bambú de origen sostenible, metal recuperado u hormigón armado mezclado con sustancias de origen natural, lo que ayudaría a disminuir el impacto ambiental y al mismo tiempo prolongaría la durabilidad.

A pesar de necesitar mantenimiento después de cinco a diez años; aunque, productos como el plástico reforzado con fibra o el acero inoxidable recuperado suelen durar más de cuarenta años sin mucha atención (World Steel Association, 2022). Esta postura investigativa nos

demuestra que la sostenibilidad conduce inherentemente tanto a la longevidad como a la viabilidad financiera.

### **Modelos para evaluar la resistencia de materiales nuevos**

Los métodos avanzados como EIS (velocidad de corrosión y resistencia de del recubrimiento) y SEM (estructura de la superficie) permiten a los investigadores estudiar cómo reaccionan los materiales en condiciones salinas (Seechurn et al. , 2022). Estas técnicas determinan la fricción de la superficie, la porosidad y la creación de recubrimientos inertes de protección necesarios para la validación del material en circunstancias realistas.

Las teorías y modelos revisados ayudan a entender que la corrosión marina no solo es un proceso químico natural, sino también un desafío de ingeniería que necesita un enfoque diferente. Integrar la teoría electroquímica, los modelos para predecir la vida útil y los principios de sostenibilidad proporciona una base clara para evaluar materiales nuevos que puedan resistir las condiciones extremas del ambiente costero de Santa Marta. Por eso, este marco teórico apoya la necesidad de buscar soluciones que combinen **resistencia, durabilidad y responsabilidad ambiental**, ayudando a mejorar la infraestructura sostenible en las áreas marinas del país.

### **Características y Propiedades de los Materiales Novedosos y Amigables con el Ambiente**

La creación de materiales innovadores y eco-amigables, destinados a la edificación costera, emerge, dada la urgencia de extender la vida útil de las estructuras sometidas al entorno marino. Además, se busca disminuir los gastos de mantenimiento y aminorar el impacto ambiental vinculado a los materiales tradicionales. En áreas tropicales como Santa Marta Colombia, donde la humedad, la sal y el calor provocan condiciones de corrosión atmosférica

intensa (C4-C5) según ISO 9223, la cuidadosa elección de materiales es un asunto crucial para la durabilidad y sostenibilidad de la infraestructura.

Los materiales innovadores destacan ampliamente al momento de emplear tecnologías novedosas o propiedades superiores, tales como: la resistencia química, la ligereza, la flexibilidad estructural, e inclusive, la habilidad de autorreparación. Por otro lado, los materiales ecológicos, se identifican por tener un impacto ambiental menor a lo largo de su ciclo completo, desde la extracción o producción hasta su empleo y eliminación; sin embargo, ambos tipos de materiales persiguen el mismo objetivo principal: *disminuir la huella ecológica y fortalecer la resistencia de las construcciones ante la corrosión marina.*

### **1. Polímeros reforzados con fibra FRP**

Los polímeros reforzados con fibra FRP son, una clase de materiales compuestos formados por, una matriz polimérica resina epóxica, viniléster o poliéster y fibras de refuerzo vidrio, carbono, o aramida. Su mayor ventaja, es su alta resistencia mecánica, baja densidad, y un comportamiento sobresaliente ante la humedad y agentes químicos.

En entornos marinos, los FRP muestran resistencia a la penetración de cloruros, algo que los hace perfectos para estructuras como muelles, pasarelas, y refuerzos de hormigón. (Seechurn et al 2022) apuntan, que estos materiales disminuyen de manera significativa la velocidad de corrosión, al eliminar los puntos anódicos y catódicos que hay en los metales clásicos. Aparte, necesitan poco mantenimiento y su vida útil podría superar los 50 años en ambientes marinos controlados Troy Dualam, s.f.

Pero, sus limitaciones abarcan un costo inicial más elevado, la sensibilidad a los rayos UV y la dificultad para unir con otros materiales estructurales. Aunque, su ciclo de vida largo y

resistencia química, compensan su inversión inicial, sobre todo en proyectos costeros de larga duración.

## **2. Bambú tratado y materiales biocompuestos:**

El bambú tratado es un material natural renovable con una increíble relación resistencia-precio y también una huella de carbono baja; este, al ser procesado con calor o químicos protectores, aguanta muy bien la humedad, los insectos, y la degradación biológica; para ISF Colombia (s.f.), los biocompuestos hechos con bambú o fibras naturales combinadas con resinas sostenibles, son una alternativa que sirve para construir cubiertas, pasarelas, o cerramientos en áreas costeras, soportando ambientes húmedos sin corroerse (ISF Colombia, s.f.).

El bambú tratado, si bien es fuerte estructuralmente, adicionalmente absorbe CO<sub>2</sub> mientras crece, dándole un balance ambiental muy bueno. En Santa Marta, donde el sol y la humedad atacan mucho, los biocompuestos de bambú y fibras vegetales sirven para diseños arquitectónicos ecológicos, turísticos o recreativos, uniendo funcionalidad y sostenibilidad.

## **3. Hormigones con aditivos eco-amigables y nanoestructurados**

El hormigón típico, vastamente usado en las obras costeras, a menudo sufre por la penetración de cloruros y sulfatos, lo que causa grietas y debilita la unión del acero. Para atenuar esto, se han creado hormigones con aditivos nanoestructurados como la nano sílice, grafeno, cenizas volantes y fibras recicladas que mejoran la densidad de la matriz, su impermeabilidad y la fuerza mecánica.

Según ArchDaily del 2022, emplear nano sílice y desechos industriales, como las cenizas volantes, ayuda a reducir la huella de carbono y aumentar la durabilidad del hormigón en entornos marinos. Adicionalmente, usando materiales reciclados y subproductos industriales se

potencia la economía circular y baja la dependencia del cemento Portland, el cual emite mucho CO<sub>2</sub>. En Santa Marta, los hormigones ecológicos y con aditivos resistentes al cloruro son una excelente opción para trabajos públicos, orillas costeras y proyectos turísticos expuestos a la sal del mar.

#### **4. Acero inoxidable reciclado y recubrimientos ecológicos**

El acero inoxidable reciclado, resiste bien la corrosión marina gracias al cromo y níquel que tiene, forman una capa de óxido de cromo que protege el metal. Este material combina durabilidad y reciclabilidad, disminuyendo los impactos ambientales de la producción original de acero.

La World Steel Association (2022), dice que el reciclaje de acero baja las emisiones de CO<sub>2</sub> en más del 60% y el gasto de energía en un 75% al compararlo con el acero nuevo (worldsteel.org). Por otro lado, los recubrimientos ecológicos a base de polímeros, pinturas o nanopartículas se usan como defensa para metales y hormigones, bajando el índice de humedad y la exposición a iones de cloruro. Estas tecnologías unen durabilidad y respeto ambiental, perfectas para la costa Samaria.

### **Relación entre sostenibilidad y durabilidad de los materiales en ambientes marinos**

Dentro del diseño de infraestructura marítima, las prácticas sostenibles abarcan más que simplemente minimizar los efectos ecológicos; Implican maximizar la longevidad estructural mediante el uso minimalista de materiales y costos de mantenimiento reducidos. El WBCSD afirma en su informe de los 2000 que la sostenibilidad requiere materiales que armonicen entre sus capacidades tecnológicas, huella ecológica y costos del ciclo de vida, asegurando una utilidad óptima en todas las aplicaciones.

En regiones como Santa Marta, caracterizadas por brisas marinas contaminadas y ricas en partículas de sal junto con intensos niveles de humedad relativa de 75%-85% y exposición continua a la luz solar, las condiciones ambientales requieren la longevidad de los edificios a través de materiales robustos capaces de resistir el deterioro causado por elementos corrosivos.

Materiales como FRP, bambú tratado, acero reciclado y mezclas de concreto mejoradas con nanotecnología disminuyen significativamente el impacto ambiental durante la producción, al tiempo que mitigan las tasas de oxidación y prolongan la vida útil de los activos de construcción en contraste con las opciones convencionales; de hecho, ISF Colombia informa que la utilización de materiales reciclados y productos biocompuestos reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> hasta en un 30%, alineando esta práctica con los objetivos de los ODS para el avance de la industria y el desarrollo urbano sostenible.

A modo de ejemplo, podríamos alegar que, mientras que el acero al carbono sujeto a condiciones marítimas requiere reparaciones periódicas después de aproximadamente cinco a diez años, el acero inoxidable reciclado o los plásticos fibrosos reforzados (FRP) a menudo mantienen su funcionalidad durante más de cuarenta años sin una intervención significativa, minimizando así la huella ecológica y los gastos del ciclo de vida en comparación con los métodos tradicionales, como lo describe la Asociación Mundial del Acero en su informe de 2022 y la información de referencia proporcionada por Troy Dualam. Por lo tanto, garantizar la longevidad de las estructuras es crucial para la responsabilidad ambiental a través de necesidades de mantenimiento retrasadas y un menor consumo de materiales.

