

PROTOCOLOS DE EVALUACIÓN Y RESTAURACIÓN DE ECOSISTEMAS DESPUÉS DE EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS CASO HURACANES: ARCHIPIÉLAGO DE SAN ANDRÉS, PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA, RB SEAFLOWER, COLOMBIA.

INFORME FINAL

Productos del convenio 002 del 4 de octubre de 2021 entre Coralina
y la Universidad Nacional de Colombia - Sede Caribe.



Dirección: Adriana Santos Martínez, Dra.

**Coordinación Ecosistemas: Julián Prato Valderrama, Cand. PhD. Coordinación Gestión del Riesgo:
Carolina Velásquez, PhD. Coordinación Logística y Divulgación: Robert Hudgson Reeves, Dr.**

**Equipo Científico Ecosistemas Manglares, Pastos Marinos y Corales
Asesoría Jurídica responsabilidades institucionales y Análisis cartográficos SIG.
Asesoría UNAL – ECOMARES - BLUE INDIGO y CEMARIN**

**San Andrés Isla, 2022
Colombia**



Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago
de San Andrés, Providencia y Santa Catalina

Sede Caribe
Sede Bogotá
Sede Medellín



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Fondo de Compensación Ambiental-FCA

Asesorías y apoyo



Participantes

CORALINA

Arne Britton, Dr. Director General.
Dahian Mitchell, Dra.
Mishell Taylor, Dra.
Marcelo Diviola, Biólogo

BLUE INDIGO

María Fernanda Maya, Bióloga
Mariana Genecco, Bióloga

ECOMARES

Elvira Alvarado, PhD.
Valeria Pizarro, PhD.
Juliana Vanegas, Bióloga

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Sede Caribe

Adriana Santos-Martínez, Dra.
Julian Prato MSc. Cand. PhD.
Carolina Velásquez, PhD.
Robert Hudgson Reves Dr.
Juan David Osorio, PhD.
Fady Ortiz, Dr.
Diana Castaño, Cand. MSc.
Yanelis Cantillo, Bióloga
Juan Carlos Mejía, PhD.
Osmani Castellanos, MSc.
Venus Avendaño, Contadora.
Tishanny Mow, Administradora.
Dianira Calderón Lung, Diseñadora
Salma Tabet, Comunicadora.

Sede Bogotá

Ernesto Mancera, PhD.
Brigitte Gavio, PhD.
Lina Ochoa, Bióloga.
Álvaro Sandoval, Biólogo.
Paola Echeverry, Ingeniera

Sede Medellín

Andrés Osorio, PhD.
Juan Pablo Ramírez Monsalve, Ingeniero
Paula Andrea Espinosa Ordoñez, Ingeniera

Asesorías y apoyo



CONTENIDO GENERAL SECCIONES

Presentación

- I. Gestión del riesgo de desastres basado en ecosistemas**
- II. Competencias y responsabilidades institucionales**
- III. Documento técnico detallado protocolo de restauración ecosistemas de Manglares**
- IV. Documento técnico detallado protocolo de restauración ecosistemas de Pastos Marinos**
- V. Documento técnico detallado protocolo de restauración ecosistemas de Arrecifes de coral**
- VI. Participación social para la gestión del riesgo en ecosistemas marinos**
- VII. Documento síntesis protocolos de restauración ecosistemas frente a huracanes (procedimientos restauración manglares, pastos marinos y corales).**
- VIII. Herramientas para la divulgación del conocimiento, Infografías y libros.**

Anexo 1. Mapas de áreas susceptibles a impactos por huracanes.

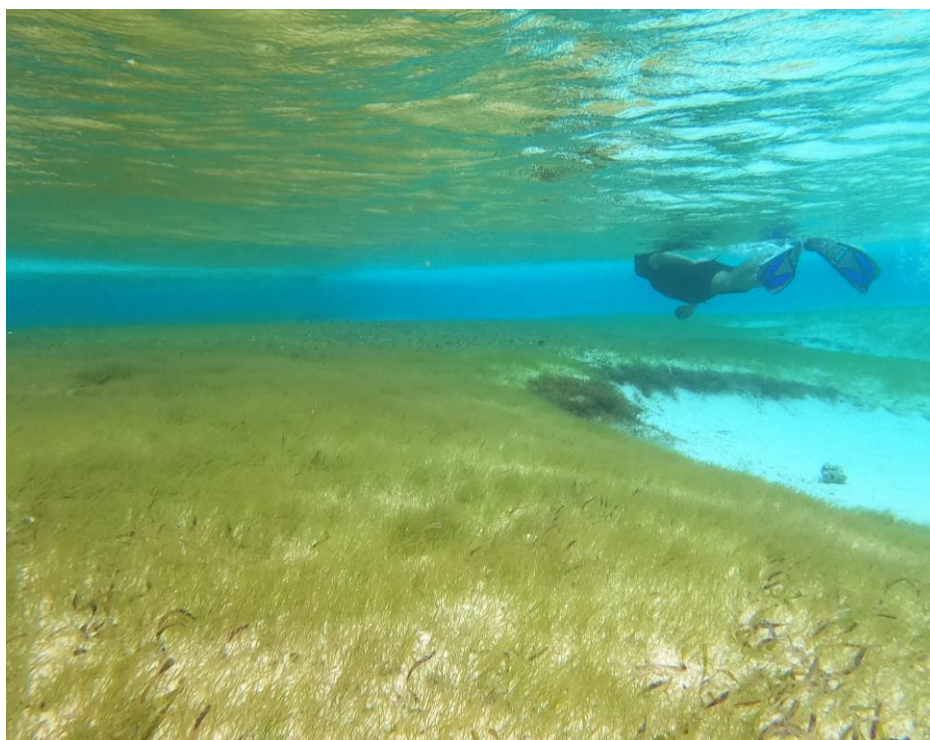
Anexo 2. Segundo Informe de avance, información secundaria disponible.

**Protocolos de evaluación y restauración de ecosistemas después de
eventos climáticos extremos caso huracanes: Archipiélago de San Andrés,
Providencia y Santa Catalina - RB Seaflower, Colombia.**

SECCIÓN IV

**Documento técnico protocolo de respuesta y restauración
post huracán para ecosistemas: Pastos Marinos**

**Álvaro Andrés Sandoval Riveros, Biólogo
Brigitte Gavio, PhD.**



Fotografía: Julián Prato Valderrama

**Universidad Nacional de Colombia - Sede Caribe
Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San
Andrés, Providencia y Santa Catalina, Coralina.
San Andrés isla
2022**

Tabla de contenido

1. Introducción.....	12
2. Estado del arte	13
2.1. Información sobre el estado, cobertura, distribución y composición general de especies de pastos marinos.....	13
2.1.1. Distribución	14
2.1.2. Cobertura	14
2.1.3. Estado de pastos marinos en el archipiélago de San Andrés Providencias y Santa Catalina	16
2.1.4. Especies clave por su función y grado de amenaza de extinción.....	20
2.1.5. Panorama general del estudio y cambio de especies importantes en las últimas décadas en el Archipiélago.....	22
2.2. Vulnerabilidad, amenazas, y antecedentes históricos de afectaciones en los ecosistemas frente a huracanes.....	23
2.2.1. Factores biológicos de vulnerabilidad de los pastos marinos frente cambios ambientales o disturbios relacionados directa o indirectamente con huracanes.....	23
2.2.2. Factores de afectación relacionados con huracanes	29
2.2.3. Rangos de tolerancia de los pastos marinos a tensores causados por huracanes ...	30
2.2.4. Localización de los ecosistemas de pastos más afectados por el paso de los huracanes en el Archipiélago.....	37
2.3. Estado del Arte en Protocolos de respuesta y restauración frente a huracanes para pastos marinos.....	38
2.3.1. Protocolos generales de restauración y protocolos de restauración específica para pastos marinos post huracán.....	38
2.3.2. Protocolos de germinación de semillas.....	42
2.3.3. Protocolos de siembra de brotes, plántulas o plantas.....	43
2.3.4. Protocolos de siembra mecánica de pastos.....	45
2.3.5. Protocolos de siembra de fragmentos de pastos.....	47
2.4. Identificación de los pasos o etapas que se deben tener en cuenta para la preparación	48
2.4.1. Levantamiento de información base.....	48
2.4.2. Preparación logística:	49
2.4.3. Selección y preparación de personal:	52
2.4.4. Preparación financiera y planeación económica:	53

2.5.	Identificación de los pasos y metodologías que se deben tener en cuenta para la restauración y respuesta en el Archipiélago	53
2.5.1.	Fase diagnóstica	54
2.5.2.	Definir el ecosistema o comunidad de referencia	54
2.5.3.	Evaluar el estado actual del ecosistema	54
2.5.4.	Definir las escalas y niveles de organización	55
2.5.5.	Establecer las escalas y jerarquías de disturbio.	56
2.5.6.	Buscar y lograr la participación comunitaria.....	57
2.5.7.	Evaluar el potencial de regeneración del ecosistema.....	58
2.5.8.	Establecer las barreras a la restauración a diferentes escalas.....	59
2.5.9.	Diseñar estrategias para superar las barreras a la restauración.....	59
2.6.	Costos de la restauración	61
2.7.	Definición de implementación de protocolos de restauración.....	63
2.7.1.	Definición de objetivos.....	63
2.8.	Fase experimental	64
2.8.1.	Seleccionar las especies adecuadas para la restauración	64
2.8.2.	Propagar y manejar las especies.	65
2.8.3.	Seleccionar los sitios a restaurar.	65
2.8.4.	Seleccionar los sitios o material donante.....	66
2.8.5.	Diseñar y seleccionar la metodología de restauración.	66
2.9.	Fase de monitoreo	67
2.9.1.	Monitorear el proceso de restauración.	67
2.10.	Fase de consolidación	67
2.10.1.	Consolidar el proceso de restauración.....	67
2.11.	Pasos para la restauración de pastos marinos en el contexto del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina tras el paso de un huracán.	68
3.	Guía metodológica para la restauración primaria post-huracán	69
3.1.	Posibles problemas y diagnóstico	69
3.2.	Pasos propuestos para la restauración primaria.....	70
3.3.	Guía metodológica para la restauración secundaria	71
3.3.1.	Posibles problemas y diagnóstico	71
3.4.	Pasos propuestos para la restauración secundaria.....	72

