



Conservación de las praderas de pastos marinos como **estrategia de adaptación al cambio climático** y **protección costera** en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina

Presentado por **Blue Indigo Foundation**

Con el apoyo técnico de la **Universidad Nacional de Colombia**

Ficha del proyecto

Nombre del proyecto	Conservación de las praderas de pastos marinos como estrategia de adaptación al cambio climático y protección costera en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina
Entidad líder	Blue Indigo Foundation
Colaborador técnico	Universidad Nacional de Colombia – Sede Caribe
Aliados involucrados	Fondo Acción, CORALINA, Seawolf, Ecocircular, operadores turísticos locales
Duración de la experiencia	Enero 2025 – Marzo 2026
Área de implementación	Haynes Cay – Rose Cay, San Andrés Islas
Fecha de esta versión	Mayo 2026

Esta actividad se realiza en el marco de la iniciativa Fi Wi Riif de Fondo Acción, con el apoyo de Corporación Coralina, Parques Nacionales Naturales de Colombia, Fundación Prosealand y Fundación Providence, financiado por Blue Action Fund.

Antecedentes

Las praderas de pastos marinos son uno de los ecosistemas costeros más importantes del planeta. Actúan como infraestructuras naturales que estabilizan sedimentos, protegen la línea de costa, almacenan carbono azul y sostienen biodiversidad marina clave para la pesca y el turismo.

A nivel global se ha perdido cerca del 29 % de su cobertura histórica, con tasas de disminución cercanas al 7 % anual en las últimas décadas (Waycott et al., 2009; Potouroglou et al., 2020). En Colombia, las praderas se concentran en el Caribe, especialmente en la Reserva de Biosfera Seaflower.



Figura 1. Praderas de pastos marinos en Haynes Cay.

Reto

En el complejo Rose Cay–Haynes Cay (figura 2), en la isla de San Andrés, se evidenció un proceso activo de erosión en el borde sur de una pradera de pastos marinos que cubre aproximadamente 160.000 m². El frente erosionado alcanza cerca de 200 metros lineales, con alturas de socavación entre 30 y 100 cm, generando exposición de rizomas, debilitamiento del entramado radicular y riesgo de fragmentación del parche.

La pérdida de sedimento en el borde interrumpe la retroalimentación positiva entre vegetación y sustrato que caracteriza a estos ecosistemas. Cuando el sedimento se pierde, el sistema pasa de una dinámica estabilizadora a un ciclo erosivo que puede acelerar la degradación estructural de la pradera (Folmer et al., 2012; Potouroglou et al., 2020).

La relevancia de este proceso trasciende la escala local. Los pastos marinos cumplen funciones esenciales en la mitigación del cambio climático, almacenando carbono azul tanto en biomasa subterránea como en sedimentos durante escalas temporales prolongadas (Duarte & Chiscano, 1999; Fourqurean et al., 2012; Duarte et al., 2013). A nivel global, estos ecosistemas han experimentado una disminución acelerada en cobertura, alcanzando tasas de pérdida de hasta 7% anual en décadas recientes (Waycott et al., 2009; Potouroglou et al., 2020). En Colombia, donde los pastos marinos se restringen al Caribe, también se han reportado reducciones de área asociadas a presiones antrópicas y eventos extremos (Díaz et al., 2003; INVEMAR–CORALINA, 2020).

En este contexto, la erosión detectada en Haynes Cay representaba una amenaza localizada pero potencialmente progresiva para un ecosistema aún funcional y estratégico para la protección costera, la biodiversidad y la economía turística isleña.

Partiendo de esta situación es donde el proyecto Más Praderas Verdes surge como una intervención piloto de restauración basada en procesos ecológicos, orientada a mitigar la erosión costera mediante una solución basada en la naturaleza (SbN) adaptable.

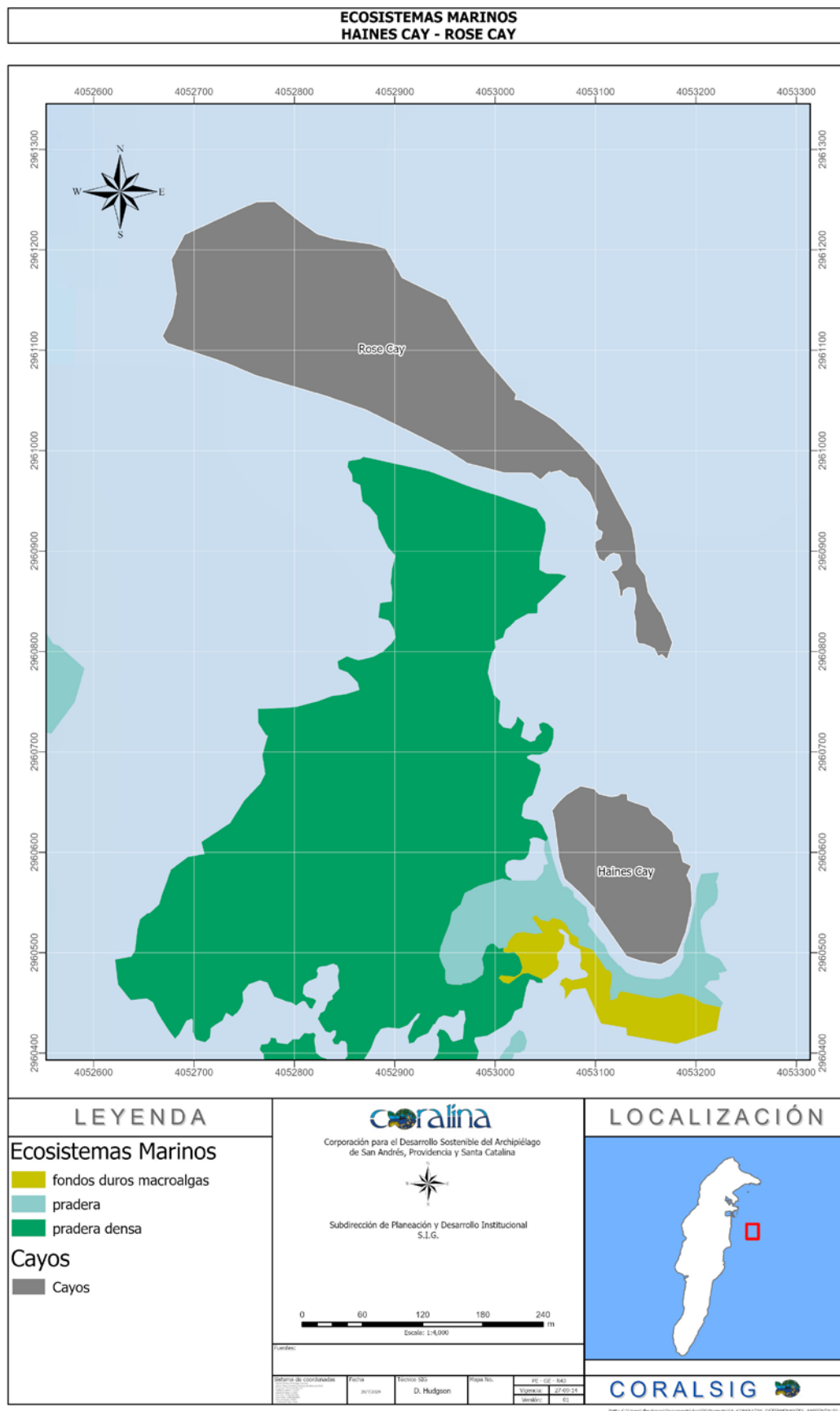


Figura 2. Localización de la pradera de Haynes Cay, Rose Cay en San Andrés, Caribe colombiano (Coralina, 2024).