En consecuencia, la conexión entre el respeto al medio ambiente y la longevidad se extiende más allá de la mera teoría hacia realidades tangibles; Cada período prolongado de funcionalidad debido a innovaciones de materiales avanzados se traduce directamente en una reducción de la huella de carbono, un menor uso de materia prima y menores gastos operativos; esto desde , la Evaluación del Ciclo de Vida que permite medir la huella ecológica integral asociada con cada recurso al examinar sus fases de producción, incluida la minería, el procesamiento, la distribución, la operación y la eventual gestión del final de su vida útil.

En la región caribeña de Colombia, combinar la solidez tecnológica con la preservación ecológica constituye la piedra angular para la construcción de infraestructura duradera capaz de resistir las alteraciones climáticas y el deterioro oceánico.

**Figura 3***Comparativa técnica de materiales para estructuras costeras sostenibles*

<b>Material</b>	<b>Ventajas técnicas</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Limitaciones</b>	<b>Aplicaciones recomendadas (contexto costero – Santa Marta)</b>
<b>Polímero Reforzado con Fibra (FRP)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta resistencia mecánica y química.</li> <li>• Inmune a la corrosión por cloruros.</li> <li>• Ligero y durable (vida útil &gt; 50 años).</li> <li>• Mantenimiento mínimo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Refuerzos estructurales.</li> <li>• Muelles y pasarelas.</li> <li>• Cubiertas y barandas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo inicial elevado.</li> <li>• Sensible a rayos UV.</li> <li>• Dificultad de unión con materiales tradicionales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puentes peatonales costeros.</li> <li>• Estructuras turísticas frente al mar.</li> <li>• Pasarelas ecológicas y malecones.</li> </ul>
<b>Bambú tratado y biocompuestos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Material natural y renovable.</li> <li>• Alta relación resistencia/peso.</li> <li>• Absorbe CO<sub>2</sub> durante su crecimiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cubiertas, cerramientos, pasarelas y mobiliario urbano.</li> <li>• Elementos arquitectónicos ligeros.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere tratamiento térmico o químico.</li> <li>• Menor durabilidad en zonas de alta salinidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cabañas ecoturísticas.</li> <li>• Mobiliario de playa y senderos turísticos.</li> </ul>

<b>Material</b>	<b>Ventajas técnicas</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Limitaciones</b>	<b>Aplicaciones recomendadas (contexto costero – Santa Marta)</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buena resistencia a humedad e insectos.</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cerramientos verdes en zonas costeras.</li> </ul>
<p><b>Hormigón con aditivos ecológicos o nanoestructurados</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta resistencia a cloruros y fisuras.</li> <li>• Impermeabilidad mejorada.</li> <li>• Reduce huella de carbono (uso de nano sílice, cenizas, escoria).</li> <li>• Mayor vida útil.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cimentaciones y muros costeros.</li> <li>• Estructuras portuarias y turísticas.</li> <li>• Pavimentos en zonas húmedas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo moderadamente mayor.</li> <li>• Requiere control técnico en la mezcla.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muros de contención marinos.</li> <li>• Malecones, embarcaderos y paseos marítimos.</li> </ul>

<b>Material</b>	<b>Ventajas técnicas</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Limitaciones</b>	<b>Aplicaciones recomendadas (contexto costero – Santa Marta)</b>
<b>Acero inoxidable reciclado (con recubrimientos ecológicos)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta resistencia a la corrosión marina.</li> <li>• Reciclable, reduce CO<sub>2</sub> hasta 60%.</li> <li>• Durabilidad superior a 40 años.</li> <li>• Bajo mantenimiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Barandas, anclajes, estructuras metálicas.</li> <li>• Refuerzos en hormigón expuesto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo inicial alto.</li> <li>• Puede sufrir corrosión localizada si no se mantiene.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Barandillas turísticas, estructuras portuarias, refuerzos costeros.</li> <li>• Elementos decorativos expuestos al aerosol marino.</li> </ul>

*Fuente. Autoría Propia*

## **Contexto Local: Santa Marta**

### **Condiciones Geográficas y Ambientales**

Santa Marta, la capital del Magdalena, se ubica en el norte de Colombia, justo en la costa caribeña, atrapada entre la Sierra Nevada y el vasto océano Atlántico; esta ubicación especial, le da una mezcla singular de ecosistemas terrestres y marinos, aunque también le trae la constante amenaza de factores ambientales que aceleran la corrosión marina y la destrucción de la infraestructura.

Según el IDEAM del 2023, Santa Marta disfruta de una temperatura media anual de 28 °C, una humedad relativa media del 80 %, con vientos constantes del noreste, que soplan a 25 km/h, arrastrando sal marina hacia el interior. Estas condiciones climáticas, junto a la radiación solar intensa y la abundancia de aerosoles marinos, resultan en un entorno catalogado como de muy alta corrosividad (C4–C5), según la norma ISO 9223 IDEAM del 2023. La sinergia entre la brisa marina, las lluvias estacionales y el calor, lleva a una acumulación constante de cloruros sobre metales, concretos y revestimientos, impactando directamente la vida útil de edificios, barandas, muelles, pasarelas y estructuras turísticas situadas en la costa.

### **Contexto Socioeconómico y Urbano**

Santa Marta, como un punto turístico clave del Caribe colombiano su economía se basa fuertemente en el turismo costero, la pesca, el comercio marítimo y actividades portuarias, los cuales demandan infraestructuras duraderas y estéticamente atractivas. Datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2022), revelan una población de más de 550.000 habitantes, con un crecimiento anual del 1,8%.

El incremento de turistas y de desarrollos urbanos en áreas costeras, específicamente en lugares como El Rodadero, Taganga, Pozos Colorados y la Bahía de Santa Marta, ha sometido a una gran presión la infraestructura ya construida; pero, muchas de esas estructuras (por no decir que todas) fueron erigidas con materiales tradicionales (acero al carbono y concreto sin protección) que son muy susceptibles a la corrosión marina; esta situación ha ocasionado altísimos costes de mantenimiento, perdiendo así valor en el paisaje y generando impactos a la seguridad estructural.

Considerando que en el Plan de Desarrollo Distrital de Santa Marta 2020–2023, una de las primordiales prioridades del municipio consiste en impulsar proyectos de infraestructura sostenible, empleando tecnologías limpias y materiales de bajo impacto ambiental Alcaldía de Santa Marta, 2020; por lo tanto es fundamental la innovación y la implementación de nuevas alternativas para solucionarlo; tanto, que se ha investigado una y otra vez el tema como por ejemplo, este proyecto.

### **Impacto Ambiental y Necesidad de Sostenibilidad**

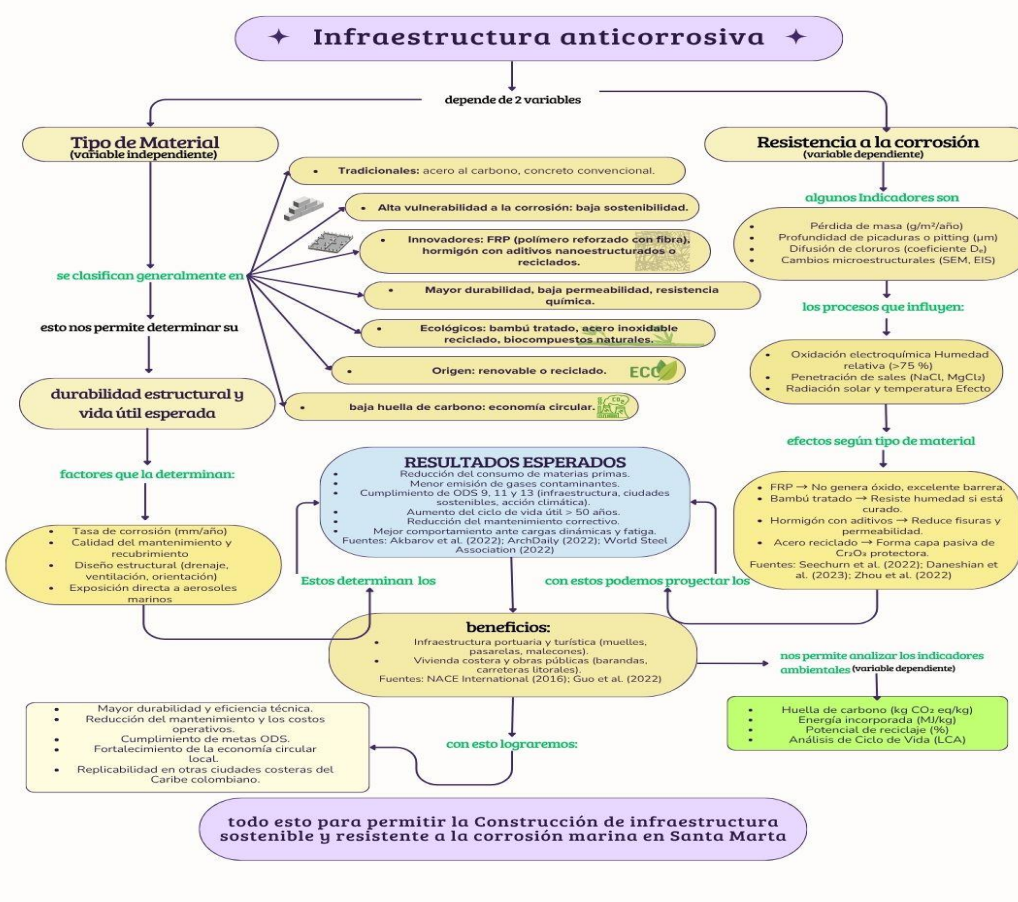
El área costera de Santa Marta enfrenta problemáticas ambientales originadas por la erosión marina, la salinización del suelo, la contaminación de playas, además de la pérdida de ecosistemas costeros. Según el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras – INVEMAR en el año 2022, más del 40 % de la línea de costa del Caribe colombiano exhibe procesos activos de erosión, lo que empeora el deterioro de infraestructuras y viviendas en zonas cercanas al mar Invemar, 2022. El Banco Mundial, alertó, que el Caribe colombiano enfrentará la amenaza de la subida del mar y eventos climáticos fuertes, por esta razón, se urge emplear materiales de construcción duraderos y con poca afectación al ambiente (World Bank, 2021).