3.5.	Evaluación de daños y nivel de afectación, procedimientos de restauración según afectación.....	72
3.5.1.	Enterramiento	74
3.5.2.	Erosión.....	77
3.5.3.	Mortalidad por condiciones extremas	80
3.6.	Criterio de selección de sitios a priorizar en la atención.	82
4.	Métodos de evaluación ambiental rápida de estado pre, y de daños post-huracán.	82
4.1.	Guía metodológica eficiente para evaluación de daños pre y post-huracán.....	83
4.1.1.	Selección de sitios	84
4.1.2.	Periodicidad.....	84
4.1.3.	Principales metodologías	85
4.1.4.	Biomasa de la comunidad de pastos marinos.....	85
4.1.5.	Densidad de vástagos.....	85
4.1.6.	Densidad de brotes	86
4.1.7.	Índice de Área foliar y altura del dosel.....	86
4.1.8.	Cobertura y extensión	87
4.1.9.	Sedimentos.....	88
4.1.10.	Fauna e infauna asociada a las praderas*	89
4.1.11.	Fisicoquímicos	89
4.2.	Ruta eficiente para evaluación del estado de pastos pre y post-huracán	90
5.	Métodos clave de monitoreo	90
6.	Protocolo ejecutivo y procedimientos de evaluación, respuesta y restauración para el caso del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina	92
6.1.	Consideraciones generales para acciones de restauración	93
6.2.	Procedimientos preparación pre-huracán	94
6.3.	Procedimiento de evaluación de daños	99
6.3.1.	Escenarios y niveles de afectación de pastos marinos tras la evaluación de daños.....	101
6.4.	Procedimiento de respuesta a la restauración	102
6.4.1.	Diseño de unidades de siembra:	105
6.4.2.	Diseño de metodología restauración	107
	Métodos seguimiento y monitoreo de restauración	112
7.	Bibliografía	114

Lista de Tablas

Tabla 1. Cuatro áreas geográficas del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, con la extensión total de pastos y su proporción respecto al archipiélago.....	16
Tabla 2. Estaciones de pastos marinos en el Archipiélago. Monitoreadas por (verde) INVEMAR y Coralina y (gris) INVEMAR y PNN. Tomado y modificado de Gómez-López, et al., 2018.	17
Tabla 3. Criterios de condición respecto a la densidad de vástagos/m ² , el porcentaje de afectación del hongo <i>Labyrinthula</i> sp. y el porcentaje de mortalidad a causa de este hongo. * para praderas de pastos marinos monoespecíficas o mixtas con mayor proporción de <i>T. testudinum</i> cuando las densidades de cobertura de <i>T. testudinum</i> superan el 30%; ** para praderas mixtas (<i>T. testudinum</i> con <i>S. filiforme</i>) en las que la segunda especie presenta mayor cobertura. Tomado y modificado de Gómez-López, et al., 2018.....	18
Tabla 4. Densidad de vástagos por metro cuadrado para las estaciones de pastos marinos en el Archipiélago. Tomado y modificado de Gómez-López et al. (2018).	18
Tabla 5. Valores de biomasa foliar y total y área foliar de <i>Thalassia testudinum</i> en varias localidades del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Los datos para Sierra-Rozo et al., 2012: Gris: zona no afectada por huracán Beta; Blanco: zona afectada por huracán Beta; * Datos tomados en 2006; ** Datos tomados en 2007. Tomado y modificado de Díaz et al., 2003 y Albis-Salas et al. 2010.	19
Tabla 6. Servicios ecosistémicos asociados a los ecosistemas de pastos marinos.	21
Tabla 7. Estado de conservación de las especies de pastos marinos presentes en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. LC = Preocupación menor *población en aumento globalmente.	21
Tabla 8. Rangos de tolerancia de las especies de pastos marinos presentes en el archipiélago para distintos factores ambientales. * El “+” implica que el rango es un valor mayor pero no se especifica el valor en los estudios. **No se encuentra información respecto al tamaño directamente.....	30
Tabla 9. Tolerancia a los diferentes tensores o efectos de los tensores según información secundaria. Nivel de tolerancia categorizado en 5 niveles, siendo 1 la tolerancia más baja y 5 la mayor tolerancia a los tensores: Rojo (1), Naranja (2), Amarillo (3), Verde (4), Azul (5).....	31
Tabla 10. Costos de diferentes acciones de restauración de ecosistemas de pastos marinos. Se presentan en dólares estadounidenses de 2007, demás no todas incluyen los costos del monitoreo. Tomado de Paling et al., en 2018.....	61
Tabla 11. Pasos para la restauración primaria de pastos marinos post-huracán. Entiéndase como barreras al establecimiento o persistencia niveles elevados de turbidez, disminución de oxígeno disuelto o de la salinidad, nutrificación, cambios en tipo y nivel de sedimentos * Se puede dar un escenario en el que al esperar que las condiciones ambientales se reestablezcan, en el monitoreo del estado del ecosistema se determine que por medios naturales el ecosistema se recuperó o está en una trayectoria a rehabilitarse naturalmente y no sea necesario implementar acciones de restauración.	70

Tabla 12. Posibles escenarios de afectación según la categoría de los huracanes sobre los ecosistemas de pastos marinos presentes en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Basado en la información revisada en la sección 2 de este documento y en Cruz-Palacios y Van Tussenbroek, 2005 y Cabaço et al., 2008.....	73
Tabla 13. Principales aspectos a considerar respecto a la información base de ecosistemas de pastos marinos para el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.	94
Tabla 14. Preparación para los tipos de respuesta ante el paso de un huracán en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.	95
Tabla 15. Presupuesto de los principales costos de la fase de preparación (Respuesta inmediata) pre huracán de pastos marinos en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Los valores se estiman con los costos a 2021. *El uso de laboratorios e instalaciones incluye el uso de balanza analítica de precisión, mufla, estufa u horno, los cuales no se consideran dentro de los costos de materiales. Los costos se estiman para un día completo de monitoreo en campo y un total de dos meses de análisis de muestras en laboratorios o instalaciones técnicas y mediante herramientas SIG. Estos no contemplan los gastos de personal administrativo del proyecto, sino la parte técnica y científica.	96
Tabla 16. Metodologías para implementar en un contexto de afectación por huracán en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.	100
Tabla 17. Presupuesto de los principales costos de la fase de restauración primaria de pastos marinos en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Los valores se estiman con los costos a 2021. *El uso de laboratorios e instalaciones incluye el uso de balanza analítica de precisión, mufla, estufa u horno, los cuales no se consideran dentro de los costos de materiales. Los costos se estiman para dos días completos de monitoreo en campo, 2 jornadas de siembra (6 días en campo) y un total de dos meses de análisis de muestras en laboratorios o instalaciones técnicas y mediante herramientas SIG. Estos no contemplan los gastos de personal administrativo del proyecto, sino la parte técnica y científica.	108
Tabla 18. Metodologías a implementar en los monitoreos de procesos de restauración de ecosistemas de pastos marinos en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. *Se refiere a los monitoreos a largo plazo (de carácter destructivo) ya que hacer este tipo de monitoreos que implican extracción de material serían contraproducentes con el proceso de restauración.	113
Tabla 19. Principales recomendaciones para una restauración efectiva. Tomado y modificado de UNEP, 2020.....	113

Lista de Figuras

Figura 1. Distribución de pastos marinos para las islas mayores del archipiélago y estado del ecosistema para 2017 de cada una de las estaciones de monitoreo de pastos marinos. Fuente: LABSISINVEVAR. Tomado de Díaz et al. 2003.	15
Figura 2. Porcentaje de afectación por hongo <i>Labyrinthula</i> spp. para las estaciones de pastos marinos en el Archipiélago. Tomado y modificado de Gómez-López et al. (2018).	18
Figura 3. Secuencia y relaciones de los 13 pasos fundamentales en la restauración ecológica. Tomado y modificado de Vargas, 2011. Los pasos 5 y 11 son transversales y están presentes en casi todo el proceso de las fases diagnóstica y experimental. Esto quiere decir que la participación comunitaria es muy importante en todo el proceso de restauración y que el diseño de estrategias se va retroalimentando de los conocimientos derivados de los pasos 6 a 10.	40
Figura 4 Principales actores dentro de un proceso de evaluación, restauración o monitoreo de ecosistemas de pastos marinos. Las diferentes contrataciones se pueden hacer por convocatoria o selección directa.	50
Figura 5. Rutas de respuesta para la preparación ante la afectación de eventos climáticos extremos como huracanes o tormentas tropicales sobre ecosistemas de pastos marinos. * Evaluación en campo y mediante herramientas SIG.	51
Figura 6. Pasos para la restauración secundaria de pastos marinos post-huracán en procesos a largo plazo (más de 2 años), y en los que el enfoque es básicamente restaurar biomasa y cobertura.	72
Figura 7. Niveles de afectación para los distintos escenarios de afectación de los ecosistemas de pastos marinos tras el paso de un huracán. Los porcentajes de pérdida o afectación de <i>Thalassia</i> se consideran a nivel de cuadrantes (muestreo) y no como el porcentaje de cobertura total dentro del archipiélago.	74
Figura 8. Pasos para la restauración en un escenario de enterramiento de pastos marinos por transporte y deposición de sedimentos. Las preguntas son puntos de control y retroalimentación, a partir de los cuales se define si es rentable o necesario continuar con la implementación de un protocolo de restauración.	77
Figura 9. Pasos para la restauración en un escenario de erosión de pastos marinos a causa de fuertes oleajes o corrientes extremas. Las preguntas son puntos de control y retroalimentación, a partir de los cuales se define si es rentable o necesario continuar con la implementación de un protocolo de restauración.	79
Figura 10. Pasos para la restauración en un escenario de mortalidad de pastos marinos a causa de condiciones y factores ambientales extremos. Las preguntas son puntos de control y retroalimentación, a partir de los cuales se define si es rentable o necesario continuar con la implementación de un protocolo de restauración.	81
Figura 11. Ruta eficiente de evaluación cuantitativa del estado de los ecosistemas de pastos marinos pre y post-huracán. Los análisis de los factores físico químicos se pueden evaluar en cualquier momento a lo largo del muestreo. Los cuadros grises representan metodologías a trabajar por transecto con el fin de no confundir muestras, etiquetas y optimizar el trabajo en cuanto a desplazamiento.	90