Diagnóstico Ecológico

Previo a cualquier intervención física, se realizó un diagnóstico (figura 3) integral del estado ecológico mediante el Protocolo Indicador de Condición-Tendencia para Praderas de Pastos Marinos (ICTPM) (Gómez-López et al., 2014).

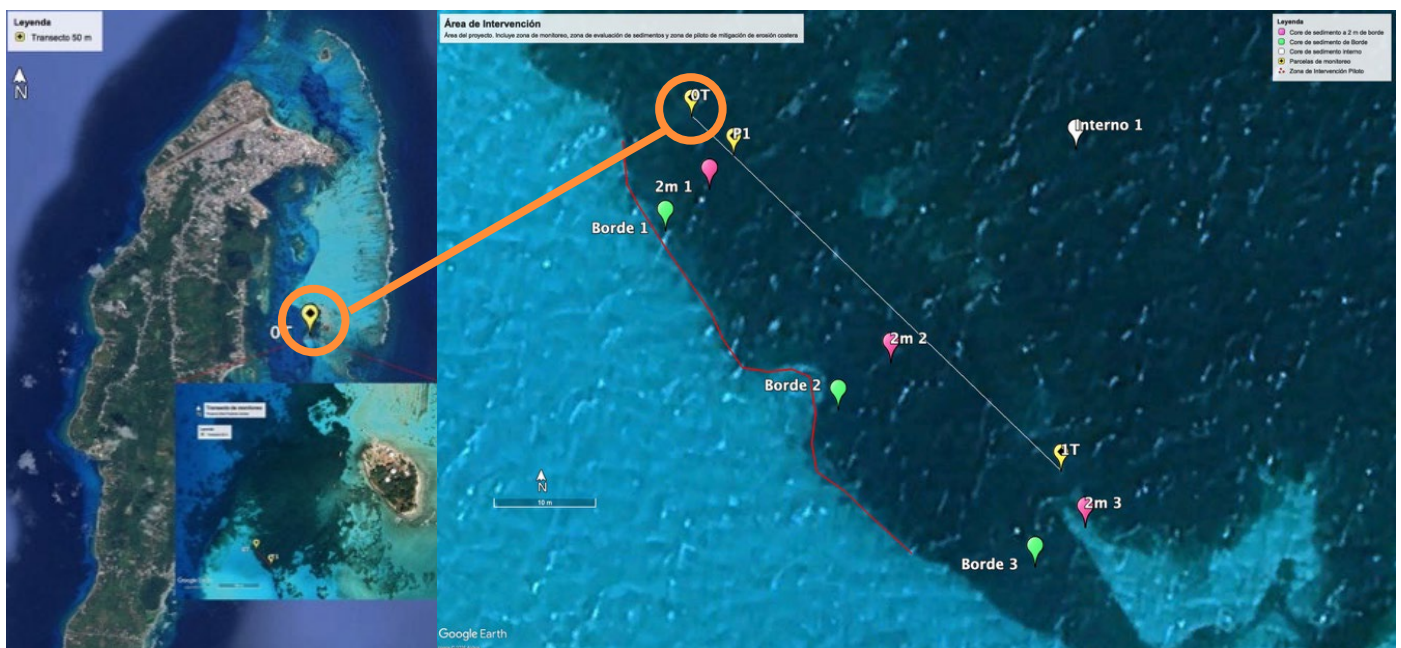


Figura 3. Ubicación de parcelas de monitoreo y del área de intervención (der.).

Los resultados indicaron que la pradera mantenía una condición clasificada como “deseable”, con coberturas superiores al 80% y alta inversión en biomasa subterránea. Las densidades foliares registradas para *Syringodium filiforme* y *Thalassia testudinum* se ubicaron dentro de los rangos de referencia para praderas en buen estado de conservación según INVEMAR-CORALINA (2020). Asimismo, no se detectó la presencia de *Labyrinthula spp.*, patógeno históricamente asociado a eventos de mortalidad masiva en praderas marinas (Ralph & Short, 2002; Sullivan et al., 2013). Las variables fisicoquímicas medidas en campo –temperatura, salinidad, conductividad y pH– se mantuvieron dentro de rangos adecuados para el desarrollo de las especies registradas, descartando problemas de calidad del agua como causa primaria del proceso erosivo. Este diagnóstico permitió concluir que el ecosistema conservaba resiliencia estructural y funcional, y que la erosión observada era un fenómeno localizado susceptible de ser abordado mediante restauración topográfica basada en procesos.

Enfoque de restauración

La intervención se fundamentó en un enfoque de restauración ecológica basada en procesos, en coherencia con las guías técnicas nacionales del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2012). En lugar de implementar infraestructura rígida, se priorizó la recuperación de las dinámicas naturales de sedimentación que sostienen la estabilidad del sistema.

Los pastos marinos reducen la velocidad del flujo dentro del dosel vegetal y disminuyen el esfuerzo cortante sobre el fondo, favoreciendo la deposición de partículas finas. A su vez, el sustrato estable facilita la expansión rizomatosa y consolida la pradera (Folmer et al., 2012; Potouroglou et al., 2020). El objetivo del piloto fue restablecer esta retroalimentación positiva interrumpida por la pérdida de sedimento en el borde.

El sitio debe cumplir con las siguientes condiciones:

- Cobertura vegetal alta (preferiblemente >70%).
- Biomasa subterránea dominante y presencia de rizomas activos.
- Erosión localizada en borde de parche, no generalizada.
- Calidad de agua dentro de rangos adecuados.
- Ausencia de enfermedades masivas.
- Accesibilidad logística para instalación submarina.
- Viabilidad normativa para intervención.

La erosión (figura 4) debe identificarse como un proceso físico activo (socavación del borde, exposición vertical de talud o rizomas visibles), pero no como un proceso irreversible de pérdida sistémica.



Figura 4. Erosión de borde de las praderas de pastos marinos en Haynes Cay.

El diseño también incorporó principios de economía circular mediante el uso de ladrillos fabricados con arena proveniente de vidrio reciclado, integrando sostenibilidad material a la restauración ecológica.

Solución Implementada

La solución basada en la naturaleza consistió en la instalación de 600 sacos de yute rellenos con piedra calcárea de grado medio (figura 5), complementados con 120 ladrillos de concreto elaborados con arena de vidrio reciclado. La estructura se dispuso de manera continua a lo largo de 64 metros lineales del borde más críticamente afectado, a una profundidad aproximada de cinco metros.



Figura 5. Preparación de las SbN, sacos de yute rellenos de piedra calcárea.