Estas circunstancias dejan ver la urgencia de implementar los principios de sostenibilidad y resiliencia en el desarrollo urbano. El empleo de materiales novedosos y amigables con el ambiente, en obras civiles costeras ayudaría a disminuir los gastos de mantenimiento, a la vez que se atacan a las emisiones del cemento y acero, reforzando la ciudad ante el cambio climático.

## Importancia de usar materiales innovadores y ecológicos en Santa Marta

Figura 4

Diagrama conceptual de estudio: (mapa mental) “infraestructuras sostenibles y resistentes a la corrosión marina en Santa Marta



Fuente. Autoría Propia

Aplicar materiales como el FRP, hormigones con aditivos ecológicos, bambú tratado, acero reciclado y demás, da una chance para mejorar la calidad, sostenibilidad y la imagen de las infraestructuras costeras samarias. Con estos materiales, se puede:

- Frenar la velocidad del deterioro por los cloruros marinos.
- Bajar la frecuencia del mantenimiento.
- Lograr los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 9 y ODS 11) ligados a la innovación industrial y las ciudades sostenibles.
- Reforzar la imagen de Santa Marta como “ciudad verde costera” y destino turístico sostenible del Caribe colombiano.

Así, el ambiente cercano respalda totalmente la importancia del proyecto, ubicándolo asimismo como un aporte técnico y ambiental en el desarrollo urbano consciente, respondiendo a la corrosión marina y al reto del cambio climático con ello.

### **Explicación del modelo conceptual**

El modelo conceptual propuesto establece que el desempeño estructural y ambiental de la infraestructura costera depende de la interacción entre el tipo de material y las condiciones marinas. Las variables independientes corresponden al tipo de material y las condiciones ambientales; las dependientes incluyen la tasa de corrosión, la vida útil y la huella de carbono; y las moderadoras, las prácticas de mantenimiento y la exposición al aerosol marino.

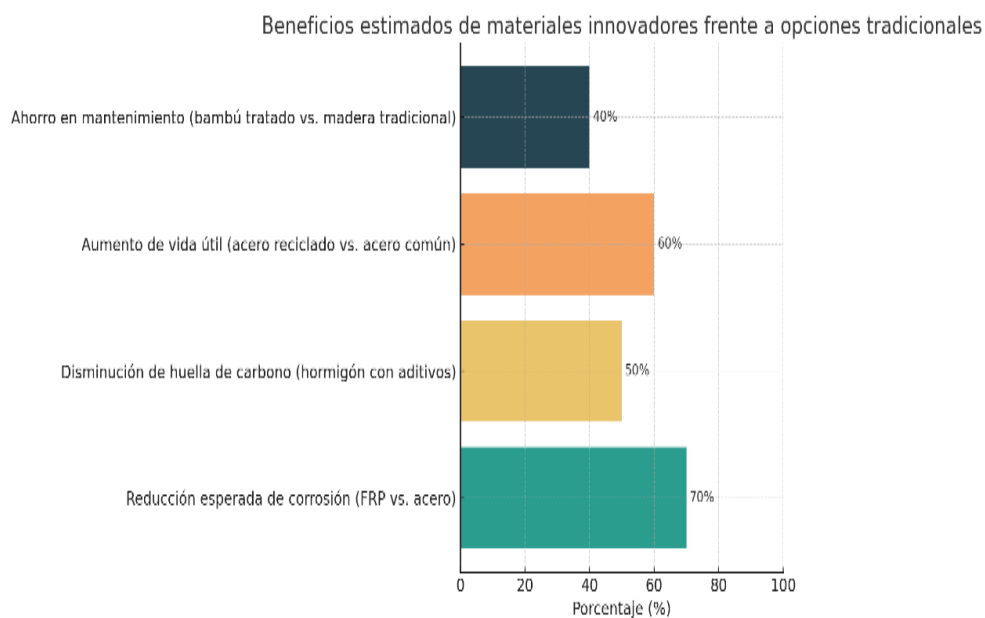
Los materiales innovadores y ecológicos reducen la corrosión, prolongan la vida útil y mejoran la sostenibilidad, generando infraestructuras más duraderas en ambientes costeros como Santa Marta.

Este marco conceptual servirá de base para el **diseño metodológico** de la investigación, orientando la selección de variables, la medición de resistencia a la corrosión y la evaluación ambiental bajo criterios de sostenibilidad.

### **Beneficios estimados de materiales innovadores frente a opciones tradicionales**

#### **Figura 5**

*Beneficios estimados de materiales innovadores frente a opciones tradicionales*

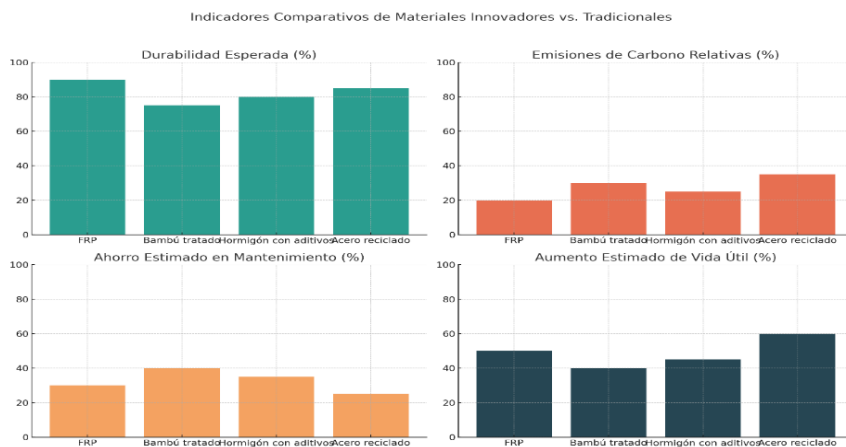


*Fuente. Autoría Propia*

## Indicadores Comparativos de Materiales Innovadores vs. Tradicionales

**Figura 6**

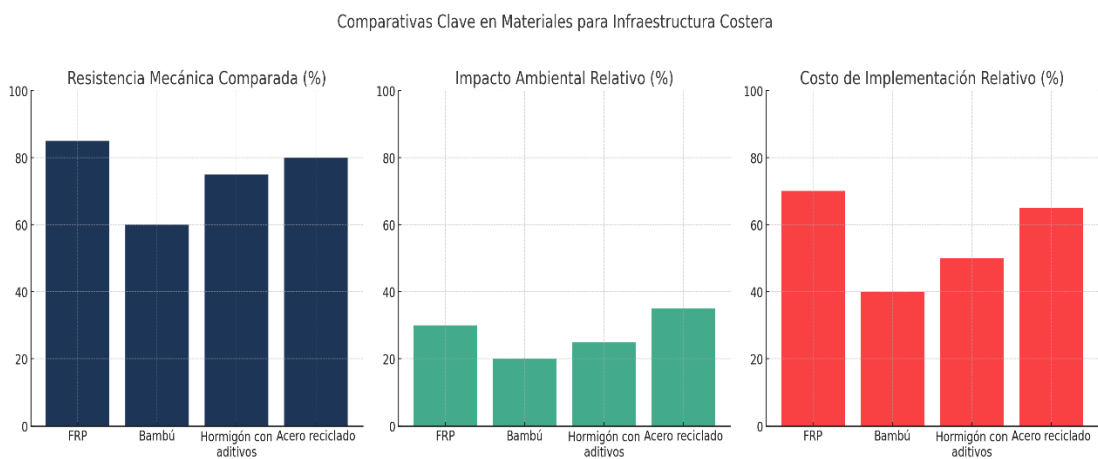
### *Indicadores Comparativos de Materiales Innovadores vs. Tradicionales*



*Fuente. Autoría Propia*

**Figura 7**

### *Comparativas Clave en Materiales para Infraestructura Costera*



*Fuente. Autoría Propia*

## Marco Teórico

Primeramente debemos comprender que el deterioro de un material es debido a la interacción química entre él y su entorno que, automática y naturalmente produce una reacción eléctrica conocida como *corrosión* cuando se expone a la humedad, el aire y sustancias corrosivas como los iones de cloruro.