Figura 12. Niveles de afectación para los distintos escenarios de afectación de los ecosistemas de pastos marinos tras el paso de un huracán. Los porcentajes de pérdida o afectación de Thalassia se consideran a nivel de cuadrantes (muestreo) y no como el porcentaje de cobertura total dentro del archipiélago.....	102
Figura 13. Pasos para la restauración a corto plazo de pastos marinos en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Las preguntas son puntos de control y retroalimentación, a partir de los cuales se define si es rentable o necesario continuar con la implementación del protocolo de restauración.....	104
Figura 14. Pasos para la restauración secundaria (mediano y largo plazo) de pastos marinos en escenarios post-huracán y en los que el enfoque es básicamente restaurar biomasa y cobertura.	105
Figura 15. Tipos de material donante y de sistemas de anclaje para el desarrollo de las unidades de siembra usadas en la restauración de pastos marinos.	107
Figura 16. Ejemplo del diseño de los transectos para la implementación de metodologías de restauración de pastos marinos en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.	107

1. Introducción.

La importancia del conocimiento sobre ecosistemas de pastos marinos se viene recalcando a nivel mundial desde hace varias décadas debido a las altas tasas de pérdida de este ecosistema y a la susceptibilidad que puede tener ante diferentes tensiones. Desarrollar protocolos de restauración ante los diferentes disturbios que pueden afectar el estado y bienestar de estos ecosistemas es muy importante ya que permite resguardar y recuperar servicios ecosistémicos tan importantes como captura de carbono, estabilización de costas, regulación de ciclo hidrológico, lugares de cría, formación de suelo, provisión de productos bioquímicos y recursos medicinales. Actualmente las actividades humanas son las causantes de las mayores pérdidas de cobertura de pastos marinos, con el infortunio que con el calentamiento global fenómenos climáticos extremos como huracanes han aumentado en frecuencia e intensidad para el Caribe afectando directamente el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, aumentando la vulnerabilidad de estos ecosistemas a nivel local. Las principales afectaciones a causa de los huracanes sobre los pastos marinos son aumento de turbidez, falta de oxígeno, disminución de salinidad, arrancamiento, defoliación, enterramiento y nutrificación, que pueden traer consigo la pérdida parcial o total de pequeñas o grandes extensiones de pastos marinos. En este capítulo se aborda la problemática general que presentan los pastos marinos del Archipiélago ante el paso de huracanes y se proponen métodos para la evaluación rápida del estado del ecosistema, un protocolo general para la restauración del ecosistema de pastos marinos, protocolos de respuesta específicos según el escenario o nivel de afectación, se mencionan sitios para priorizar la atención y se proponen métodos de monitoreo para establecer el éxito de los métodos o protocolos implementados. Se espera que este capítulo sirva de insumo para la toma de decisiones frente a disturbios a pastos marinos dentro de la región insular del Caribe Colombiano.

Palabras clave: Tensiones, arrancamiento, enterramiento, *T. testudinum*, condiciones hidrodinámicas.

2. Estado del arte

2.1. Información sobre el estado, cobertura, distribución y composición general de especies de pastos marinos.

Los pastos marinos son plantas vasculares que viven y completan sus ciclos de vida totalmente sumergidas en medios salinos o salobres, llegando a formar extensas praderas o “tapetes”. Estas, al igual que el resto de las angiospermas presentan hojas, tallos y raíces, y forman flores, frutos y semillas (Díaz *et al.*, 2003). En la actualidad se reconoce la existencia de aproximadamente 60 especies que se agrupan en cuatro familias, sin embargo, los pastos marinos no constituyen una unidad sistemática, ya que la mayor parte de las especies pertenecen a dos familias lejanamente emparentadas: Hydrocharitaceae y Potamogetonaceae (Díaz *et al.*, 2003; Gómez-López *et al.*, 2014). De igual forma, representan uno de los ecosistemas marino-costeros más productivos del mundo, que soporta especies clave y ecológicamente fundamentales en todos los niveles tróficos (Orth *et al.*, 2006).

Estos ecosistemas se encuentran distribuidos a nivel mundial prácticamente a lo largo de todas las costas del globo terráqueo (exceptuando la Antártida y gran parte de la costa del Pacífico de Suramérica) (Gómez-López, *et al.* 2014). Su presencia se limita a zonas con aguas bien iluminadas y de escasa profundidad. Además, los sedimentos del fondo marino que sirven de sustrato para las plantas deben contener una cierta cantidad de materia orgánica y nutrientes esenciales (Díaz *et al.*, 2003).

En el Gran Caribe se han registrado nueve especies de pastos marinos, de los cuales seis están representados en el Caribe colombiano, siendo *Thalassia testudinum* Banks ex König la formadora de las praderas más representativas y comunes. (Gómez-López, *et al.*, 2014). En cuanto al archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, las praderas de pastos marinos se conforman principalmente de las especies *T. testudinum* y *Syringodium filiforme* Kütz. in Hohenacker y en menor proporción se encuentran las especies *Halodule wrightii* Asch y *Halophila decipiens* Ostenf (Vides *et al.*, 2016; Gómez-López, *et al.*, 2018).

“La totalidad de los ecosistemas de pastos marinos dentro del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina están bajo alguna figura de protección: la Reserva de Biosfera Seaflower creada por el programa “Man and Biosphere” de la UNESCO, y en providencia el Parque Nacional Natural Old Providence McBean Lagoon”.

2.1.1. Distribución

En el archipiélago, las praderas de pastos se encuentran distribuidas a lo largo de los fondos someros de las islas mayores de San Andrés, Providencia y Santa Catalina y en los cayos de Albuquerque (Norte y Sur), en el Cayo Bolívar (*Courtown cays*) y en Banco serranilla como se aprecia en la Figura 1 y en la Tabla 1. Adicionalmente, toda la extensión de pastos marinos en esta área está bajo dos figuras de protección del SINAP: Reserva de Biosfera Seaflower y Parque Nacional Natural Old Providence McBean Lagoon (Isla de Providencia) (Gómez-López, *et al.*, 2018).

2.1.2. Cobertura

Providencia y Santa Catalina cuentan con la mayor extensión de pastos y se encuentran casi completamente circundadas por praderas que en total ocupan una extensión de 1.603 hectáreas, de las cuales 50 hectáreas están dentro de los límites del Parque Nacional Natural McBean Lagoon. Se presenta una zonación marcada entre las especies, las cuales se disponen desde el litoral empezando con *H. wrightii*, luego *S. filiforme* y *T. testudinum*, aunque en zonas más profundas *S. filiforme* y *T. testudinum* se mezclan en proporciones variables hasta los 10 m de profundidad (Díaz *et al.*, 2003). No obstante, Mejía-Ladino *et al.* en 2008 identificaron la presencia de un parche de *Halophila decipiens* mezclado con los otros pastos. Estas praderas se desarrollan sobre diferentes tipos de sustrato, desde fondos consolidados de fragmentos coralinos hasta fango. En las zonas que se encuentran fragmentos coralinos (barlovento) la cobertura de pastos tiende a ser baja y a estar dominada por *T. testudinum*, con plantas de hojas cortas y anchas, por otro lado, sobre fondos areno-fangosos (sotavento) son más densas las praderas y las plantas de *T. testudinum* y/o *S. filiforme* más vigorosas. Aparte de las praderas, también se encuentran parches aislados y discretos de *H. wrightii* principalmente en aguas muy someras (Díaz *et al.*, 2003).