El carácter permeable de la intervención permitió disipar la energía hidrodinámica incidente sin generar una barrera rígida que alterara abruptamente el flujo natural, en línea con enfoques documentados para sistemas de protección costera flexibles (Hornsey et al., 2011; Ondiviela et al., 2014). El yute fue seleccionado por su carácter biodegradable y bajo impacto ambiental, mientras que los ladrillos reciclados aportaron peso estructural adicional sin evidencias de liberación de contaminantes.

La instalación se realizó en diciembre de 2025, posteriormente hubo una evaluación en enero de 2026 y una inspección en marzo de 2026.



Figura 6. Instalación de Solución basada en la naturaleza (SbN) en diciembre de 2025.

Resultados Iniciales

La evaluación posterior a la intervención (figura 7) evidenció una reducción visible de la socavación activa en el tramo intervenido, acumulación progresiva de sedimento fino detrás de la estructura y ausencia de nuevos rizomas expuestos. No se registraron desplazamientos significativos ni fallas estructurales tras eventos de mayor energía asociados al oleaje de finales de diciembre de 2025 e inicios de 2026.



Figura 7. Evaluación de integridad e integración de la Solución basada en la naturaleza (SbN)

La estabilización física observada sugiere que se restablecieron condiciones favorables para que el sistema retome su dinámica natural de expansión rizomatosa y consolidación del sustrato, reforzando la resiliencia ecológica del parche.

Apropiación Social y Gobernanza

El proyecto integró un componente de sensibilización dirigido a operadores turísticos y actores locales vinculados al uso del área. Estas acciones buscaron reducir impactos asociados al tránsito de embarcaciones, particularmente daños por hélices y anclaje, cuya recuperación puede tardar décadas en ausencia de intervención activa (Hall et al., 2006).



Figura 8. Primera socialización del proyecto Mas Praderas Verdes.

La articulación entre restauración física y apropiación social fortalece la sostenibilidad a largo plazo, al reconocer que la mitigación de la erosión requiere no solo estabilización estructural, sino también gestión de presiones derivadas de impactos y actividades humanas.

Lecciones Aprendidas

1. Diagnóstico ecológico previo

La principal lección del piloto es que toda intervención física en praderas marinas debe sustentarse en un diagnóstico ecológico integral que confirme la viabilidad de una restauración basada en procesos. En Haynes Cay, la aplicación del protocolo ICTPM clasificó la pradera en condición “deseable”, con cobertura superior al 80 %, predominancia de biomasa subterránea y ausencia de *Labyrinthula spp.*. Esta evidencia confirmó que el sistema mantenía integridad funcional y resiliencia ecológica, lo que aumentaba la probabilidad de éxito de una intervención topográfica localizada.

El diagnóstico debe incluir:

} Evaluación ecológica:

- Cobertura porcentual.
- Densidad de vástagos.
- Estimación de biomasa aérea y subterránea.
- Presencia de epifitismo excesivo.
- Presencia de patógenos.
- Estado fenológico general.

} Evaluación fisicoquímica:

- Temperatura.
- Salinidad.
- pH.
- Oxígeno disuelto.
- Transparencia.

} Evaluación geomorfológica:

- Altura del talud erosionado.
- Longitud del borde afectado.
- Tipo de sedimento.
- Evidencia de transporte sedimentario.
- Identificación de fuentes de energía (oleaje, corrientes, tránsito de embarcaciones).

La intervención solo se justifica cuando el sistema conserva capacidad de auto regeneración pero presenta un punto crítico de inestabilidad física. La implicación directa para replicación y escalamiento es clara: intervenir únicamente en praderas que conserven capacidad de recuperación natural reduce riesgos técnicos y financieros. Restaurar sistemas colapsados estructuralmente implica dinámicas distintas y mayor incertidumbre.



Figura 9. Monitoreo de las praderas de pastos marinos en Haynes Cay.

Técnicamente, se recomienda replicar solo en áreas donde la pradera conserve alta biomasa rizomatosa y condiciones fisicoquímicas adecuadas, incorporando evaluación previa obligatoria como criterio de elegibilidad del sitio.

2. Enfoque basado en procesos

El piloto demostró que restaurar la retroalimentación positiva entre vegetación y sedimento es más efectivo que implementar soluciones rígidas tradicionales. La instalación de la estructura permeable redujo la socavación y favoreció la acumulación de sedimento fino detrás de la solución basada en la naturaleza (SbN), integrándose progresivamente al borde de la pradera.



Figura 10. Integración de la SbN con las praderas.

Para el escalamiento, esta experiencia indica que deben priorizarse soluciones adaptativas y permeables que disipen energía sin interrumpir abruptamente la dinámica hidrodinámica. Las estructuras duras pueden alterar patrones de flujo y generar erosión en zonas adyacentes.

Se recomienda mantener diseño de baja altura, permeable y alineado con la curvatura natural del parche, e incorporar modelación hidrodinámica básica previa a nuevas intervenciones para optimizar ubicación y orientación.

3. Eficacia estructural

La combinación de 600 sacos de yute rellenos con piedra calcárea y 120 ladrillos elaborados con arena de vidrio reciclado proporcionó estabilidad hidráulica y soporte estructural suficiente. Durante eventos de mayor energía registrados entre diciembre de 2025 y enero de 2026 no se evidenciaron desplazamientos ni fallas estructurales.



Figura 11. Combinación de materiales biodegradables con elementos de refuerzo.

La mezcla de materiales biodegradables con elementos de refuerzo demostró que es posible lograr estabilidad sin rigidizar el sistema. Esto ofrece una alternativa intermedia entre infraestructura gris y soluciones exclusivamente blandas.

Para escalamiento, se recomienda definir la proporción óptima entre sacos y elementos de refuerzo según la energía local del sitio, e incorporar refuerzos adicionales en los extremos de cada tramo para prevenir erosión lateral.

4. Retención de sedimentos

Una de las señales más claras de éxito temprano fue la acumulación progresiva de sedimento fino detrás de la estructura. Sectores que presentaban socavaciones de hasta 80–100 cm mostraron deposición posterior a la instalación.

La retención sedimentaria emerge como indicador clave de desempeño en fases iniciales. En replicaciones futuras, el monitoreo debe incluir mediciones cuantitativas de tasa de sedimentación y levantamientos batimétricos pre y post intervención para evaluar cambios en el perfil del borde.



Figura 12. Acumulación de sedimentos sobre la SBN.

5. Material biodegradable (yute)

El uso de yute resultó apropiado como componente central de la SbN debido a su carácter biodegradable y compatibilidad ecológica. Sin embargo, su degradación natural implica necesidad de seguimiento y mantenimiento.