Las ciudades costeras como, en este caso, Santa Marta experimentan una erosión acelerada debido a las sales del agua de mar; lo que genera mayores gastos de mantenimiento, reemplazos regulares y posibles daños a estructuras como carreteras y casas a lo largo y muy cerca de cuerpos de agua (*NACE International, 2016*). Para ser precisos, el estudio **NACE IMPACT** proyecta que los gastos mundiales por corrosión totalizan aproximadamente **\$250 mil millones al año**, comparable a *alrededor del 3,4 por ciento de la producción económica mundial*, destacando su impacto significativo en las economías a nivel mundial.

Es bien sabido que el clima en muchas partes de la costa de América del Sur y de Colombia tiende a ser bastante duro porque experimenta olas de calor abrasadoras, altos niveles de humedad, lluvias torrenciales frecuentes y partículas de sal persistentes flotando en la atmósfera; en estas condiciones que prevalecen en las regiones subtropicales húmedas, el deterioro del metal se acelera significativamente debido a la exposición simultánea a niveles elevados de humedad y a *iones de cloruro* disueltos presentes en el aire (*Corvo et al. , 2009*).

Colombia enfrenta amenazas debido al cambio climático en sus regiones costeras, incluido el aumento del nivel del mar y fenómenos climáticos severos, que desafían los esfuerzos para mantener las estructuras existentes. Situada a lo largo de la costa caribeña de Colombia, Santa Marta está constantemente expuesta a condiciones ambientales que favorecen la

degradación marina. A pesar de la escasa investigación que se centra únicamente en la corrosión dentro de las construcciones de estas regiones, la evidencia indica que las zonas costeras a lo largo de la costa caribeña de Colombia enfrentan desafíos que incluyen el retroceso de la costa debido a la acción de las olas, el aumento de las inundaciones causadas por el aumento del nivel del mar y el aumento de los impactos de los huracanes; todos los que llegan, impactan y no solo a los activos dentro de las construcciones cercanas; sino, que también afectan directamente a las poblaciones cercanas (*Wilmsmeier et al. , 2020*). Además, ejemplos como los encontrados en los bosques de manglares de la Ciénaga Grande de Santa Marta demuestran cómo los ambientes marinos interactúan estrechamente con las áreas terrestres, viéndose significativamente afectados por los niveles de sal y los cambios ecológicos generales.

A la luz de tales circunstancias, es imperativo emplear recursos novedosos y ecológicos capaces de resistir el deterioro marítimo y al mismo tiempo fomentar prácticas ambientales sostenibles; sustancias como los materiales compuestos fibrosos (FCM), el hormigón que incorpora componentes ecológicos, los agregados biológicos o el acero reciclado ofrecen opciones viables para mejorar la longevidad estructural, minimizar las huellas ecológicas y apoyar los objetivos 9 de los ODS sobre innovación industrial y 11 sobre ciudades sostenibles.

Este marco teórico y conceptual tiene como objetivo establecer una base científica para comprender los procesos de corrosión marina, examinar los precedentes y teorías pertinentes, así como situar la aplicación de materiales ecológicos en las regiones costeras, particularmente en Santa Marta; en consecuencia, este marco sienta las bases teóricas para examinar cómo las sustancias elegidas resisten la degradación con el tiempo y mantienen su viabilidad en diversas aplicaciones.

### Definición de conceptos clave

- **Corrosión marina:** El deterioro de los metales debido a las interacciones químicas que los involucran, el oxígeno disuelto y los cloruros que se encuentran en el agua de mar se produce mediante procesos de electrólisis. En tales condiciones, las sales que se *adhieren* a las superficies metálicas reaccionan químicamente con la humedad ambiental, formando un medio *eléctricamente conductor* que ayuda al flujo de *electrones* y provoca la corrosión de los metales (Seechurn et al., 2022).
- **Materiales innovadores:** Estos avances se deben a procedimientos experimentales diseñados específicamente para mejorar la resistencia a la degradación por factores como la exposición a la humedad o productos químicos nocivos. Algunos ejemplos incluyen plásticos reforzados con fibras (FRP), materiales que contienen *nanomateriales* para propiedades mejoradas como resistencia y longevidad.
- **Materiales ecológicos:** Estas entidades se caracterizan por producir una menor huella ecológica en *todas* las etapas de su ciclo de vida: producción, operación y eventual procesamiento de fin de vida. Estos recursos pueden someterse a reciclaje, utilizar métodos de producción sostenibles u originarse a partir de fuentes respetuosas con el medio ambiente. (ISF Colombia, p. 123).
- **Infraestructura resistente a la corrosión marina:** Estructura que, gracias a componentes bien diseñados, materiales de construcción robustos, mantenimiento regular y protección eficaz contra condiciones adversas, este armazón sigue funcionando eficazmente durante períodos prolongados en entornos marítimos. Su fortaleza radica en ser fácil de mantener sin dañar la naturaleza (Archdaily, 2022).

## Marco Metodológico

### Enfoque

Esta investigación adopta un **enfoque mixto no experimental, con predominio cualitativo**, lo cual implica la integración sistemática de datos cualitativos y cuantitativos sin manipulación de variables, tal como lo plantean Creswell (2014) y Hernández, Fernández y Baptista (2018). Esta perspectiva prioriza la comprensión profunda de los fenómenos sociales, ambientales y técnicos asociados a la corrosión marina y al uso de materiales ecológicos e innovadores, utilizando información existente proveniente de fuentes documentales y bases de datos, sin realizar intervención experimental en laboratorio.

Se lleva a cabo un estudio crítico y hermenéutico de la literatura especializada, así como de las regulaciones técnicas pertinentes —en especial las normas **ISO 9223** (clasificación de ambientes corrosivos), **ISO 9224** (tasas de corrosión), **ISO 9225** (factores ambientales asociados a la corrosión), **ISO 9226** (evaluación de exposición atmosférica) y **ISO 12944** (protección anticorrosiva mediante recubrimientos)— junto con investigaciones de caso relevantes y documentos técnicos a nivel local y regional. Desde este enfoque cualitativo, el objetivo es comprender significados, puntos de vista, tendencias tecnológicas, barreras de implementación y criterios de sostenibilidad aplicables al contexto costero de Santa Marta.

Con el fin de caracterizar y contrastar la conducta teórica-documental de los materiales, se utilizan fuentes secundarias cuantificables (publicaciones sobre índices climáticos, tasas de degradación, inventarios de materiales, costos históricos de mantenimiento y parámetros para evaluar el ciclo de vida) desde un enfoque cuantitativo no experimental. Se procesan estos datos

a través de matrices comparativas y estadísticas descriptivas, las cuales posibilitan determinar diferencias y proyectar sin la intervención directa de experimentos.

La combinación de los dos elementos (mixto) posibilita la triangulación de los hallazgos: las interpretaciones cualitativas contextualizan y explican los resultados numéricos obtenidos a partir de bases de datos y fuentes documentales, mientras que los datos cuantitativos brindan rigor y posibilidad de comparar. Esta perspectiva es consistente con las metas de la investigación, que tienen como propósito detectar, analizar y cotejar materiales ecológicos e innovadores para construir estructuras resistentes a la corrosión marina en Santa Marta. Se busca dar respuesta a interrogantes de índole técnica, ambiental y de factibilidad sin llevar a cabo pruebas experimentales propias.

### **Diseño e índole de la investigación**

El estudio actual es un análisis descriptivo, analítico y documental, que se ha llevado a cabo con un diseño de investigación transversal y no experimental. Dado que la investigación no controla variables, no lleva a cabo experimentos de laboratorio ni intervenciones directas sobre los materiales, este diseño es apropiado. En cambio, se fundamenta en el examen, la síntesis y la comparación de información ya existente que proviene de fuentes científicas, normativas técnicas, informes institucionales y estudios anteriores vinculados con la corrosión marina y los nuevos materiales empleados en infraestructuras costeras.