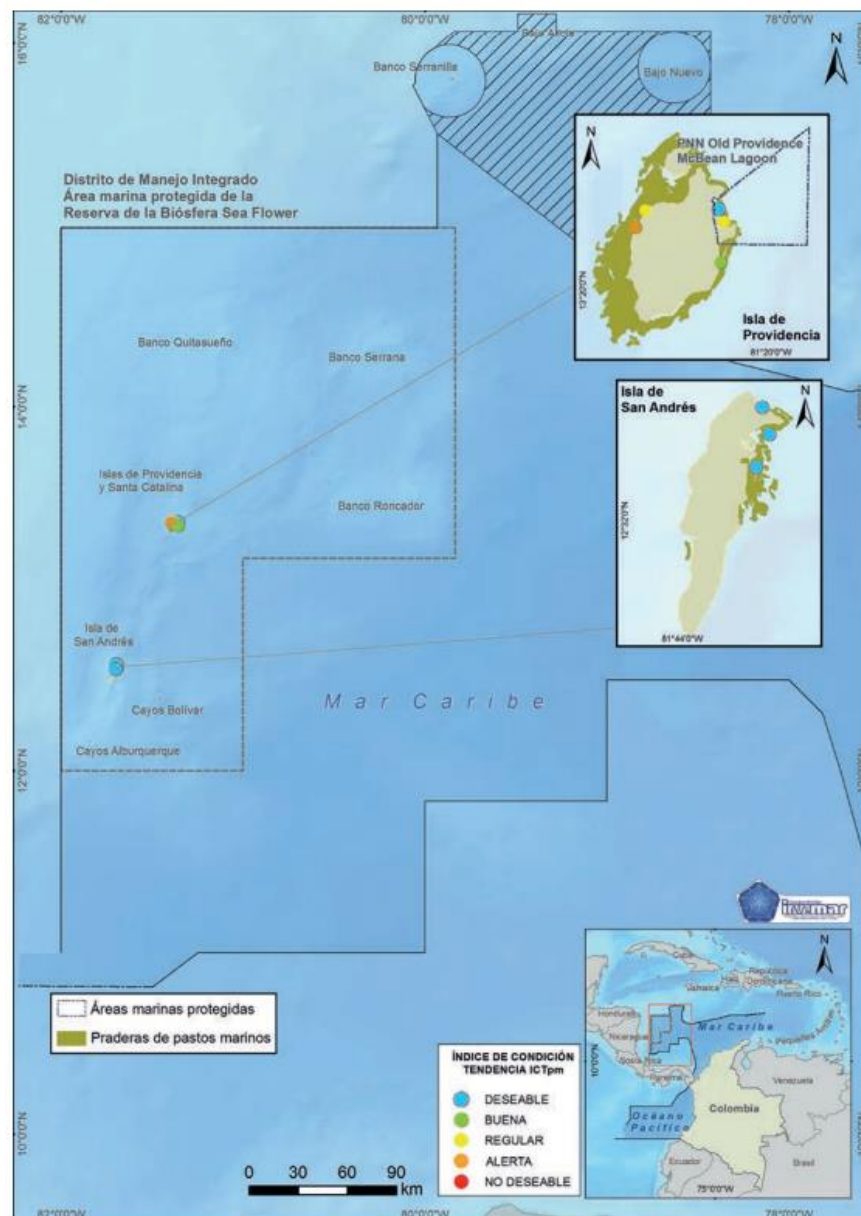


Figura 1. Distribución de pastos marinos para las islas mayores del archipiélago y estado del ecosistema para 2017 de cada una de las estaciones de monitoreo de pastos marinos. Fuente: LABSISINVEMAR. Tomado de Díaz et al. 2003.

En el caso de San Andrés, los pastos marinos ocupan una extensión de 340 hectáreas. La mayor parte de dicha extensión se distribuye en el interior de la cuenca de la laguna arrecifal, al este y norte de la isla (Guerra-Vargas y Guerra-Vargas en 2017), prácticamente desde la línea de costa hasta una profundidad de 12m, aunque se encuentran unas extensiones de pasto en el sector occidental de la isla. Al Norte de la isla en las zonas someras hasta una profundidad de cuatro metros la especie dominante es *T. testudinum*, mientras que *S. filiforme* forma amplias y densas praderas monoespecíficas entre 7 y 10m. Por su parte, en el costado occidental, *T. testudinum* está prácticamente ausente, *S.*

filiforme se presenta muy poco, pero *H. wrightii* alcanza a formar algunas praderas dispersas, aunque poco densas, entre cuatro y siete metros de profundidad. El sustrato predominante está compuesto por arenas completamente biogénicas de grano medio a grueso, pero en algunas zonas muy someras *T. testudinum* se desarrolla sobre escombros coralinos o se entremezcla a colonias del coral *Porites porites*. Las praderas de San Andrés suelen tener un componente algal importante, que incluso puede ser superior, en términos de biomasa en pie, al de los pastos (Díaz *et al.*, 2003). El estudio hecho por Guerra-Vargas y Guerra-Vargas en 2017 sugiere una serie de cambios ambientales, que justifican la disminución de área de las praderas entre 2003 y 2016.

Las islas-cayos Albuquerque cuentan con una única pradera en el costado occidental del Cayo norte (*North cay*). Esta pradera se encuentra entre los 0,5 y 2m de profundidad y se desarrolla sobre una terraza de fragmentos coralinos. *T. testudinum* es la especie dominante, aunque crece en poca densidad y poco vigorosa, por su parte *S. filiforme* forma parches monoespecíficos densos (Díaz *et al.*, 2003).

Las islas-cayos Bolívar presentan varios parches al sur del atolón, específicamente de *H. wrightii* creciendo en baja densidad sobre arenas a escasa profundidad, además existe a todo lo largo del costado de sotavento del Cayo este (*East Cay*) una pradera amplia dominada por *S. filiforme* que se extiende hasta los seis metros de profundidad (Díaz *et al.*, 2003).

Banco Serranilla solo cuenta con una descripción general de su biodiversidad marina, realizada en 2016 por Vega-Sequeda *et al.*, 2016 en la cual se menciona la presencia de praderas de *S. filiforme*, en una extensión total de un poco más de 49 hectáreas.

Tabla 1. Cuatro áreas geográficas del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, con la extensión total de pastos y su proporción respecto al archipiélago.

ÁREA	EXTENSIÓN (h)	PROPORCIÓN (%)
Providencia y Santa Catalina	1603	80,34
San Andrés	340	17,04
Cayos Albuquerque	2	0,10
Cayos Bolivar	1	0,05
Banco Serranilla	49,20	2,46
Total	1995,20	100

2.1.3. Estado de pastos marinos en el archipiélago de San Andrés Providencias y Santa Catalina

Díaz *et al.* en el 2003 realizaron la primera caracterización de línea base de las praderas en el Caribe colombiano, a partir de la cual se consolida la información necesaria para evaluar el estado de estos ecosistemas. Ellos muestran en términos generales cuál es la distribución y las características estructurales de ese ecosistema para ese momento, aclarando que,

como ecosistema, es dinámico y por lo mismo, es necesario realizar estudios periódicos para entender los patrones que determinan cambios a lo largo del tiempo.

“El estado y la salud de los ecosistemas de pastos marinos se ha venido evaluando para el Caribe Colombiano y el archipiélago por diferentes expertos en colaboración con el INVEMAR y Coralina, con el fin de unificar esfuerzos en el entendimiento de este importante ecosistema”.

El estado de los ecosistemas de pastos marinos se ha venido evaluando mediante diferentes técnicas, con el fin de estimar la condición general de la integridad biótica y, por tanto, su estado de conservación, para ello se ha desarrollado un indicador de condición de tendencia de pastos marinos (ICT_{PM}) que se basa en la revisión, con colaboración de expertos, del Indicador de Integridad Biótica para Pastos Marinos (IBI_{pm}) propuesto por INVEMAR (Batista-Morales y Gómez, 2010) y descrito por Gómez-López *et al.*, 2014, el cual se realiza mediante el análisis de la información de diferentes variables como: densidad de vástagos, presencia de enfermedades con mortalidad/total-parcial y presencia de tres niveles tróficos (Densidades de herbívoros (DH), carnívoros (DC) y detritívoros/omnívoros (DO)) a partir de los cuales se miden atributos estructurales y funcionales de este ecosistema en un solo valor numérico (Gómez-López *et al.*, 2014).

En total el archipiélago cuenta con 8 estaciones de monitoreo de pastos marinos instaladas (Tabla 2), a partir de las cuales se realizan monitoreos periódicos sobre diferentes variables. Hasta el momento, los resultados de Gómez-López *et al.*, 2018, son el único análisis cuantitativo para los datos de ICT_{PM} en las 8 estaciones. Dadas las particularidades de estos ecosistemas por localidad, Gómez-López *et al.* (2018), avanzaron en la propuesta de los valores de referencia y la clasificación de los estados de condición del ecosistema para la densidad de vástagos, proponiendo valores únicos para las estaciones de Providencia por sus composiciones mixtas de *T. testudinum* y *S. filiforme* (ver Tabla 3). De igual forma propusieron los valores para la afectación por el hongo *Labyrinthula* spp. y el % de mortalidad o pérdida de cobertura, aunque sin evaluarla (ver Tabla 3). Por otro lado, el desarrollo de los valores de los tres niveles tróficos depende de la evaluación de las

Tabla 2. Estaciones de pastos marinos en el Archipiélago. Monitoreadas por (verde) INVEMAR y Coralina y (gris) INVEMAR y PNN. Tomado y modificado de Gómez-López, *et al.*, 2018.

Area	Estación
Parque Nacional Natural Old Providence McBean Lagoon	Mauricio's Bay
	Oyster Creek
Providencia	Camp
	San Felipe
	Mc Bean
	Cotton Cay
San Andrés	Isleño
	Mar Azul

densidades de herbívoros (DH), carnívoros (DC) y detritívoros/omnívoros (DO), las cuales se están adelantando desde el 2014 y se espera pronto estar publicando los valores de referencia para esta variable.

Tabla 3. Criterios de condición respecto a la densidad de vástagos/m², el porcentaje de afectación del hongo *Labyrinthula* sp. y el porcentaje de mortalidad a causa de este hongo. * para praderas de pastos marinos monoespecíficas o mixtas con mayor proporción de *T. testudinum* cuando las densidades de cobertura de *T. testudinum* superan el 30%; ** para praderas mixtas (*T. testudinum* con *S. filiforme*) en las que la segunda especie presenta mayor cobertura. Tomado y modificado de Gómez-López, et al., 2018.

Condición general	Densidad * (vástagos/m ²)	Densidad ** (vástagos/m ²)	% de afectación por <i>Labyrinthula</i> sp.	% mortalidad/estación de muestreo
Deseable	>400	>240	< 30	0-5
Bueno	288,01 - 400	144,1 – 240	31 - 40	6-20
Regular	176,01 - 288	96,1 – 144	41 - 60	21-40
Alerta	96,01 - 176	48,1 – 96	61 - 89	41-70
No deseable	<96	<48	>90	71-100

Los resultados que obtuvieron Gómez-López *et al.* (2018) para la de densidad de vástagos se aprecia en la tabla 4, mientras que la afectación evaluada por el hongo *Labyrinthula* spp. se muestra en la figura 2. Los datos muestran un vacío en la toma de información para algunos años y en general un mejor estado de praderas en la Isla de San Andrés, aunque no se reportan los valores de referencia por estación en el caso de la afectación por el hongo *Labyrinthula* spp. por lo que no se puede determinar qué estaciones están en mejor estado.

Tabla 4. Densidad de vástagos por metro cuadrado para las estaciones de pastos marinos en el Archipiélago. Tomado y modificado de Gómez-López *et al.* (2018).