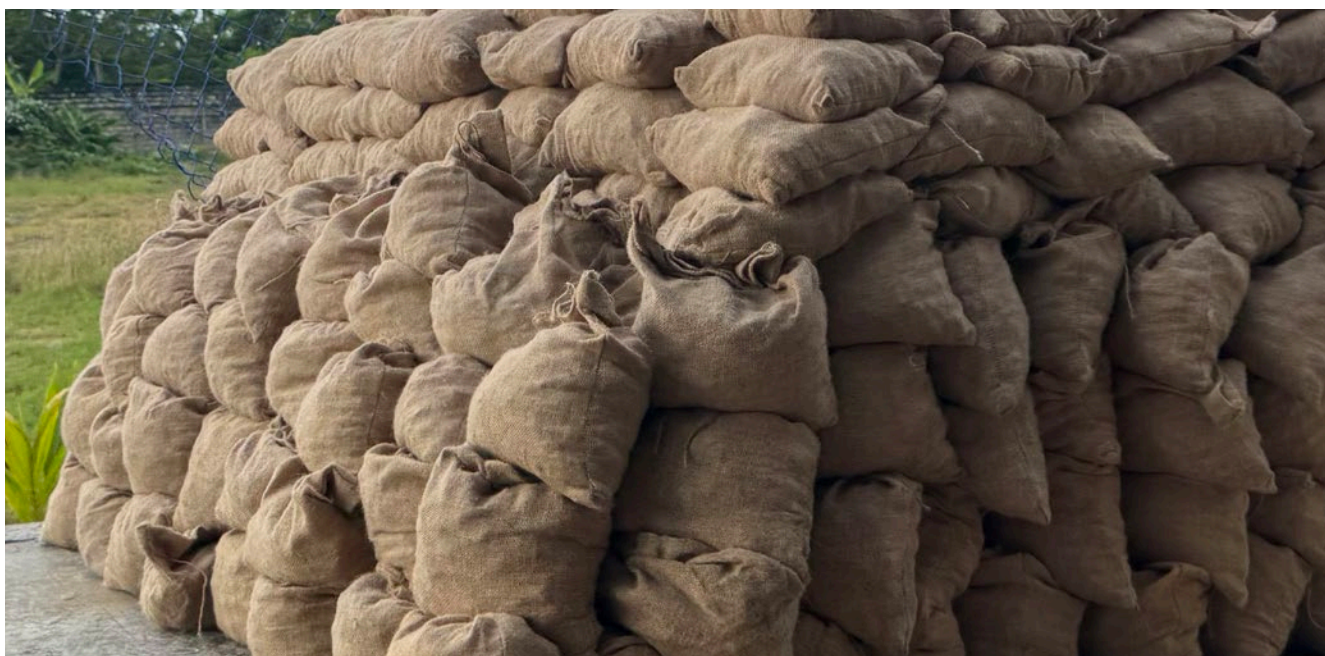


Figura 13. Sacos de yute utilizados.

Para el escalamiento, es indispensable incorporar un plan de mantenimiento programado. Se recomienda establecer revisiones semestrales y prever reposición parcial entre los 3–6 meses y nuevamente entre los 12–18 meses, dependiendo del ritmo de degradación observado y de la escala del proyecto.

6. Economía circular

El uso de ladrillos fabricados con arena proveniente de vidrio reciclado fue ambientalmente compatible y estructuralmente eficiente. No se evidenció liberación de partículas contaminantes ni alteraciones fisicoquímicas posteriores a la instalación.

Integrar materiales reciclados fortalece la sostenibilidad ambiental y la aceptación social del proyecto, al vincular restauración ecológica con gestión responsable de residuos.

Se recomienda formalizar alianzas con gestores locales de residuos para asegurar suministro continuo, trazabilidad y estandarización de calidad del material en futuras fases.

7. Limitación espacial del piloto

Aunque inicialmente se proyectaba intervenir un tramo mayor, finalmente se instalaron 64 metros lineales debido a la necesidad de rellenar sustrato bajo el borde erosionado. Esta reducción permitió concentrar recursos y aumentar efectividad local.

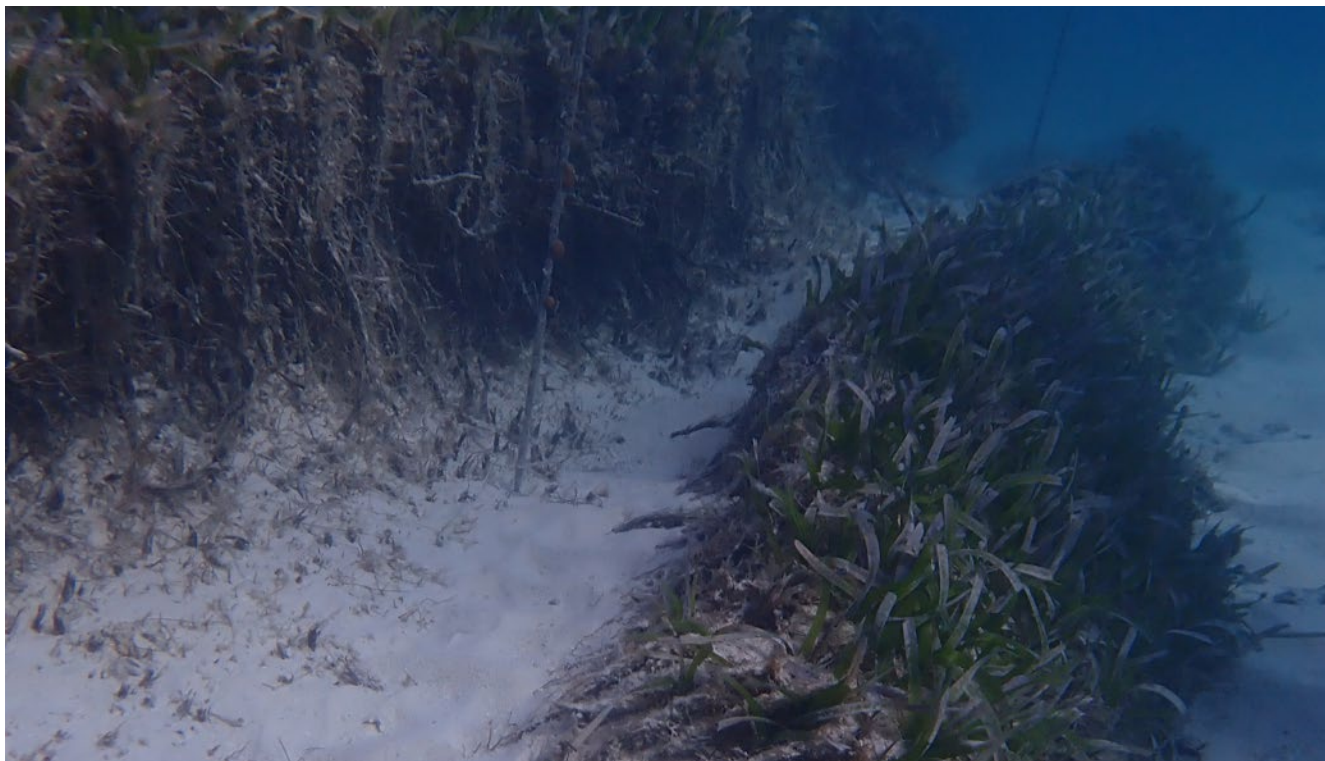


Figura 14. Área críticamente afectada por la erosión.