El estudio, en su parte descriptiva, detalla los factores químicos, ambientales y climáticos vinculados a la corrosión marina en áreas costeras como Santa Marta. También describe las características técnicas, sostenibles y estructurales de los materiales ecológicos e innovadores. Este nivel descriptivo posibilita el reconocimiento de patrones, rasgos y conductas que están documentados en la literatura especializada.

El elemento analítico-comparativo posibilita la comparación entre el rendimiento teórico y documentado de los materiales tradicionales empleados en infraestructura costera (hormigón convencional y acero al carbono) con el de los nuevos materiales innovadores. La evaluación se lleva a cabo utilizando matrices multicriterio, revisión de parámetros técnicos que aparecen en la bibliografía, criterios de durabilidad bajo condiciones atmosféricas marinas clasificadas como C4–C5 según la norma ISO 9223 y indicadores de sostenibilidad.

El trabajo también tiene un carácter documental, pues se basa en el análisis metódico y exhaustivo de datos secundarios extraídos de publicaciones científicas, normas técnicas (como la ISO 9223 y la ISO 12944), reportes de entidades expertas (como NACE International, IDEAM e INVEMAR), bases de datos de materiales y literatura referida a corrosión marina y sostenibilidad. Esta táctica metodológica posibilita la incorporación de evidencia verificada, relevante y consolidada, sin tener que llevar a cabo procedimientos experimentales propios.

### **Conexión entre el diseño de la investigación y sus objetivos específicos**

El diseño es no experimental-transversal porque los datos son analizados tal como están en las fuentes revisadas y pertenecen a un solo momento de síntesis y revisión, sin que haya observación constante a través del tiempo ni manipulación sobre las variables. Este diseño posibilita tratar los objetivos propuestos de forma eficaz, los cuales están dirigidos a examinar, determinar y contrastar materiales ecológicos e innovadores que puedan incrementar la resistencia a la corrosión marina en estructuras costeras.

Se desprende directamente de las metas particulares de la investigación y posibilita su tratamiento apropiado, sistemático y coherente:

### **Objetivo 1**

Analizar los factores que influyen en la corrosión marina en infraestructuras costeras.

- Se aborda mediante el diseño descriptivo y documental, ya que requiere revisar y sintetizar información técnica proveniente de estudios científicos, normas ISO y reportes institucionales para caracterizar el ambiente marino de Santa Marta y sus efectos en los materiales.

### **Objetivo 2**

Examinar y determinar materiales ecológicos e innovadores que tengan la capacidad de soportar la corrosión en ambientes marinos.

- Se lleva a cabo a través del diseño analítico y descriptivo, que posibilita la evaluación de las propiedades, beneficios técnicos, restricciones y criterios de sostenibilidad de cada material, apoyándose en datos secundarios publicados sin requerir intervención experimental.

### **Objetivo 3**

Sugerir recomendaciones para la utilización de estos materiales en infraestructuras costeras sostenibles y contrastarlos con los materiales tradicionales.

- Se necesita un diseño comparativo no experimental, que use matrices de análisis, criterios multicriterio y datos obtenidos de documentos para comparar el rendimiento teórico de cada material con los materiales tradicionales.

La relación entre los propósitos y el diseño utilizado asegura, en términos generales, que la investigación sea capaz de cumplir sus objetivos sin emplear procedimientos experimentales

o aplicados, sino únicamente mediante el análisis académico, comparativo y documental.

Esto asegura una aproximación rigurosa, sistemática y apropiada para el proyecto de grado, manteniendo la coherencia con la naturaleza no experimental del estudio.

### **Población, muestra y elemento de análisis**

La población y la muestra no hacen referencia a personas, sino a documentos técnicos, materiales y fuentes de información que constituyen el universo de estudio, puesto que esta investigación es de tipo no experimental, documental y comparativo.

**Población:** Toda la documentación académica, los informes especializados, las normas técnicas y los estudios científicos que se ocupan de la corrosión marina, la infraestructura costera en entornos altamente corrosivos (C4-C5) y los materiales ecológicos e innovadores, particularmente en el marco del Caribe. Esta población comprende:

- Artículos científicos que tratan sobre la corrosión en el mar y la durabilidad de los materiales.
- Reglas a nivel nacional e internacional (como ISO 9223, ISO 12944).
- Reportes técnicos de organizaciones como: NACE International, INVEMAR, IDEAM, Asociación Mundial del Acero.
- Investigaciones anteriores de situaciones en áreas costeras tropicales.
- Documentos sobre materiales ecológicos, sostenibilidad y ciclo de vida.

**Muestra:** La muestra consiste en un conjunto de documentos que se ha elegido a través de muestreo no probabilístico por criterios, lo que posibilita seleccionar solo las fuentes que satisfacen los requisitos científicos y relevantes para la finalidad del estudio.

**Normas de inclusión:**

- Investigaciones divulgadas entre los años 2000 y 2024 (con el fin de asegurar la vigencia científica).
- Estudios que estudien cómo funcionan los materiales en entornos marinos o con una alta corrosividad.
- Documentos que contengan información sobre las propiedades mecánicas, ecológicas y técnicas de materiales novedosos como el hormigón con aditivos, el acero inoxidable reciclado, los compuestos de fibra de vidrio y el bambú tratado.
- Reglamentos y reportes oficiales de tipo técnico que se refieren a la corrosión, al clima costero y a la durabilidad.
- Datos que sean emitidos por entidades acreditadas, estén indexados o sean verificables.

**Criterios de exclusión:**

- Artículos no sometidos a revisión por pares.
- Información no técnica o divulgativa (publicaciones de blog, entradas que no son académicas).
- Documentos que no contienen información verificable o que presentan metodologías confusas.
- Investigaciones en contextos no comparables (como ambientes con escasa corrosividad que no son tropicales).

- La muestra definitiva estará compuesta por unos 30 a 45 artículos científicos y técnicos, elegidos por su relevancia, actualidad y rigor metodológico.

**Unidad de estudio:** Como el estudio es de carácter documental, la unidad de análisis se compone de:

- Los atributos mecánicos, químicos y técnicos de los materiales ecológicos e innovadores, según se ha informado en las fuentes revisadas.
- Los elementos ambientales relacionados con la corrosión marina, en particular en las áreas C4–C5.
- **Los indicadores de sostenibilidad y ciclo de vida (LCA)** utilizados para evaluar impacto ambiental.
- **Los parámetros de comparación entre materiales innovadores y materiales tradicionales** (durabilidad, resistencia, costos, huella de carbono, mantenimiento).

Estas unidades de análisis permiten evaluar y comparar de forma sistemática el comportamiento de los materiales en ambientes marinos sin recurrir a experimentación directa.

### **Métodos y herramientas para recopilar información**

La recopilación de información se fundamenta únicamente en fuentes secundarias y, como complemento, en el criterio técnico de especialistas cuando sea necesario, debido a la naturaleza documental, no experimental y mixta del estudio. Para esto, se utilizan tres métodos fundamentales: la revisión sistemática de documentos, el análisis de contenido en

fuentes especializadas y, si se desea, la consulta a especialistas por medio de entrevistas semiestructuradas exploratorias.

- **Técnica: Examen documental sistemático**

**Instrumento:** Matriz para el análisis bibliográfico y matriz de recolección de información.

La recopilación de información técnica, científica y normativa pertinente se realiza mediante la revisión sistemática de documentos sobre:

**Elementos que hacen posible la corrosión marina.**

Características de los materiales que son ecológicos e innovadores.

- Rendimiento comparativo entre materiales convencionales y nuevos en entornos costeros.
- Indicadores de sostenibilidad y resistencia estructural.

El procedimiento consta de:

- Investigación estructurada en bases de datos académicas (Google Scholar, SpringerLink, IEEE Xplore, ScienceDirect y Scopus).
- Evaluación de documentos institucionales (NACE International, IDEAM, INVEMAR) y normas técnicas (ASTM, ISO 9223, ISO 12944).
- Registro de cada fuente en una matriz documental que incluye el año, el autor, la metodología, el tipo de investigación, las contribuciones y la importancia.
- Este método es el insumo principal de la investigación y asegura la precisión académica.

## **2. Método: Estudio documentario de tipo técnico-estructural**

**Instrumento:** Manual de análisis técnico-documental

- Tarjetas para la extracción de parámetros y propiedades

Esta técnica se utiliza para reunir datos concretos acerca de:

- Características de los materiales a nivel estructural, fisicoquímico y mecánico.
- Datos de resistencia, durabilidad y vida útil que se han reportado en investigaciones anteriores.
- Indicadores medioambientales como el ciclo de vida (LCA), la huella de carbono o el impacto ecológico.
- Según las fuentes oficiales, los requerimientos de mantenimiento y los costos estimados.