Estación	Densidad de vástagos/m ²			
	2014	2015	2016	2017
Mauricio's Bay				
Oyster Creek				
Camp				
San Felipe				
Mc Bean				

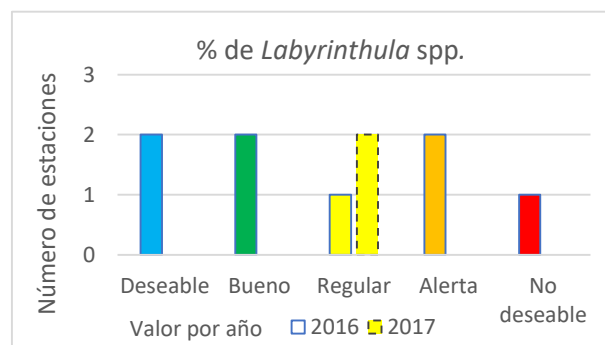


Figura 2. Porcentaje de afectación por hongo *Labyrinthula* spp. para las estaciones de pastos marinos en el Archipiélago. Tomado y modificado de Gómez-López *et al.* (2018).

Cotton Cay

Isleño

Mar Azul



Al comparar los datos de estos autores para el Archipiélago de San Andrés Providencia y Santa Catalina con los datos para el Caribe

continental colombiano se encuentra un gran contraste ya que en el Caribe continental se cuenta con praderas que en su mayoría se encuentran en estado “Deseable” y unas pocas en “bueno” y “regular”, evidenciando que las praderas en el archipiélago están expuestas a mayores presiones, ya sean antrópicas o naturales.

Otra forma de evaluar el estado de los ecosistemas de pastos marinos es mediante la medición de la biomasa y el área foliar. En este caso, al comparar los valores de un estudio actual con valores de estudios previos se pueden determinar cambios en el ecosistema que pueden ayudar al entendimiento de los factores que pueden estar influyendo en el estado de los ecosistemas de pastos. Así mismo, se sabe que estos ecosistemas presentan una alta variabilidad en cuanto a biomasa y producción y número de hojas, debido a su respuesta ante los diferentes factores ambientales y disturbios, lo cual depende principalmente de las condiciones locales y de la estructura y composición del ecosistema (Albis-Salas *et al.* 2010).

Tabla 5. Valores de biomasa foliar y total y área foliar de *Thalassia testudinum* en varias localidades del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Los datos para Sierra-Rozo *et al.*, 2012: Gris: zona no afectada por huracán Beta; Blanco: zona afectada por huracán Beta; * Datos tomados en 2006; ** Datos tomados en 2007. Tomado y modificado de Díaz *et al.*, 2003 y Albis-Salas *et al.* 2010.

Localidad	Biomasa total (Peso seco en g/m ²)	Biomasa foliar (peso seco en g/m ²)	Área foliar (cm ²)	Fuente
San Andrés	-	11 - 173	-	Ángel y Polanía (2001)
	801 – 1.743	71 - 98	-	Castillo-Torres (2002)
	638 – 2.019	49 - 133	-	Castillo-Torres (2002)
	1527,9 ± 1734,6	241,9 ± 127,3	28,0 ± 6,3	Sierra-Rozo <i>et al.</i> , (2012) *
Providencia	1693,4 ± 1056,8	305,6 ± 203,7	40,8 ± 11,9	
	674,8 ± 305,6	318,3 ± 127,3	28,3 ± 5,1	Sierra-Rozo <i>et al.</i> , (2012) **
	751,2 ± 114,6	369,2 ± 50,9	27,5 ± 13,0	

Hasta la fecha solo se cuenta con tres estudios en el Archipiélago (Tabla 5) en los que se han evaluado biomasa total y biomasa foliar, y solo uno ha evaluado el área foliar. Como mencionaban Díaz *et al.* en el 2003, es fundamental realizar evaluaciones periódicas de estas a nivel local, para entender las dinámicas y cambios que están enfrentando estos ecosistemas de importancia mundial.

2.1.4. Especies clave por su función y grado de amenaza de extinción

Parte de la importancia de este ecosistema, y la necesidad de conocer su estado de integridad biótica y de conservación se debe a que cumple funciones y provee servicios ecosistémicos de gran valor. Entre ellos encontramos una alta productividad primaria, la estabilización del sedimento a través de su sistema radicular, que funcionan como hábitat para diferentes tipos de organismos siendo las hojas sustrato para la fijación de organismos sésiles, generación de espacio para crianza para otras especies, la exportación de material vegetal vivo o detrítico y la recirculación de nutrientes al medio marino, presentan un efecto moderador sobre el movimiento del agua reduciendo la turbidez del agua circundante y protegiendo la zona costera ante eventos de tipo erosivo, además son considerados como algunos de los sumideros de carbono (Blue carbon) más importantes en el mundo. Estas funciones del ecosistema se clasifican a su vez en diferentes servicios ecosistémicos que corresponden a servicios de regulación y soporte, además de servicios de provisión y culturales, sintetizados en la tabla 6 (Díaz *et al.*, 2003; Vides *et al.*, 2016; Avendaño *et al.*, 2019).

“Las praderas de pastos marinos aportan grandes beneficios no solo a nivel ecológico, sino a nivel cultural y social, siendo uno de los pilares de las redes tróficas en los ecosistemas marino costeros y de las poblaciones humanas isleñas y costeras en el mundo”.

En cuanto a la función que tiene cada especie dentro del ecosistema encontramos que:

***Halophila decipiens*:** Se caracteriza por ser una especie pionera y de etapas sucesionales tempranas. Suele colonizar sustratos recientemente disponibles y aunque a un nivel muy bajo, contribuye con una primera estabilización de los sedimentos (Fonseca, 1989). Se caracteriza por una germinación rápida de las semillas que le permite colonizar fácilmente nuevos sustratos (Burkholder *et al.* 2007). Alta producción y exportación de semillas.

***Halodule wrightii*:** También se caracteriza por ser una especie pionera en el Caribe, colonizando fácilmente por semillas o por una rápida ramificación vegetativa (Burkholder *et al.* 2007). Tiene una mayor capacidad de estabilización del sustrato que *H. decipiens* debido a su mayor tamaño y a su capacidad de generar praderas densas. Se ha evaluado el papel del dosel como amortiguador del flujo del agua, siendo este mejor que el efecto de las comunidades de algas. Se suele entremezclar con *T. testudinum* y *S. filiforme*, que son especies de sucesión secundaria por lo que se le puede atribuir el rol de especie sombrilla o facilitadora en cuanto a la colonización de estas especies (Zieman, 1982)

***Syringodium filiforme*:** Es la segunda especie formadora de pastos marinos en Colombia, llamada también pasto manatí ya que es una fuente importante de alimento para este mamífero. Contribuye en gran medida a la estabilización del sedimento y en ciertas zonas

genera praderas a profundidades mayores que *T. testudinum* aumentando así la extensión de praderas a nivel batimétrico. Presenta praderas bastante densas que contribuyen a la reducción del flujo del agua.

***Thalassia testudinum*:** Se caracteriza por ser colonizadora tardía y por lo tanto ser una especie climática dentro de las praderas de pastos marinos. Dentro de las especies presentes en el Archipiélago es la que presenta un sistema rizoidal más robusto, por lo que se le atribuye la mayor capacidad de fijación y estabilización de los sedimentos. Su capacidad de colonizar sustratos con tamaños de partículas más grandes le permite tener una mayor distribución geográfica que las otras especies, además, es la especie de pasto más representativa en el Archipiélago y gran parte del Caribe.

Tabla 6. Servicios ecosistémicos asociados a los ecosistemas de pastos marinos.

Tipos de servicios	Servicio
Provisión	Pesca, productos bioquímicos y recursos medicinales
Regulación	Captura de carbono, estabilización de costas, regulación de ciclo hidrológico, ciclaje de nutrientes
Soporte	Biodiversidad y lugares de cría, formación de suelo, ciclaje de nutrientes
Culturales	Recreación y turismo, valores simbólicos y estéticos.

Los pastos marinos son ecosistemas muy vulnerables ante diferentes tipos de presión principalmente antrópicas, dentro de las que se encuentran el pisoteo y aplastamiento; extracción física manual o mecánica, remoción de la cobertura vegetal por motores de embarcaciones o el anclaje de estas, degradación del hábitat por contaminación con residuos sólidos y líquidos y no antrópicas como los efectos generados por el paso de tormentas tropicales (Gómez-Cubillos *et al.*, 2015; Vides *et al.*, 2016).

Actualmente las afectaciones generadas por la presión antrópica no han sido lo suficientemente altas para que se considere que las poblaciones de pastos marinos del Archipiélago se categoricen bajo algún nivel de amenaza según la IUCN (Tabla 7). No obstante, se hace importante avanzar en estudios locales en el Archipiélago para determinar si las poblaciones presentes allí cumplen con las condiciones para ser categorizadas de igual forma que a nivel global o si por el contrario es necesario modificar su categorización de riesgo.

Tabla 7. Estado de conservación de las especies de pastos marinos presentes en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. LC = Preocupación menor *población en aumento globalmente.

Especie	Categorización IUCN
<i>Syringodium filiforme</i>	LC
<i>Thalassia testudinum</i>	LC
<i>Halodule wrightii</i>	LC*
<i>Halophila decipiens</i>	LC

“Aunque las especies de pastos marinos presentes en el Archipiélago no cuentan con algún grado de amenaza o vulnerabilidad, este es un ecosistema frágil que puede tardar décadas en recuperarse tras la degradación por acciones antrópicas o por fenómenos naturales extremos”.

2.1.5. Panorama general del estudio y cambio de especies importantes en las últimas décadas en el Archipiélago

Para el año 2000, Díaz y Garzón-Ferreira hicieron un diagnóstico sobre el estado de la información base sobre los pastos marinos en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Para esta fecha ya se contaba con trabajos sobre localización, extensión y distribución; Mapas básicos; Estudios biológicos e inventarios para las islas-cayos Albuquerque y las islas-cayos Bolívar. Sumado a estos trabajos, programas o planes de seguimiento y monitoreo periódicos sobre el estado ambiental de las praderas; posibles tensores que afectan las características ecológicas de las praderas como pesca, contaminación del agua y sedimentación, destrucción física de las praderas por dragados, actividades náuticas u otras causas antrópicas; y evaluación del estado de “salud” ambiental para las islas de San Andrés y Providencia.