La lección para el escalamiento es que las intervenciones deben planearse por fases priorizando zonas críticas. No siempre la mayor cobertura espacial produce mayor impacto si las condiciones locales requieren ajustes.

Se recomienda implementar intervenciones por tramos priorizados según nivel de socavación y exposición de rizomas, asegurando consolidación progresiva antes de expandir cobertura.

8. Control de presiones externas

El tránsito de embarcaciones continúa siendo un factor de riesgo estructural. La literatura y las observaciones locales confirman que daños por hélices y anclaje pueden comprometer la recuperación del sistema.

La restauración física sin gestión del uso marítimo reduce sostenibilidad a largo plazo. Para replicación, debe integrarse regulación complementaria, delimitación de zonas de exclusión y uso de boyas ecológicas.

9. Monitoreo adaptativo

El seguimiento realizado en enero de 2026 permitió confirmar estabilidad estructural y ausencia de nuevos procesos erosivos en la zona intervenida. El monitoreo temprano validó el desempeño inicial de la solución.

El éxito del escalamiento dependerá de sistemas de monitoreo continuo que integren indicadores físicos (perfil del borde y sedimentación), ecológicos (densidad de vástagos, cobertura, biomasa) y sociales (cumplimiento de buenas prácticas).

Se recomienda diseñar un sistema de monitoreo adaptativo desde la fase de planificación, con metas diferenciadas por horizonte temporal.

10. Resiliencia ecosistémica

La alta biomasa subterránea registrada favoreció la consolidación rápida del sustrato tras la intervención. La predominancia de raíces y rizomas vivos fue un factor crítico para la estabilidad posterior.

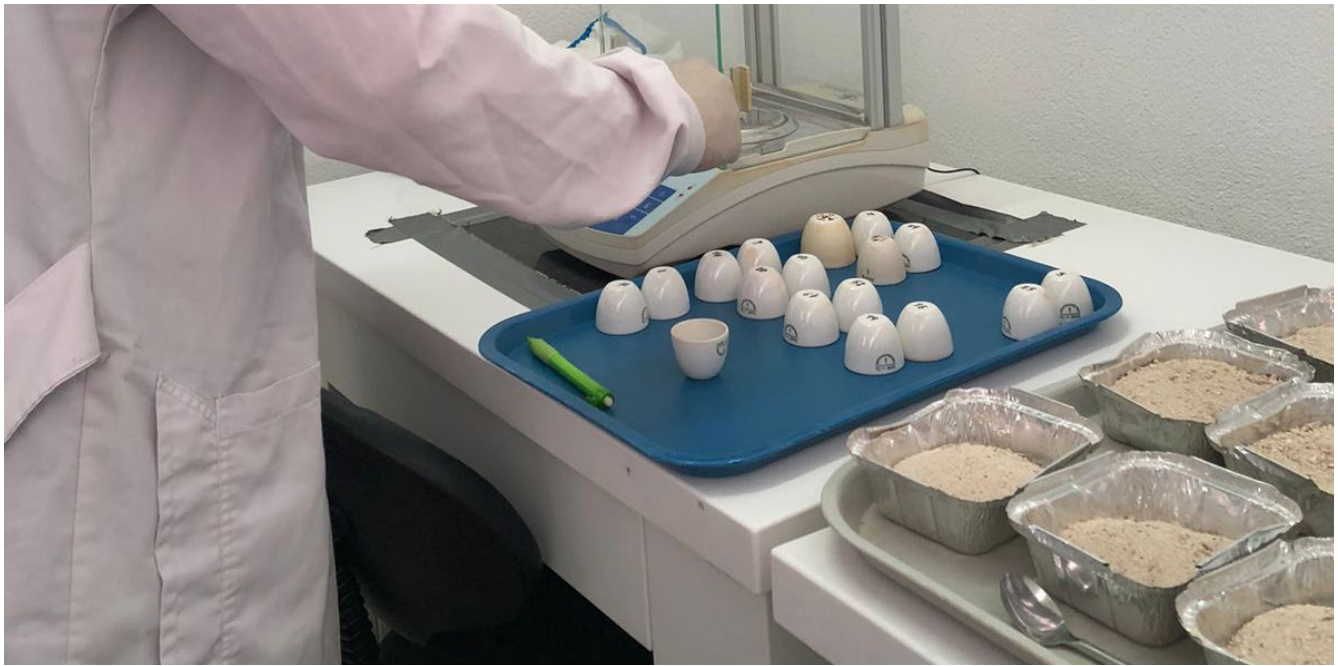


Figura 15. Evaluación de biomasa y sustrato en los laboratorios de UNAL-Sede Caribe.

Para replicación, se debe priorizar praderas con alta inversión subterránea. Se recomienda evaluar la proporción biomasa aérea/subterránea como criterio técnico de selección de sitios.

11. Tiempo de respuesta ecológica

Los procesos de recolonización y expansión lateral en *Thalassia testudinum* y *Syringodium filiforme* son graduales debido a su biología y tasas de crecimiento. Aunque la estabilidad física fue inmediata, la expansión vegetal es esperada a mediano plazo.

El escalamiento debe contemplar horizontes de evaluación superiores a tres años. Se recomienda establecer metas diferenciadas: estabilidad física en corto plazo, expansión rizomatosa en mediano plazo y aumento neto de cobertura en largo plazo.

12. Articulación institucional

La alianza entre Blue Indigo Foundation y la Universidad Nacional de Colombia – Sede Caribe fortaleció el rigor técnico y la legitimidad del proyecto. La emisión de concepto técnico formal sobre la SBN aportó respaldo científico.

El escalamiento requerirá articulación interinstitucional sostenida. Se recomienda formalizar memorandos de entendimiento para nuevas intervenciones, asegurando continuidad técnica.

13. Dimensión social

La sensibilización con operadores turísticos fue determinante para la sostenibilidad del proyecto. Más de 40 personas participaron en jornadas de capacitación y en la campaña “*Respect the Locals*”.



Figura 16. Socialización del proyecto y lanzamiento de *Respect the Locals* por Seawolf.

La replicación sin componente social reduce efectividad a largo plazo. Se recomienda incluir estrategia obligatoria de educación ambiental antes y después de cada intervención.

14. Adaptabilidad del diseño

La estructura funcionó como medida adaptable, no definitiva. Su carácter permeable y biodegradable permite ajustes progresivos según resultados de monitoreo.

Para escalamiento, debe mantenerse flexibilidad de diseño evitando sobredimensionamiento. Se recomienda aplicar el principio de “mínima intervención efectiva”, ajustando la solución según desempeño observado.

15. Costo-efectividad potencial

La solución empleó materiales accesibles y mano de obra local, con llenado manual y transporte en embarcaciones del territorio. Esto demuestra viabilidad en contextos insulares con recursos limitados.

Para fortalecer argumentos financieros en futuras fases, se recomienda documentar costos unitarios por metro lineal intervenido y compararlos con alternativas de infraestructura gris, destacando beneficios adicionales en carbono azul y servicios ecosistémicos.