Las fichas de análisis posibilitan la sistematización de datos numéricos, descripciones técnicas y criterios de comparación, los cuales posteriormente serán utilizados para alimentar las matrices analíticas del estudio.

## **7. Coherencia entre la metodología y las metas específicas**

El marco metodológico establecido está montado coherentemente y de forma directa con los propósitos específicos propuestos en la investigación, asegurando que cada decisión metodológica sea una respuesta a una necesidad específica del estudio.

**Objetivo 1:** Examinar los elementos que tienen un impacto en la corrosión marina en las estructuras costeras.

- Este objetivo se aborda a través del análisis de contenido, la revisión sistemática de literatura, el diseño descriptivo y la perspectiva cualitativa-documental. Estas herramientas facilitan la identificación, interpretación y síntesis de los elementos estructurales, químicos y ambientales que aparecen en investigaciones científicas y estándares técnicos como ISO 9223.

**Objetivo 2:** Reconocer y analizar materiales ecológicos e innovadores que tengan la capacidad de resistir la corrosión en entornos marinos.

- El diseño descriptivo y analítico, el análisis de documentos técnico-estructurales, la extracción de datos cuantitativos secundarios y el análisis descriptivo contribuyen a la valoración de las propiedades químicas, mecánicas, ecológicas y sostenibles de los materiales.

**Objetivo 3:** Contrastar los materiales tradicionales con los novedosos y sugerir consejos para su uso en Santa Marta.

- Este propósito se lleva a cabo a través de la integración de resultados, el análisis comparativo, el uso de matrices multicriterio y el diseño comparativo. Estos métodos posibilitan identificar similitudes y diferencias, ventajas técnicas, limitaciones y escenarios de uso.

En conclusión, el enfoque mixto no experimental, las estrategias comparativas y descriptivas, los métodos de análisis elegidos y las técnicas de recolección de documentos constituyen un sistema metodológico cohesivo, articulado y adecuado para lograr los propósitos sin requerir procedimientos experimentales o intervenciones directas.

## **8. Cierre y justificación global del marco metodológico**

La metodología planteada asegura consistencia interna y rigor científico, debido a que se basa en métodos que han sido validados de manera extensa en investigaciones ambientales, de ingeniería y documentales; la combinación de análisis cualitativos y cuantitativos de fuentes secundarias hace posible entender integralmente la corrosión marina, mientras que también permite el estudio y la comparación de materiales novedosos fundamentados en pruebas técnicas publicadas previamente.

Además, el hecho de que la investigación no sea experimental garantiza que el análisis se enfoque en la interpretación, síntesis y comparación de información ya existente, evitando así manipular variables o realizar ensayos de laboratorio. Esto es consistente con las directrices de la UNAD para trabajos de grado de tipo investigativo y con la disponibilidad real de recursos.

El método secuencial, las técnicas de recopilación de documentos, los instrumentos analíticos y la triangulación de hallazgos cualitativos y cuantitativos posibilitan llegar a conclusiones firmes, pertinentes y que pueden ser aplicadas en el entorno costero de Santa Marta. Por lo tanto, este marco metodológico es una base sólida y legítima para llevar a cabo la investigación y para hacer recomendaciones basadas en el uso de materiales ecológicos e innovadores que sean resistentes a la corrosión marina.

## 1. Investigación y Selección de Materiales

**Objetivo:** Identificar materiales innovadores y ecológicos adecuados para infraestructuras en ambientes costeros.

### Procedimiento:

- Realizar una revisión bibliográfica exhaustiva sobre materiales con propiedades anticorrosivas y sostenibles, como fibra de vidrio reforzada con plástico (FRP), hormigón con aditivos reciclados, bambú tratado, acero inoxidable reciclado y recubrimientos avanzados ( *Guo et al., 2022* , pp. 1-2).
- Determinar propiedades clave como resistencia química, mecánica, sostenibilidad y costo. Estas propiedades serán comparadas con materiales convencionales como el acero al carbono y el hormigón estándar ( *Aslam et al., 2022* , pp. 263-282).
- Filtrar los materiales seleccionados según su disponibilidad y viabilidad en el contexto de Santa Marta.

## 2. Pruebas experimentales ya realizadas

**Objetivo:** Evaluar la resistencia y durabilidad de los materiales en condiciones marinas simuladas.

### Diseño del experimento

- Se prepararon muestras de los materiales seleccionados.
- Sometieron las muestras a condiciones controladas que emulen ambientes marinos, incluyendo exposición a agua salada (3.5% de salinidad), ciclos de

temperatura y humedad, y exposición a luz ultravioleta ( *Zhou et al., 2022* , pp. 429-450).

### **Métodos de análisis**

- Se aplicaron técnicas electroquímicas como espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) para medir el comportamiento frente a la corrosión ( *Zhou et al., 2022* , pp. 429-450).
- Se realizaron pruebas de resistencia mecánica y análisis de degradación superficial mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) ( *Zhang et al., 2022* , pp. 505-526).

### **Control comparativo**

- Comparar los resultados de los materiales innovadores con los materiales convencionales para evaluar diferencias en durabilidad y resistencia ( *Fan et al., 2022* , pp. 79-110).

## **3. Análisis comparativo**

**Objetivo:** Evaluar el impacto ambiental, la viabilidad económica y el desempeño técnico de los materiales seleccionados.

### **Procedimiento**

#### **Impacto Ambiental**

- Calcular la huella de carbono y evaluar el ciclo de vida (LCA) de los materiales, desde su producción hasta su disposición final, utilizando referencias de estudios sobre sostenibilidad ( *Akbarov et al., 2022* , pp. 27-42).

### **Viabilidad Económica**

- Realizar un análisis de costos considerando el precio de adquisición, transporte, instalación y mantenimiento a largo plazo.
- Comparar los costos totales con los beneficios obtenidos por el aumento de la durabilidad y la reducción de reparaciones ( *Guo et al., 2022* , pp. 137-154).

### **Desempeño Técnico**

- Cruzar los datos experimentales de resistencia y durabilidad con los análisis de sostenibilidad y costo.

## **4. Desarrollo de Estrategias de Implementación**

**Objetivo:** Proponer estrategias prácticas para integrar los materiales seleccionados en proyectos costeros.

### **Procedimiento**

- Diseñar guías para la selección y aplicación de materiales innovadores en infraestructuras costeras, alineadas con normativas locales e internacionales ( *Eco-Friendly Corrosion Inhibitors* , Chapter 3, 2022, pp. 27-42).
- Incluir recomendaciones específicas para el tratamiento y mantenimiento de materiales en función de los resultados experimentales.
- Relacionar las estrategias propuestas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, incluyendo la Meta 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), Meta 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles) y Meta 13 (Acción por el Clima).

## Resultados Esperados

Los resultados esperados de esta investigación permitirán identificar, analizar y validar la resistencia y sostenibilidad de diversos materiales innovadores en ambientes costeros, así como establecer lineamientos para su implementación efectiva en infraestructuras expuestas a la corrosión marina.

En primera instancia se plantea corroborar que la corrosión marina es un tipo de corrosión que se ve influenciada por diversos factores medioambientales característicos de áreas costeras, entre estos la elevada concentración de cloruros en el aerosol marino, la alta humedad relativa (mayor al 75 %), las elevadas temperaturas, la incidencia constante de la radiación solar y la acción del viento y del oleaje; estas condiciones favorecen las reacciones electroquímicas que pueden dañar severamente materiales habituales como el acero al carbono y el hormigón ordinario, al acortar su vida útil y aumentar los costes de mantenimiento y reparación, tal y como exponen Zhou et al. (2022).

En segunda instancia, se pretende identificar y validar el comportamiento de nuevos materiales sostenibles y ecológicos frente a este fenómeno, entre los materiales candidatos a estudio se encuentran el acero inoxidable reciclado, los polímeros reforzados con fibra (FRP), el bambú tratado, los hormigones modificados con aditivos ecológicos y nanoestructurados. Según Zhang et al. (2022), estos materiales sufren menor degradación microestructural y son más estables químicamente frente a la presencia de cloruros, la humedad y los cambios térmicos, que sus homólogos tradicionales. Realizar el análisis de experimentos o rutinas que han funcionado o no utilizando técnicas como la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) y la microscopía electrónica de barrido (SEM) proporcionarán medidas precisas de la velocidad de corrosión, la permeabilidad, el desarrollo

de capas de pasivación y el deterioro superficial. El contraste de estos valores con los recogidos en materiales habituales hará visibles las ventajas en durabilidad y resistencia de los nuevos materiales, tal como defiende Guo et al. (2022).