Posteriormente, en el año 2003 Díaz *et al.*, abordan el tema de los pastos marinos de Colombia, pero hacen una recopilación bastante específica para el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina en el que recopilan toda la información existente hasta la fecha.

Los estudios posteriores se empezaron a centrar más en la estructura de la comunidad asociada a pastos (Amórtegui Rodríguez *et al.*, 2006; Rodríguez *et al.*, 2010; Albis-Salas y Gavio, 2011), medición, evaluación y/o cuantificación de servicios ecosistémicos asociados a pastos marinos (Guerra *et al.*, 2017), y en estado del ecosistema (Rodríguez-Rámirez y Reyes-Nivia 2008; Sierra-Rozo *et al.*, 2012; Gómez-López, *et al.*, 2018). No obstante, aún hace falta avanzar en conocimiento sobre línea base para estos ecosistemas, además de la implementación de un plan de monitoreo y análisis de la información sistemático para mantener la información y el conocimiento asociado a pastos marinos actualizado.

2.2. Vulnerabilidad, amenazas, y antecedentes históricos de afectaciones en los ecosistemas frente a huracanes.

2.2.1. Factores biológicos de vulnerabilidad de los pastos marinos frente cambios ambientales o disturbios relacionados directa o indirectamente con huracanes

Los ecosistemas de pastos marinos y los servicios ecosistémicos que brindan se ven afectados negativamente por una amplia variedad de actividades humanas y fenómenos ambientales. En particular, las praderas de pastos marinos se ven afectadas negativamente por los impactos de las poblaciones humanas que viven cerca de la costa. Se han documentado los impactos individuales del desarrollo costero, el deterioro de la calidad del agua y el cambio climático, los cuales han hecho desaparecer a un ritmo de 110 km² /año la cobertura de estos ecosistemas desde 1980, además el 29% de la extensión conocida del área ha desaparecido desde que las áreas de pastos marinos se registraron inicialmente en 1879. Se han reportado tasas de disminución de hasta 7% al año desde 1990 las cuales son comparables a las reportadas para manglares, arrecifes de coral y selvas tropicales, colocando a los pastos marinos entre los ecosistemas más amenazados de la tierra (Waycott *et al.*, 2007).

“A nivel mundial, desde que se tienen registros de las praderas de pastos marinos se sabe que se ha perdido el 29% de extensión original, mientras para la bahía de Cartagena en Colombia se ha reportado una pérdida del 92%”.

Para el Caribe colombiano, Díaz y Gómez-López (2003) hicieron un análisis histórico de la distribución de las praderas de pastos marinos en la bahía de Cartagena y áreas aledañas; concluyeron que de las más de 1,000 hectáreas de praderas existentes en 1935-45, sobrevivían apenas 76 en el año 2001, esto se traduce en una pérdida del 92% en 70 años, atribuida principalmente a la reapertura del canal del Dique en la década de 1930, lo cual introdujo cantidades importantes de aguas dulces, turbias y de sedimentos a la bahía, y sucesivamente acelerada por el desarrollo de la zona industrial de la ciudad, el vertimiento de aguas servidas industriales y domésticas, dragados y obras de infraestructura en el litoral.

Entender los rangos y las limitaciones ambientales de los pastos nos permite aproximarnos a la vulnerabilidad que estos organismos tienen frente a diferentes tipos de factores. Los pastos marinos requieren de ciertas condiciones ambientales para su subsistencia y su crecimiento, gracias a los cuales pueden desarrollar y completar su ciclo de vida. Además,

estos factores determinan en gran medida la distribución espacial de las distintas especies de pastos debido a que cada una tiene requerimientos propios según su fisiología y su metabolismo. En este sentido, se destacan por su importancia: luz, temperatura, salinidad, sustrato, movimiento del agua y disponibilidad de nutrientes (Díaz *et al.*, 2003).

- **Luz**

Es el principal factor ambiental que controla la sobrevivencia y distribución batimétrica de los pastos marinos. *T. testudinum*, *S. filiforme* y *H. wrightii* requieren entre 15 y 30% de la luz incidente para subsistir. Por su parte, las especies del género *Halophila* parecen requerir menos luz (aprox. 6-12%), lo que les posibilita vivir en aguas relativamente turbias y a mayor profundidad (Morris y Tomasko, 1993; Díaz *et al.*, 2003). Virnstein y Hall en 2009 estudian poblaciones de *Halophila* al este de la Florida EE.UU. y encontraron que *Halophila decipiens* siempre se encuentra a mayor profundidad que las especies que forman el dosel y muy rara vez se encuentran en aguas a menos de 0,5 m. No obstante, estos porcentajes dependen de las características climáticas y de la latitud.

- **Temperatura**

Se ha reportado para las especies *T. testudinum*, *S. filiforme* y *H. wrightii* que el óptimo de temperatura del agua se encuentra entre 20 y 30 °C, aunque *H. wrightii* es más euritérmica que las otras dos, es decir que tolera un rango más amplio de temperatura. Esto explica por qué *H. wrightii* se encuentra comúnmente en zonas más someras, donde hay mayor variación en la temperatura, y se suelen presentar períodos prolongados de temperaturas extremas. En contraste, *S. filiforme* es la más sensible a variaciones de temperaturas, presentando altas mortalidades cuando el agua baja a temperaturas inferiores a los 20°C (Zieman, 1975a, 1982; Díaz *et al.*, 2003). Dawes *et al.*, en 1989 observaron a lo largo de 5 años que, en la Florida EE.UU., la temperatura del agua oscilaba entre 15 y 30°C a lo largo de todo el año, pero *H. decipiens* solo estaba presente entre Julio a septiembre, cuando la temperatura del agua se encontraba cercana a los 30°, con lo que determinaron que esta especie presenta una tolerancia a la temperatura bastante limitada.

- **Salinidad**

Aunque el rango de tolerancia de las diferentes especies de pastos marinos a las fluctuaciones de la salinidad es bastante amplio durante cortos periodos de tiempo, todas ellas tienen su óptimo en un rango entre 24 a 35 ‰. Cuando la salinidad se acerca a los extremos del rango de tolerancia las especies tienden a presentar exfoliación. *H. wrightii* es una especie ampliamente eurihalina que tolera rangos de salinidad entre 9,0 y 52,5 ‰, por su parte *T. testudinum* tiene una tolerancia intermedia con un óptimo entre 24 y 35 ‰, y *S. filiforme* y *H. decipiens* son especies consideradas estenohalinas, es decir que su rango de tolerancia es bastante bajo presentando una respuesta fotosintética negativa en

salinidades inferiores a 25 ‰ (Zieman 1975a; b; Zieman, 1982; Diaz *et al.*, 2003). De hecho, Dawes *et al.*, en 1989 evaluaron la respuesta fotosintética en *H. decipiens* y encontraron que esta solo era positiva en valores cercanos a 35 ‰, aunque posteriormente Virnstein y Hall en 2009 encontraron praderas de *H. decipiens* creciendo frecuentemente por debajo de los 25 ‰ en Florida; de forma similar, para el Caribe Colombiano, Diaz *et al.* en 2003 observaron *H. decipiens* en áreas con salinidad reducida, como en la bahía de Cispatá.

- **Sustrato**

Los pastos marinos crecen en una amplia variedad de sustratos, que van desde finos fangos hasta arenas gruesas e incluso fondos pedregosos y restos coralinos. Estos sedimentos permiten a las plantas anclarse para resistir el movimiento del agua y a su vez le brindan parte de los nutrientes que necesitan. Dado que poseen raíces, requieren una profundidad mínima en el sedimento para poder desarrollarse correctamente, por lo tanto, la profundidad efectiva del sustrato junto con la estabilidad física de este son las características más importantes para el establecimiento, crecimiento y desarrollo de los pastos (Diaz *et al.*, 2003). Algunos autores registran mayor biomasa y número de hojas en sedimentos finos, más raíces en sedimentos arenosos y mayor desarrollo de rizomas sobre arenas gruesas a medias con bajo contenido de materia orgánica (Albis-Salas *et al.* 2010).

Debido a las particularidades fisionómicas y anatómicas de cada especie, los requerimientos en cuanto al sustrato son distintos. Por ejemplo, *T. testudinum* tiene un alto rango de colonización de sustratos, encontrándose desde fondos de partículas finas hasta capas delgadas de sedimento sobre rocas y zonas pedregosas, pero según la profundidad de los sedimentos el crecimiento de *T. testudinum* será más exuberante, alcanzando su ideal en presencia de por lo menos 10cm de sedimentos, e igualmente, como se ha descrito para la isla de Providencia, cuando crece sobre zonas pedregosas y de restos coralinos la cobertura de pastos tiende a ser baja con plantas de hojas cortas y anchas (Zieman, 1982; Diaz *et al.*, 2003).

El género *Halophila* también se puede encontrar sobre una gran variedad de sustratos, aunque se le atribuye una baja capacidad para estabilizar sedimentos debido a su pequeño tamaño, raíces poco profundas y a que su crecimiento no suele ser tan denso (Fonseca, 1989). Fonseca y Fisher (1986) evaluaron poblaciones de *H. decipiens* que estaban presentes sobre sedimentos principalmente silíceos y tenían un diámetro medio de partícula de 0,50 mm; por otro lado, Fonseca (1986) estudió poblaciones presentes sobre arena calcárea con un diámetro promedio de 0.40 mm. Lo anterior demuestra que el tamaño de partícula del sedimento puede limitar a esta especie. En el caso de *H. wrightii*, se sabe que puede colonizar sedimentos de escaso espesor en un área de mínima estabilidad hidráulica gracias a su sistema radicular superficial. Finalmente, *S. filiforme* también crece sobre una amplia variedad de sustratos, pero se empieza a ver limitada en zonas pedregosas o de sedimentos de grandes tamaños de partícula, en donde se ha

apreciado que solo crece *Thalassia* (Díaz *et al.*, 2003). En el Caribe colombiano y en Indian River Lagoon, Florida *S. filiforme* crece sobre sustratos compuestos principalmente de partículas finas de arenas litoclásticas, arenas bioclásticas y lodos altamente orgánicos (Short *et al.*, 1993; INVEMAR, 2004).