Matriz de lecciones aprendidas del proyecto Mas Praderas Verdes

Dimensión	Lección aprendida	Evidencia del piloto en Haynes Cay	Implicaciones para replicación y escalamiento	Recomendaciones técnicas y estratégicas
1. Diagnóstico ecológico previo	La intervención física debe sustentarse en un diagnóstico ecológico integral que confirme la viabilidad de restauración basada en procesos.	ICTPM clasificó la pradera en condición deseable (>80 % cobertura; biomasa subterránea dominante; ausencia de <i>Labrynthula spp.</i>).	Intervenir praderas con integridad ecológica funcional aumenta probabilidad de éxito y reduce riesgo de intervención innecesaria.	Replicar solo en áreas donde la pradera conserve capacidad de resiliencia (alta biomasa rizomatosa y calidad fisicoquímica adecuada).
2. Enfoque basado en procesos	Restaurar la retroalimentación positiva vegetación-sedimento es más efectivo que soluciones rígidas tradicionales.	Disminución de socavación y acumulación de sedimento fino detrás de la SbN. Integración progresiva al borde.	El escalamiento debe priorizar soluciones permeables y adaptativas en lugar de estructuras duras que alteren el flujo.	Mantener diseño permeable, baja altura y alineación con curvatura natural del parche. Incorporar modelación hidrodinámica básica antes de instalar.
3. Eficacia estructural	La combinación de 600 sacos de yute + 120 ladrillos con arena de vidrio reciclado proporcionó estabilidad hidráulica y soporte estructural.	No se registraron desplazamientos ni fallas estructurales tras eventos de mayor energía (dic 2025–ene 2026).	La mezcla de materiales biodegradables y elementos de refuerzo aumenta estabilidad sin rigidizar el sistema.	En escalamiento, definir proporción óptima saco/ladrillo según energía local. Evaluar refuerzos en extremos para prevenir erosión lateral.
4. Retención de sedimentos	La estructura permitió acumulación de sedimento fino y reducción de exposición de rizomas.	Sectores con erosión previa de 80–100 cm mostraron deposición progresiva posterior a instalación.	La retención sedimentaria es indicador clave de éxito temprano.	Incorporar mediciones cuantitativas de tasa de sedimentación y perfil batimétrico pre y post intervención.
5. Material biodegradable (yute)	El yute es apropiado como solución basada en la naturaleza, pero requiere mantenimiento y seguimiento.	Concepto técnico indica necesidad de monitoreo periódico por carácter biodegradable.	El escalamiento debe considerar plan de mantenimiento programado.	Establecer protocolo de revisión semestral y plan de reposición parcial cada 3-6 meses y de 18–24 meses según degradación observada y la escala del proyecto.

Dimensión	Lección aprendida	Evidencia del piloto en Haynes Cay	Implicaciones para replicación y escalamiento	Recomendaciones técnicas y estratégicas
6.Economía circular	Uso de ladrillos con arena de vidrio reciclado fue ambientalmente compatible y estructuralmente eficiente.	No se evidenció liberación de partículas contaminantes ni alteración fisicoquímica.	Integrar materiales reciclados fortalece sostenibilidad y aceptación social del proyecto.	Formalizar alianzas con gestores locales de residuos para asegurar suministro y estandarización de calidad del material.
7.Limitación espacial del piloto	Solo se intervinieron 64 m lineales de los propuestos, debido a necesidad de rellenar sustrato bajo borde erosionado.	Reducción del área intervenida aumentó efectividad local.	El escalamiento debe planearse por fases priorizando zonas críticas.	Implementar intervención por tramos priorizados según nivel de socavación y exposición de rizomas.
8.Control de presiones externas	El tránsito de embarcaciones sigue siendo factor de riesgo.	Literatura citada y observaciones locales confirman riesgo por hélices y anclaje.	La restauración física sin gestión de uso marítimo reduce sostenibilidad a largo plazo.	Complementar escalamiento con delimitación de zonas de exclusión, boyas ecológicas y regulación de tránsito turístico.
9.Monitoreo adaptativo	El seguimiento visual y ecológico permitió confirmar estabilidad temprana.	Evaluación enero 2026 mostró ausencia de nuevos procesos erosivos en zona intervenida.	El éxito del escalamiento depende de monitoreo continuo y ajustes adaptativos.	Diseñar sistema de monitoreo con indicadores físicos (perfil de borde), ecológicos y sociales (cumplimiento de buenas prácticas).
10.Resiliencia ecosistémica	Alta biomasa subterránea favoreció rápida consolidación del sustrato tras intervención.	Predominancia de raíces y rizomas vivos	Replicar preferentemente en praderas con alta inversión subterránea.	Evaluar proporción biomasa aérea/subterránea antes de intervenir como criterio de selección de sitios.
11.Tiempo de respuesta ecológica	Procesos de recolonización son graduales debido a biología de las especies.	Brotes incipientes esperados; expansión lateral esperada a mediano plazo.	El escalamiento debe contemplar horizontes de evaluación >3 años.	Establecer metas diferenciadas: corto plazo (estabilidad física), mediano plazo (expansión de rizomas), largo plazo (aumento cobertura).

Dimensión	Lección aprendida	Evidencia del piloto en Haynes Cay	Implicaciones para replicación y escalamiento	Recomendaciones técnicas y estratégicas
12. Articulación institucional	La alianza BIF – UNAL fortaleció rigor técnico y legitimidad.	Emisión de concepto técnico formal sobre SbN.	El escalamiento requiere respaldo científico y articulación interinstitucional.	Formalizar MOU para nuevas intervenciones.
13. Dimensión social	La sensibilización con operadores turísticos es clave para sostenibilidad.	>40 personas capacitadas; campaña “Respect the Locals”.	La replicación sin componente social disminuye efectividad a largo plazo.	Incluir estrategia obligatoria de educación ambiental previa y posterior a cada intervención.
14. Adaptabilidad del diseño	La estructura funcionó como medida adaptable, no definitiva.	Carácter permeable y biodegradable permite ajustes.	Escalamiento debe mantener flexibilidad y evitar sobredimensionamiento.	Aplicar principio de “mínima intervención efectiva” y ajustar según monitoreo.
15. Costo-efectividad potencial	Solución basada en materiales accesibles y mano de obra local.	Llenado manual, transporte en embarcaciones locales.	Escalable en contextos insulares con recursos limitados.	Documentar costos unitarios por metro lineal para análisis comparativo frente a infraestructura gris.

Escalabilidad y Relevancia Estratégica

La experiencia en Haynes Cay demuestra que una intervención basada en estructuras permeables, materiales biodegradables y reciclados, y diagnóstico ecológico riguroso puede estabilizar procesos erosivos localizados sin recurrir a infraestructura gris.

El modelo es escalable siempre que se mantengan tres condiciones fundamentales: evaluación ecológica previa para confirmar resiliencia del sistema, monitoreo adaptativo de mediano y largo plazo, y regulación efectiva de presiones externas asociadas al tránsito marítimo. En un contexto de cambio climático y aumento del riesgo costero, este tipo de soluciones basadas en la naturaleza representa una alternativa costo-efectiva con beneficios adicionales en captura de carbono azul, conservación de biodiversidad y protección de medios de vida locales (Duarte et al., 2013; Fourqurean et al., 2012).