Adicionalmente a esto, se quiere poner de manifiesto que, si bien algunos de los nuevos materiales plantean un mayor coste por unidad al inicio de la obra, su mayor vida útil, su bajo mantenimiento y su capacidad de disminuir intervenciones correctivas los hacen más rentables a lo largo de toda la vida útil de la infraestructura. Un argumento que coincide con lo manifestado por Fan et al. (2022) quienes consideran que materiales como el acero inoxidable reciclado y el FRP justifican su inversión inicial por su resistencia superior.

Por otro lado, se plantea confirmar que los materiales verdes aportan un beneficio significativo a la reducción de emisiones de gases efecto invernadero puesto que implican un menor consumo de energía en sus procesos de valorización, menor generación de residuos y mayor vida útil de las estructuras en las que se emplean. El análisis del ciclo de vida (LCA), siguiendo la línea de Akbarov et al. (2022), puede ayudar a cuantificar estas ventajas ambientales así como el grado de contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular los ODS 9, 11 y 13.

Por último, a partir de una comparación técnica, económica y medioambiental, se prevé poder plantear recomendaciones de diseño y construcción de obra civil sostenible en ambientes costeros. Estas recomendaciones incluirían pautas para la selección de materiales en función de la influencia de las condiciones ambientales del entorno, la maximización de la vida útil de las estructuras con estrategias de protección anticorrosiva, así como el uso de materiales y tecnologías sostenibles para alargar la vida útil de estructuras expuestas a un ambiente marino altamente agresivo.

## Conclusiones

Con base en el análisis conceptual, teórico y metodológico desarrollado, se proyecta que la investigación permitirá determinar de manera clara la relación entre las condiciones ambientales propias de las zonas costeras y el deterioro prematuro de las infraestructuras expuestas a la corrosión marina. Se anticipa que factores como la alta concentración de cloruros, la humedad relativa elevada, la radiación solar intensa y los ciclos térmicos característicos de entornos como Santa Marta continuarán siendo los principales agentes que aceleran los procesos electroquímicos de corrosión, afectando especialmente a materiales tradicionales como el acero al carbono y el hormigón convencional.

Asimismo, se prevé que la evaluación de materiales innovadores —entre ellos los polímeros reforzados con fibra (FRP), el bambú tratado, los hormigones modificados con aditivos ecológicos y el acero inoxidable reciclado— demuestre ventajas significativas en cuanto a durabilidad, estabilidad química y resistencia frente a ambientes marinos agresivos. Estos materiales, seleccionados por su carácter sostenible y su potencial anticorrosivo, proyectan superar las limitaciones de los materiales tradicionales en términos de vida útil, mantenimiento y desempeño estructural.

De igual manera, se espera que el análisis económico y ambiental evidencie que el uso de materiales innovadores, pese a implicar una inversión inicial más alta, representa una alternativa más rentable y sostenible a largo plazo. Su mayor durabilidad y menor frecuencia de mantenimiento contribuirán a reducir costos operativos y la generación de residuos, favoreciendo infraestructuras más resilientes y alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Finalmente, se estima que la investigación permitirá formular lineamientos técnicos y recomendaciones aplicables a proyectos de infraestructura costera, orientadas a promover la adopción de materiales ecológicos e innovadores, así como estrategias de diseño que prolonguen la vida útil de las estructuras y mitiguen los efectos de la corrosión marina. Estas conclusiones proyectadas servirán como base para futuras investigaciones y para la toma de decisiones en el desarrollo de obras civiles sostenibles en zonas costeras del Caribe colombiano.

## Recomendaciones

Del diseño metodológico y análisis de los materiales seleccionados, se plantean las siguientes recomendaciones:

- Priorizar el uso de materiales innovadores resistentes a la corrosión, como FRP, acero inoxidable reciclado y hormigones con aditivos ecológicos, especialmente en...
- Incorporar evaluaciones ambientales y económicas basadas en el ciclo de vida (LCA) durante la etapa de diseño, para asegurar que las decisiones constructivas sean coherentes con...
- Aplicar recubrimientos ecológicos y sistemas de protección catódica cuando se implementen materiales metálicos en zonas de alta salinidad, con el fin de retrasar el inicio de la...
- Adaptar las estrategias constructivas a las condiciones ambientales específicas de Santa Marta, considerando parámetros como humedad relativa, exposición solar, vientos...
- Fortalecer los programas de monitoreo y mantenimiento preventivo, incorporando sensores o registradores de datos (data loggers) que permitan medir la evolución de la...
- Promover la investigación continua, incluyendo ensayos a escala real en infraestructuras piloto ubicadas en la zona costera, para validar experimentalmente los resultados.

## **Impacto Ambiental**

El presente proyecto tiene un impacto ambiental positivo al fomentar la selección y uso de materiales sostenibles en infraestructuras costeras expuestas a la corrosión marina. Al promover el uso de materiales innovadores como el FRP, el bambú tratado, el hormigón con aditivos reciclados y el acero inoxidable reciclado, la investigación busca reducir la generación de residuos derivados del deterioro acelerado de materiales tradicionales, disminuyendo la necesidad de reparaciones frecuentes y reemplazos prematuros.

Asimismo, el enfoque basado en la evaluación del ciclo de vida (LCA) contribuye a reducir la huella de carbono asociada a la construcción en zonas costeras, al incentivar materiales de menor impacto ambiental y procesos productivos más limpios. El empleo de materiales reciclados y biocompuestos favorece la economía circular, disminuye el consumo de recursos no renovables y promueve la conservación de los ecosistemas costeros afectados por actividades constructivas.

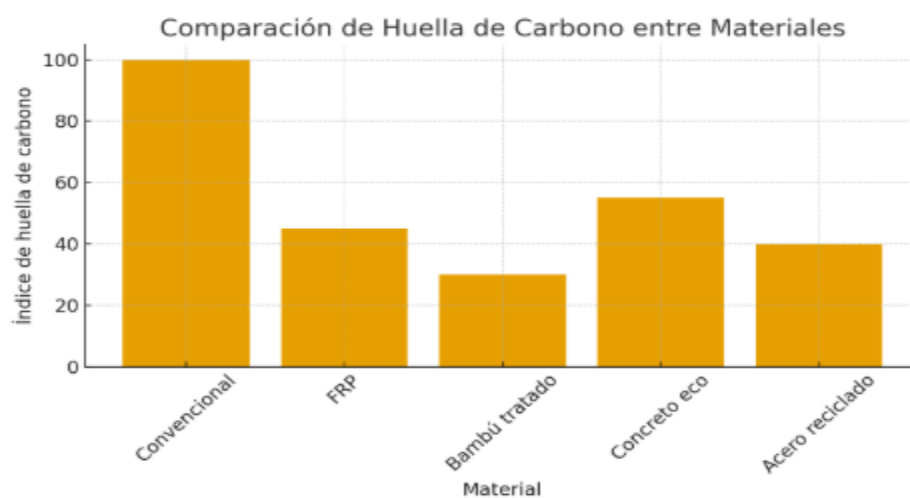
El proyecto también genera un impacto positivo indirecto al aumentar la vida útil de las infraestructuras costeras, reduciendo las afectaciones ambientales asociadas al deterioro estructural, como desprendimiento de fragmentos, contaminación del agua y degradación paisajística.

Finalmente, al alinear los resultados con los ODS 9, 11 y 13, el proyecto impulsa prácticas constructivas responsables que contribuyen a la resiliencia climática y a la sostenibilidad urbana en Santa Marta.