- **Disponibilidad de nutrientes**

Varios nutrientes son esenciales para el crecimiento de los pastos marinos. Se ha demostrado que las praderas de pastos marinos pueden estar limitadas en N, P y / o Fe (Ralph *et al.* 2007). En general, los pastos adquieren la mayoría del carbono inorgánico del CO₂ disuelto en el agua y asimilan el N y el P de los sedimentos a través de sus raíces y rizomas, al igual que de la columna de agua a través de las hojas (Phillips y Meñez, 1988 en Díaz *et al.*, 2003). Sin embargo, desde la década de los 90 se ha prestado mayor atención a la contribución de la toxicidad directa del nitrógeno y la anoxia de sedimentos como mecanismos de mortalidad o limitantes del crecimiento de los pastos (Ralph *et al.* 2007).

Burkholder *et al.* en el 2007 hacen una exhaustiva revisión sobre los efectos de la eutrofización sobre los pastos marinos y listan cuatro categorías de respuesta de los pastos al enriquecimiento de nutrientes y las condiciones ambientales, resumidas como: (i) el crecimiento y la fisiología responden favorablemente a las adiciones en hábitats bajos en nutrientes donde los nutrientes son el único factor ambiental que limita el crecimiento; (ii) hay una respuesta fisiológica positiva pero no un aumento en el crecimiento, en hábitats bajos en nutrientes donde factores ambientales distintos del nutriente agregado limitan el crecimiento; (iii) no hay crecimiento ni respuesta fisiológica, en ambientes ricos en nutrientes donde los suministros de nutrientes son excesivos; (iv) hay una respuesta fisiológica negativa y una inhibición del crecimiento por el nutriente agregado. De igual forma, otros estudios han sugerido mecanismos indirectos por los cuales un mayor suministro de nutrientes podría promover el declive de los pastos como, por ejemplo: limitación de la luz por florecimientos algales o aumento en la carga epífita y alteraciones biogeoquímicas desfavorables en el hábitat con consecuencias como tasas de crecimiento más lentas, biomasa reducida y déficit de clorofila en los brotes (Ralph *et al.* 2007).

Debido a las particularidades fisiológicas y metabólicas de cada especie, la respuesta ante los nutrientes es diferente. Por ejemplo, para las especies *H. wrightii* y *S. filiforme* se han realizado varios estudios en los que el enriquecimiento de N y P tanto en la columna de agua como en los sedimentos han presentado una reducción en el crecimiento de estas especies (Burkholder *et al.* 2007). Por su parte, los estudios sobre *T. testudinum*, no solo ha mostrado una reducción en el crecimiento a partir del enriquecimiento del sedimento y de la columna de agua por N y P a corto plazo, sino que han evidenciado que el exceso de N a largo plazo conlleva a la muerte de esta especie a lo largo del tiempo y al posterior remplazo de cobertura de *T. testudinum* por *H. wrightii* (Fourqurean *et al.* 1995; Burkholder *et al.* en el 2007).

- **Movimiento del agua**

El movimiento del agua, es decir, las condiciones hidrodinámicas del entorno marino, influyen en todos los aspectos de vida de los pastos marinos: los nutrientes y el oxígeno que obtienen, el sedimento que colonizan, la polinización de sus flores, la importación/exportación de materia orgánica, la luz que llega a sus hojas, los organismos que viven en las praderas, entre otras. Aunque desafortunadamente, la dinámica de fluidos a menudo se pasa por alto en el estudio de los sistemas de pastos marinos (Phillips & Meñez, 1988; Koch et al., 2006).

Tal es la influencia del movimiento del agua, que donde las corrientes son fuertes y persistentes se generan claros en patrones de medialuna u ondas que a menudo forman agujeros sin cobertura de pastos marinos, los cuales atraviesan los pastizales en las direcciones del flujo de la corriente principal, lo cual se da por erosión y arrancamiento de pastos en un borde y sedimentación y enterramiento en el otro. De igual forma, se generan zonas con sedimentos más gruesos provocando así praderas de pastos menos densas o menos exuberantes (Zieman, 1982; Koch et al., 2006). En contraste, la reducción del flujo dentro del dosel de los pastos marinos provoca (i) la deposición y retención de sedimentos más finos; (ii) mayor deposición de larvas planctónicas de invertebrados en los márgenes del dosel y el posible agotamiento dentro de los lechos; (iii) mayor captura de macroalgas a la deriva; (iv) un ambiente nutricional modificado para los animales que se alimentan en suspensión y para los pastos marinos mismos; (v) posible reducción en la capacidad fotosintética de las praderas; (vi) aumento en la materia orgánica y los niveles de N del sedimento (Koch et al., 2006; Peterson et al. 2014; Guerra-Vargas et al. 2020).

“las barreras coralinas aledañas a las praderas de pastos marinos funcionan como escudos protegiendo y mitigando los efectos de las olas y las condiciones de tormenta sobre las praderas y la laguna del arrecife haciendo más óptimas las condiciones para el establecimiento y desarrollo de estos importantes ecosistemas”.

Otro factor muy importante en las condiciones hidrodinámicas asociadas a los pastos marinos, son las barreras coralinas aledañas, las cuales protegen y mitigan los efectos de las olas y las condiciones de tormenta en las praderas de pastos marinos y la laguna del arrecife haciendo más óptimas las condiciones para el establecimiento y desarrollo de los pastos marinos (Gillis et al., 2014; Guannel et al., 2016; Guerra-Vargas et al. 2020).

Guerra-Vargas et al. en el 2020 relacionan la exposición de las praderas de pastos marinos en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina con la intensidad del oleaje a partir de imágenes satelitales y un análisis de la complejidad y continuidad de las barreras coralinas asociadas. En este caso, se pudo comprobar el efecto amortiguador de la barrera coralina en cuanto a la intensidad del oleaje, ya que en donde se encontraban brechas en

la barrera del arrecife se relacionó con la perturbación de olas altas y las condiciones expuestas para las praderas, mientras que la continuidad de la barrera se relacionó con la perturbación de olas bajas y las condiciones protegidas.

De igual forma, se relacionó una mayor homogeneidad en los sedimentos, además de sedimentos más finos para las zonas menos expuestas, mientras que zonas más expuestas contaban con sedimentos de mayor tamaño y mucho más heterogéneos. Así mismo ocurrió con el contenido de materia orgánica y de Nitrógeno en el sedimento, siendo estos mayores en los sitios menos expuestos a la intensidad del oleaje. Finalmente, respecto a las comunidades de *T. testudinum*, encontraron que en los sitios expuestos se presenta una disminución de la biomasa subterránea, mientras que el aumento de la profundidad se correlacionó con una mayor biomasa entre las estaciones de muestreo.

Además, la proporción de biomasa de raíces respecto a las hojas verdes se duplicó en los sitios protegidos. Los investigadores atribuyeron esto a que (i) las plantas de pastos marinos en condiciones expuestas desarrollan una mayor biomasa en los rizomas que en las raíces comparado con las zonas protegidas, ya que requieren un mecanismo fuerte para anclarse en el sustrato, (ii) los prados a menores profundidades desarrollan una mayor biomasa viva debajo del suelo respecto a los prados más profundos debido a los efectos de perturbación de las olas que son más intensos entre más cerca se está de la costa, haciendo que los pastos marinos aumentan su biomasa subterránea (principalmente rizomas) para tolerar esta perturbación, (iii) los pastos marinos en condiciones protegidas podrían aprovechar que el sedimento es más rico en materia orgánica y usarla como fuente de nitrógeno, desarrollando mayor biomasa de raíces para absorber nitrógeno de la materia orgánica disponible en los sedimentos, especialmente en el agua oligotrófica alrededor de la isla de San Andrés.

A pesar de que el movimiento y la velocidad de las corrientes son un factor muy importante en el desarrollo, colonización y establecimiento de las praderas de pastos marinos, y de que se ha registrado que las zonas que tienen mayores velocidades de corriente son las que suelen presentar las mayores pérdidas de cobertura de pastos en eventos de tormentas extremas o huracanes, hasta la fecha no se cuenta con información puntual sobre la tolerancia o los límites de velocidad máximos antes de sufrir desprendimiento o arrancamiento, a excepción de *H. decipiens*, para la cual se ha reportado que a partir de corrientes de fondo de 2,4 m/s se pueden presentar pérdidas de cobertura dramáticas (Cabaço et al., 2008). Por otro lado, la información sobre desprendimiento o enterramiento asociado a altura de olas tampoco se ha documentado para pastos marinos a nivel de especie, aunque se ha abordado el tema de afectación a ecosistemas de pastos marinos por altura de la ola mediante el uso de diferentes modelos con el fin de realizar simulaciones sobre alturas de oleaje en eventos extremos o entorno al cambio climático.