El piloto constituye así una base técnica sólida para ampliar intervenciones similares en otros sectores del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, contribuyendo a estrategias regionales de adaptación climática y restauración costera.

Bibliografía

- Díaz, J. M., Guillot, L., & Velandia, M. C. (2003). Praderas de pastos marinos en Colombia: Estado y distribución. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR).
- Duarte, C. M., & Chiscano, C. L. (1999). Seagrass biomass and production: A reassessment. *Aquatic Botany*, 65(1–4), 159–174. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(99\)00038-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(99)00038-8)
- Duarte, C. M., Losada, I. J., Hendriks, I. E., Mazarrasa, I., & Marbà, N. (2013). The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature Climate Change*, 3, 961–968. <https://doi.org/10.1038/nclimate1970>
- Folmer, E. O., van der Geest, M., Jansen, E., Olff, H., Anderson, T. M., Piersma, T., & van Gils, J. A. (2012). Seagrass–sediment feedback: An exploration using a non-linear statistical model. *Ecosystems*, 15, 1384–1393. <https://doi.org/10.1007/s10021-012-9580-0>
- Fourqurean, J. W., Duarte, C. M., Kennedy, H., Marbà, N., Holmer, M., Mateo, M. A., Apostolaki, E. T., Kendrick, G. A., Krause-Jensen, D., McGlathery, K. J., & Serrano, O. (2012). Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. *Nature Geoscience*, 5, 505–509. <https://doi.org/10.1038/ngeo1477>
- Gómez-López, D. I., Alonso, D., Andrade, C., & Garzón-Ferreira, J. (2014). Protocolo Indicador de Condición-Tendencia para Praderas de Pastos Marinos (ICTPM). Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR).
- Hall, M. O., Durako, M. J., Fourqurean, J. W., & Zieman, J. C. (2006). Decadal scale changes in seagrass distribution and abundance in Florida Bay. *Estuaries and Coasts*, 29(3), 445–459. <https://doi.org/10.1007/BF02784990>

- Hornsey, W. P., Thomas, R. E., & Southgate, H. N. (2011). Field testing of a submerged artificial reef for coastal protection. *Coastal Engineering*, 58(9), 841–850. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.04.002>
- INVEMAR–CORALINA. (2020). Atlas de pastos marinos del Caribe colombiano. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras & Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). Guía técnica para la restauración ecológica en Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Ondiviela, B., Losada, I. J., Lara, J. L., Maza, M., Galván, C., Bouma, T. J., & van Belzen, J. (2014). The role of seagrasses in coastal protection in a changing climate. *Coastal Engineering*, 87, 158–168. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.11.005>
- Potouroglou, M., Bull, J. C., Krauss, K. W., Kennedy, H. A., Fusi, M., Daffonchio, D., Mangora, M. M., & Githaiga, M. N. (2020). Measuring the role of seagrasses in regulating sediment surface elevation. *Scientific Reports*, 10, 12317. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69225-y>
- Ralph, P. J., & Short, F. T. (2002). Impact of the wasting disease pathogen, *Labyrinthula zosterae*, on the photosynthesis of eelgrass (*Zostera marina*). *Marine Ecology Progress Series*, 226, 265–271. <https://doi.org/10.3354/meps226265>
- Sullivan, B. K., Sherman, T. D., Damare, V. S., Lilje, O., & Gleason, F. H. (2013). Potential roles of *Labyrinthula spp.* in global seagrass population declines. *Fungal Ecology*, 6(5), 328–338. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2013.06.004>
- Waycott, M., Duarte, C. M., Carruthers, T. J. B., Orth, R. J., Dennison, W. C., Olyarnik, S., Calladine, A., Fourqurean, J. W., Heck, K. L., Hughes, A. R., Kendrick, G. A., Kenworthy, W. J., Short, F. T., & Williams, S. L. (2009). Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(30), 12377–12381. <https://doi.org/10.1073/pnas.0905620106>

Anexo: Guía Metodológica Replicable

Restauración topográfica de praderas marinas mediante soluciones basadas en la naturaleza

Proyecto piloto: Haynes Cay – San Andrés Islas

Duración: Enero 2025 a marzo de 2026

Entidad líder: Blue Indigo Foundation

Problema Identificado

El diagnóstico ecológico inicial evidenció que la pradera de pastos marinos presentaba una condición general favorable. De acuerdo con el Índice de Calidad Trófica para Pastos Marinos (IC-TPM), el ecosistema se clasificó en estado deseable, con una cobertura vegetal superior al 80 %, alta densidad de vástagos y predominancia de biomasa subterránea, lo cual es un indicador clave de estabilidad y resiliencia estructural. La biomasa rizomatosa cumple un papel fundamental en la fijación del sedimento y en la capacidad de recuperación del ecosistema frente a perturbaciones físicas (Waycott et al., 2009). Asimismo, no se detectó presencia de patógenos como *Labyrinthula spp.*, asociados al “*wasting disease*” en pastos marinos, y las variables físico-químicas del agua —incluyendo temperatura, salinidad y transparencia— se mantuvieron dentro de rangos óptimos para el crecimiento de la vegetación marina.

Sin embargo, a pesar de estas condiciones favorables, el diagnóstico identificó un proceso de erosión activa en el borde sur del parche. Se registró exposición de rizomas y pérdida progresiva del soporte sedimentario, con taludes que alcanzaban entre 30 y 100 centímetros de socavación vertical. Esta situación es particularmente crítica porque los pastos marinos dependen de una retroalimentación positiva entre la vegetación y el sedimento: la estructura foliar reduce la energía hidrodinámica y favorece la sedimentación, mientras que el sedimento estabiliza el sistema radicular (Potouroglou et al., 2020). Cuando este equilibrio se altera en los bordes, el ecosistema puede entrar en un ciclo erosivo que debilita la estructura del parche y facilita su fragmentación.

Adicionalmente, se identificó presión antrópica asociada al tránsito frecuente de embarcaciones turísticas en la zona, lo que incrementa la re suspensión de sedimentos y el disturbio físico del fondo marino. Aunque la pradera mantenía resiliencia estructural en su núcleo, el borde erosionado representaba un punto crítico de vulnerabilidad. De no intervenir oportunamente, este proceso podría desencadenar una retroalimentación negativa que comprometa la estabilidad del parche completo y reduzca su capacidad de provisión de servicios ecosistémicos.

Objetivo de la guía

Esta guía describe paso a paso el diseño, implementación y monitoreo de una intervención de restauración topográfica en praderas de pastos marinos afectadas por erosión localizada. Está orientada a equipos técnicos, autoridades ambientales, organizaciones de conservación y actores territoriales que busquen replicar la experiencia en ecosistemas similares del Caribe u otras regiones tropicales.

Enfoque metodológico: Se basa en restauración de procesos ecológicos, no en reemplazo estructural del ecosistema. La intervención busca restablecer la retroalimentación natural entre vegetación y sedimento mediante una solución permeable y biodegradable.

Pasos de implementación:

1. Criterios para seleccionar el sitio de intervención

La metodología es aplicable únicamente en praderas que aún conserven integridad ecológica funcional. No está diseñada para sitios con pérdida total de cobertura o colapso estructural del sistema.