*Apoyo visual*

**Figura 8**

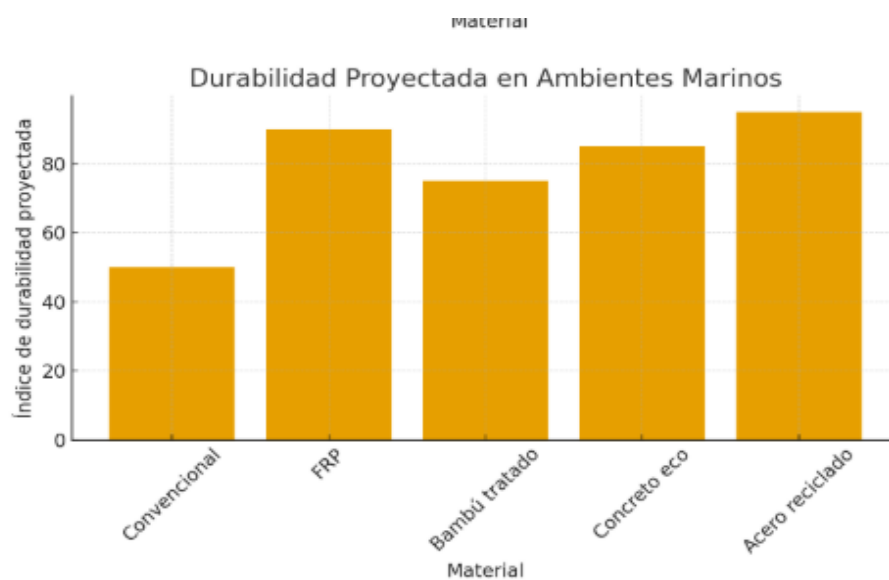
*Comparación de Huella de Carbono entre Materiales*



*Fuente. Autoría Propia*

**Figura 9**

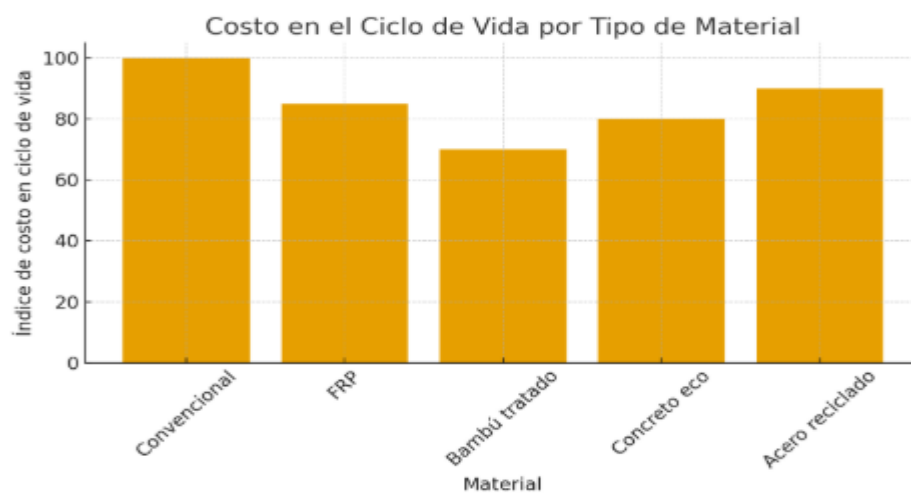
*Costo en el ciclo de vida por tipo de material*



*Fuente. Autoría Propia*

**Figura 10**

*Durabilidad Proyectada en Ambientes Marinos*



*Fuente. Autoría Propia*

## Bibliografía

- Akbarov, K., Berdimurodov, E., Kholikov, A., Guo, L., & Verma, C. (2022). Proceso de desarrollo de inhibidores de corrosión ecológicos. En L. Guo, C. Verma, & D. Zhang (Eds.), *Inhibidores de corrosión ecológicos* (pp. 27–42). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91176-4.00026-X>
- Alcaldía de Santa Marta. (2020). *Plan de Desarrollo Distrital 2020–2023: “Santa Marta, ciudad del cambio, el futuro es ahora”*. <https://www.santamarta.gov.co/sites/default/files/plan-de-desarrollo-2020-2023.pdf>
- ArchDaily. (2022). *Junglas de hormigón: 6 alternativas al cemento que pueden reducir su impacto en las ciudades*. <https://www.archdaily.co/co/986741/junglas-de-hormigon-6-alternativas-al-cemento-que-pueden-reducir-su-impacto-en-las-ciudades>
- ArchDaily. (2022). *Materiales sostenibles: Uso de aditivos nanoestructurados en hormigones ecológicos*. <https://www.archdaily.co>
- Aslam, J., Aslam, R., & Aslam, A. (2022). Aminoácidos y sus derivados como inhibidores de corrosión. En L. Guo, C. Verma, & D. Zhang (Eds.), *Inhibidores de corrosión ecológicos* (pp. 311–330). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91176-4.00015-5>
- Corvo, F., Pérez, T. R., & Ramos, T. (1997). Atmospheric corrosivity in the Caribbean area. *Corrosion Science*, 39(3), 495–515. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(96\)00138-2](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(96)00138-2)
- Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (4th ed.). SAGE Publications.

- DANE. (2022). *Censo nacional de población y vivienda – Santa Marta*. <https://www.dane.gov.co>
- Daneshian, B., et al. (2023). Effect of climatic parameters on marine atmospheric corrosion. *npj Materials Degradation*. <https://www.nature.com/articles/s41529-023-00329-6>
- Fan, B., Hao, H., & Zhu, H. (2022). Inhibidores de corrosión supramoleculares para sistemas de agua de refrigeración. En L. Guo, C. Verma, & D. Zhang (Eds.), *Inhibidores de corrosión ecológicos* (pp. 79–110). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91176-4.00010-6>
- Fontana, M. G. (2005). *Corrosion engineering* (3rd ed.). McGraw-Hill Education.
- Guo, L., Verma, C., & Zhang, D. (2022). *Inhibidores de corrosión ecológicos*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-02087-8>
- Guo, L., Verma, C., & Zhang, D. (2022). Prefacio. En *Inhibidores de corrosión ecológicos* (pp. xv–xvi). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91176-4.00061-1>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2018). *Metodología de la investigación* (6.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.
- IDEAM. (2023). *Clima y tiempo – Región Caribe*. <https://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima>
- INVEMAR. (2022). *Sistema de Información Ambiental Marina de Colombia (SIAM)*. <https://siam.invemar.org.co>
- ISF Colombia. (s. f.). *Ecomateriales y construcción sostenible* [PDF]. Universidad de los Andes. <https://isfcolombia.uniandes.edu.co/images/documentos/5dejulioecomateriales1.pdf>

- ISO. (2012). *ISO 9223:2012 — Corrosion of metals and alloys—Corrosivity of atmospheres—Classification, determination and estimation*. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/53499.html>
- Jones, D. A. (2013). *Principles and prevention of corrosion* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Koch, G. H., Brongers, M. P. H., Thompson, N. G., Virmani, Y. P., & Payer, J. H. (2001). *Corrosion costs and preventive strategies in the United States* (FHWA-RD-01-156). U.S. Department of Transportation / NACE International. <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/40697>
- Morcillo, M., Chico, B., Díaz, I., Cano, H., & de la Fuente, D. (1999). Atmospheric corrosion in tropical humid climates. *Corrosion Science*. [https://www.researchgate.net/publication/274312161\\_Atmospheric\\_corrosion\\_in\\_tropical\\_humid\\_climates](https://www.researchgate.net/publication/274312161_Atmospheric_corrosion_in_tropical_humid_climates)
- NACE International. (2016). *International measures of prevention, application and economics of corrosion technology (IMPACT)*. <https://impact.nace.org/executive-summary.aspx>
- Seechurn, Y., et al. (2022). Marine atmospheric corrosion of carbon steel in the tropical environment. *Materials and Corrosion*. <https://doi.org/10.1002/maco.202112871>
- Troy Dualam. (s. f.). *Innovaciones en materiales resistentes a la corrosión*. <https://troydualam.com/es/innovations-in-corrosion-resistant-materials>
- Troy Dualam. (s. f.). *Composites para ambientes marinos: FRP y sus aplicaciones*. <https://www.troydualum.com>

- WBCSD. (2000). *Eco-efficiency: Creating more value with less impact*. World Business Council for Sustainable Development. <https://docs.wbcsd.org/2000/06/EcoEfficiency-CreatingMoreValueWithLessImpact.pdf>
- Wilmsmeier, G., et al. (2020). Climate change adaptation and mitigation in ports. En *Advances in Colombia*. Politeknik NSC Surabaya.
- World Bank. (2021). *Colombia country climate profile*. Climate Change Knowledge Portal. [https://climateknowledgeportal.worldbank.org/sites/default/files/country-profiles/16698-WB\\_Colombia%20Country%20Profile-WEB.pdf](https://climateknowledgeportal.worldbank.org/sites/default/files/country-profiles/16698-WB_Colombia%20Country%20Profile-WEB.pdf)
- World Steel Association. (2022). *Recycling steel*. <https://worldsteel.org/steel-by-topic/sustainability/recycling-steel/>
- World Steel Association. (2022). *Sustainable steel: Indicators 2022*. <https://worldsteel.org>
- Zhang, Y., Tan, B., & Zhu, M. (2022). Fabricación controlable de inhibidores de corrosión basados en puntos de carbono con propiedades de fluorescencia. En L. Guo, C. Verma, & D. Zhang (Eds.), *Inhibidores de corrosión ecológicos* (pp. 505–526). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91176-4.00018-0>
- Zhou, C., Zhu, C., & Zhang, X. (2022). Técnicas modernas de prueba y análisis de corrosión. En L. Guo, C. Verma, & D. Zhang (Eds.), *Inhibidores de corrosión ecológicos* (pp. 429–450). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91176-4.00002-7>