El sitio debe cumplir con las siguientes condiciones:

1. Cobertura vegetal alta (preferiblemente >70%).
2. Biomasa subterránea dominante y presencia de rizomas activos.
3. Erosión localizada en borde de parche, no generalizada.
4. Calidad de agua dentro de rangos adecuados.
5. Ausencia de enfermedades masivas.
6. Accesibilidad logística para instalación submarina.
7. Viabilidad normativa para intervención.

La erosión debe identificarse como un proceso físico activo (socavación del borde, exposición vertical de talud o rizomas visibles), pero no como un proceso irreversible de pérdida sistémica.

2. Diagnóstico ecológico y físico previo

Antes de cualquier intervención debe realizarse un diagnóstico base que permita comprender la condición del sistema y sustentar técnicamente la decisión de intervenir.

El diagnóstico debe incluir:

Evaluación ecológica:

1. Cobertura porcentual.
2. Densidad de vástagos.
3. Estimación de biomasa aérea y subterránea.
4. Presencia de epifitismo excesivo.
5. Presencia de patógenos.
6. Estado fenológico general.

} Evaluación fisicoquímica:

1. Temperatura.
2. Salinidad.
3. pH.
4. Oxígeno disuelto.
5. Transparencia.

} Evaluación geomorfológica:

1. Altura del talud erosionado.
2. Longitud del borde afectado.
3. Tipo de sedimento.
4. Evidencia de transporte sedimentario.
5. Identificación de fuentes de energía (oleaje, corrientes, tránsito de embarcaciones).

La intervención solo se justifica cuando el sistema conserva capacidad de autorregeneración pero presenta un punto crítico de inestabilidad física.

} 3. Diseño conceptual de la solución

La solución consiste en una barrera permeable instalada paralela al borde erosionado. Su función no es bloquear completamente la energía hidrodinámica, sino reducirla lo suficiente para permitir deposición progresiva de sedimentos.

El principio ecológico es simple: al disminuir la velocidad de flujo, se reduce el esfuerzo cortante sobre el fondo, facilitando acumulación de partículas finas y restableciendo estabilidad del sustrato.

La estructura debe cumplir tres criterios fundamentales:

1. Permeabilidad.

2. Flexibilidad estructural.
3. Materiales de bajo impacto ambiental.

4. Materiales recomendados

Los materiales utilizados en el piloto fueron seleccionados por su estabilidad, bajo impacto y facilidad de manejo subacuático.

Se emplearon:

1. Sacos de yute biodegradables.
2. Relleno de piedra calcárea de tamaño medio.
3. Elementos de refuerzo con material reciclado (ladrillos fabricados con arena de vidrio reciclado).
4. Cuerdas naturales
5. Anclajes resistentes al medio marino.

El yute permite una degradación progresiva una vez el sistema haya recuperado estabilidad. La piedra aporta peso y resistencia a desplazamiento. El material reciclado fortalece el componente de economía circular del proyecto.

5. Procedimiento de instalación

La instalación debe realizarse por personal con experiencia en trabajo subacuático y bajo coordinación técnica.

Primero se delimita el tramo a intervenir, priorizando zonas de mayor socavación. La estructura debe disponerse paralela al borde erosionado, a una distancia suficiente para proteger el talud sin invadir la pradera sana.

Los sacos se rellenan en superficie y se transportan al sitio mediante embarcación. En el fondo se acomodan manualmente, asegurando continuidad lineal y contacto estable con el sustrato.

Los refuerzos estructurales se intercalan estratégicamente para aumentar estabilidad frente a eventos de mayor energía. Es importante evitar crear superficies completamente rígidas que alteren el flujo natural.

La instalación debe realizarse preferiblemente en condiciones de baja energía (temporada seca o periodo de menor oleaje).

6. Monitoreo posterior a la intervención

El monitoreo es indispensable para evaluar efectividad y ajustar la estrategia.

Se recomienda establecer un transecto permanente y parcelas fijas para seguimiento periódico.

El monitoreo debe incluir:

1. Cobertura vegetal.
2. Densidad de vástagos.
3. Altura del talud.
4. Evidencia de sedimentación detrás de la estructura.
5. Integridad estructural de los sacos.
6. Presencia de desplazamientos o colapsos parciales.

Las evaluaciones deben realizarse al menos a los 3, 6 y 12 meses posteriores a la instalación, por ende debe ser contemplado dentro del alcance y duración del proyecto.

En caso de observar erosión lateral o debilitamiento en extremos, pueden realizarse ajustes puntuales sin rediseñar completamente la intervención.

7. Dimensión social y gobernanza

La restauración física sin gestión de presiones externas reduce significativamente la efectividad del proyecto.

Es necesario trabajar paralelamente en:

1. Sensibilización a operadores turísticos.
2. Regulación de anclaje.
3. Instalación de boyas ecológicas.
4. Divulgación sobre impactos de hélices.
5. Articulación con autoridades ambientales.

El proyecto debe concebirse como una intervención socioecológica, no exclusivamente ingenieril.

Recomendaciones

1. Riesgos y limitaciones

Esta metodología no es adecuada para:

1. Sitios con pérdida total de cobertura.
2. Ambientes de energía extremadamente alta.
3. Áreas con contaminación crónica.

4. Zonas con presión antrópica no gestionable.

La estructura biodegradable requiere seguimiento periódico. La falta de mantenimiento puede comprometer resultados.

No sustituye políticas de manejo costero integral.

2. Escalamiento y replicabilidad

El escalamiento debe realizarse de forma progresiva, priorizando áreas/tramos críticas y evaluando resultados antes de expandir.

Para replicar en otros sitios se recomienda:

1. Realizar modelación hidrodinámica básica cuando sea posible.
2. Incorporar perfiles batimétricos pre y post intervención.
3. Estimar volúmenes de sedimentación.
4. Integrar indicadores de carbono azul si el objetivo incluye mitigación climática.
5. Documentar costos por metro lineal intervenido.

Cada sitio requerirá ajustes en densidad de sacos, distancia al borde y tipo de refuerzo estructural según energía local.

Resultados esperados

Si la intervención es adecuada, se espera observar:

1. Reducción de socavación.
2. Acumulación progresiva de sedimentos.
3. Disminución de exposición de rizomas.
4. Mantenimiento o aumento de cobertura vegetal (Efectos a mediano y largo plazo).
5. Integración natural de la estructura al paisaje submarino.

Los efectos pueden ser graduales y deben evaluarse en escalas temporales mínimas de 3, 6 a 12 meses.

Conclusión

La restauración topográfica mediante estructuras permeables biodegradables representa una herramienta viable para estabilizar bordes erosionados en praderas funcionales. Su éxito depende más del diagnóstico ecológico y del manejo de presiones externas que de la complejidad estructural de la solución.

El enfoque debe centrarse en restaurar procesos, no en imponer infraestructura rígida. Cuando se aplica en condiciones adecuadas, puede convertirse en una estrategia replicable de adaptación basada en la naturaleza para ecosistemas costeros tropicales.