Saunders *et al.*, en el 2014 modelaron los efectos del aumento del nivel del mar a raíz del cambio climático sobre las comunidades de pastos marinos de Lizard Island, Gran Barrera

de Coral, Australia, y no obtuvieron resultados alentadores. Para las diferentes simulaciones que realizaron obtuvieron pérdidas de cobertura de pastos marinos entre el 10 – 85 %, y siempre la probabilidad de presencia de pastos marinos disminuyó con los aumentos en cada uno de los parámetros de las olas (altura, periodo y velocidad de olas). Esto se le atribuyó a factores como el aumento en la erosión, la rotura de plantas, la reducción en el potencial de establecimiento o una combinación de factores. Además, describieron que un aumento del nivel del mar para 2100 de aproximadamente 1 metro de altura y con una tasa de acreción de los corales de al menos 5mm por año no sería suficiente y al cabo de 2100 las praderas de pastos marinos desaparecerían en su totalidad en esta región. Esto se dará principalmente por la profundización del agua debido al aumento del nivel del mar, trayendo diferentes consecuencias: (i) reducción de la protección de la barrera coralina, (ii) olas más grandes y enérgicas atravesarán el arrecife hacia la laguna, (iii) los pastos marinos profundos se verán afectados negativamente por la reducción de la luz; (iv) mayor turbidez, trayendo consigo una reducción de la idoneidad del hábitat para los pastos marinos con su consecuente pérdida.

Para el archipiélago, se han realizado diferentes descripciones de las corrientes marinas, detallando las trayectorias, la dominancia y el máximo del flujo, además de una velocidad de corriente siempre superior a 0.5 m/s en la estación de vientos de diciembre (CORALINA-INVEMAR, 2012). Esta información puede servir de referencia para diferentes modelos y simulaciones en cuanto a obtener un mejor entendimiento de este importante factor sobre las comunidades de pastos marinos a nivel local.

En San Andrés Isla, se ha determinado que la barrera arrecifal puede disminuir en cerca del 90% la energía del oleaje (altura de las olas), reduciendo olas de 4 m de altura a cerca de 0,5 m, proporcionando condiciones de calma aptas para el desarrollo de las praderas de pastos marinos en las lagunas arrecifales de la Isla (Prato et al., 2020).

2.2.2. Factores de afectación relacionados con huracanes

En la actualidad, los huracanes y tormentas tropicales en el Atlántico occidental han incrementado en frecuencia e intensidad y se pronostica que continúe este patrón de ascenso en los próximos años (Webster *et al.*, 2005). Históricamente estos eventos meteorológicos han producido severos daños sobre la biodiversidad marina de la región, siendo las comunidades bentónicas marinas unas de las más afectadas. Varios estudios han evidenciado que después del paso de huracanes se produce un desequilibrio en la estructura de los ecosistemas, lo cual se manifiesta en un cambio drástico en la estructura de las comunidades (Hagy, *et al.*, 2006; Paerl *et al.*, 2006; Moreira *et al.* 2011). No obstante, las evaluaciones de los efectos sobre la calidad del agua y los ecosistemas a causa de estas tormentas indican que dichos efectos varían sustancialmente en cuanto a la magnitud y duración del huracán (Paerl *et al.*, 2006). Los principales efectos o tensores directos e indirectos sobre los factores biológicos incluyen: (Díaz *et al.*, 2003; Hagy, *et al.*, 2006)

- Erosión y resuspensión de sedimentos por las olas y las corrientes, causando un aumento de la turbidez del agua
- Aumento de turbidez en zonas estuarinas o de descarga de agua dulce por el aumento del flujo de sedimentos. Esto puede llevar posteriormente a un aumento de la comunidad planctónica disminuyendo el oxígeno.
- Disminución de la salinidad a causa de las excesivas lluvias.
- Reemplazo de las aguas costeras por aguas oligotróficas, bien oxigenadas y con pocos nutrientes.
- Mareas de tormenta y aumento en la altitud de las olas debido a los fuertes vientos.
- Alteraciones en el flujo de materia orgánica, ciclo de nutrientes y cadena alimenticia por pérdida de cobertura de pastos.

2.2.3. Rangos de tolerancia de los pastos marinos a tensores causados por huracanes

La tolerancia que tienen las diferentes especies de pastos marinos a los diferentes tensores expuestos anteriormente depende tanto de las características del huracán, como de la comunidad que se está viendo afectada y las condiciones locales como: profundidad, pendiente, ancho de la plataforma, tipo, tamaño y forma de sustrato, el grado de fijación de los organismos y nivel de desarrollo de la barrera coralina cuando se localiza en sotavento. En las praderas de pastos marinos el daño parece ser específico de cada especie y los efectos incluyen defoliación, exposición de raíces, rizomas y/o estolones, desprendimiento, enterramiento, abrasión por arena y mortalidad causada por un cambio en los factores ambientales como la salinidad, la incidencia de luz, entre otros (Preen *et al.* 1995, Cruz-Palacios y van Tussenbroek, 2005; Rioja-Nieto *et al.* 2012).

En la tabla 8 se resume la información presente en la revisión del numeral 2.1 de este documento que corresponde a los rangos de tolerancia de las especies de pastos marinos a las fluctuaciones de rangos ambientales. Cabe aclarar que esta información es secundaria y se ha obtenido en algunos casos en zonas diferentes al Caribe tropical (Caribe subtropical, Atlántico occidental templado) sirviendo como una aproximación, pero sabiendo que se pueden presentar diferencias con las poblaciones locales, por lo que se recomienda establecer estudios que promuevan la identificación de estos rangos para las especies a nivel local.

Tabla 8. Rangos de tolerancia de las especies de pastos marinos presentes en el archipiélago para distintos factores ambientales. * El “+” implica que el rango es un valor mayor pero no se especifica el valor en los estudios. **No se encuentra información respecto al tamaño directamente.

Especie Factor	Syringodium filiforme		Thalassia testudinum		Halodule wrightii		Halophila decipiens	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Luz incidente	15%	30%	15%	30%	15%	30%	6%	12%

<i>Temperatura*</i>	20° C	30° C	20° C	30° C	20° C	30° C ++	20° C ++	30° C
<i>Salinidad</i>	24 ‰	35 ‰	24 ‰	35 ‰	9,0 ‰	52,5 ‰	24 ‰	35 ‰
<i>Sustrato**</i>	<i>sedimentos finos</i>		<i>Arenas finas</i>	<i>Fondos rocosos</i>	<i>sedimentos finos</i>		<i>sedimentos finos</i>	

En la Tabla 9, se resume la tolerancia de las especies de pastos marinos presentes en el Archipiélago a los tensores causados por el cambio en las condiciones hidrodinámicas a raíz de las mareas de tormenta y el aumento en la altitud, frecuencia y velocidad de las olas debido a los fuertes vientos de una tormenta tropical o huracán, conllevando así a cambios en los niveles de nutrientes, y remoción y agregación de sedimentos del fondo marino. Esta tolerancia, como se ha mencionado anteriormente, depende no solo de las condiciones locales, sino de la especie, la estación climática y el tipo, intensidad y duración de la tormenta. Cabe tener en cuenta que esta información es secundaria, tomada de estudios realizados en el caribe tropical y subtropical, siendo muy contrastante hasta en comunidades locales y sirviendo solo como una aproximación al escenario real de lo que puede ocurrir en el archipiélago, por lo que los tensores presentes en la Tabla 9 se vuelven objeto de estudio clave para entender mejor las dinámicas locales de estos ecosistemas, la plasticidad y las capacidades adaptativas de las diferentes especies de pastos marinos, además, para establecer rangos locales de tolerancia a estos factores.

Tabla 9. Tolerancia a los diferentes tensores o efectos de los tensores según información secundaria. Nivel de tolerancia categorizado en 5 niveles, siendo 1 la tolerancia más baja y 5 la mayor tolerancia a los tensores: Rojo (1), Naranja (2), Amarillo (3), Verde (4), Azul (5)

<i>Tensor</i>	<i>S. filiforme</i>	<i>T. testudinum</i>	<i>Halodule wrightii</i>	<i>Halophila decipiens</i>
<i>Arrancamiento.</i>	Media-Baja	Alta	Baja	Baja
<i>Defoliación</i>	Baja	Alta	Baja	Baja
<i>Exposición de partes subterráneas.</i>	Media-Baja	Media	Baja	Baja
<i>Enterramiento.</i>	Media-Baja	Alta	Baja	Baja
<i>Nutrición</i>	Media-Alta	Media-Baja	Media-Alta	Alta

2.3 Antecedentes de vulnerabilidad y afectación por huracanes a nivel mundial, regional y local

Las afectaciones por huracanes sobre los ecosistemas de pastos marinos han sido ampliamente estudiadas y documentadas durante las últimas décadas, y aunque los efectos de los huracanes y las grandes tormentas pueden ser parte de los procesos naturales y la

dinámica de los lechos de pastos marinos (Cruz-Palacios y Van Tussenbroek, 2005), la intensidad, frecuencia y duración de estos fenómenos puede llevar a una pérdida importante de cobertura de estos ecosistemas con la consecuente pérdida de los servicios ecosistémicos que ofrecen.

“Aunque los efectos de los huracanes y las grandes tormentas pueden ser parte de los procesos naturales y la dinámica de los lechos de pastos marinos, la intensidad, frecuencia y duración de estos fenómenos puede llevar a una pérdida importante de cobertura de estos ecosistemas con la consecuente pérdida de los servicios ecosistémicos que ofrecen”.

En el Pacífico occidental y en general en el Indo-Pacífico se han registrado las mayores afectaciones sobre los ecosistemas de pastos marinos por ciclones tropicales o huracanes, los cuales pueden causar la destrucción de miles de kilómetros cuadrados de praderas (Poiner *et al.*, 1989; Preen *et al.*, 1995). Un ejemplo de esto fue el ciclón “Fran” de categoría 2 con vientos de hasta 130 km/h que en el año 1992 que afectó a Hervey Bay en costa oriental de Australia. Fran vino acompañado con intensas lluvias que generaron dos grandes inundaciones en un periodo de solo 3 semanas, las cuales acabaron con aproximadamente 1000 km² de cobertura de pastos marinos. Los pastos marinos en aguas de más de 10 m de profundidad murieron como resultado de la privación de luz causada por el aumento en la turbidez de la columna de agua, mientras que los pastos en aguas de menos de 10 m sufrieron arrancamiento. Tras el disturbio, diez meses después no se había evidenciado recuperación de los pastos, y solo hasta 2 años posteriores al ciclón se empezó a observar la recuperación de los ecosistemas, lo cual se le atribuye principalmente a la germinación de semillas presentes en los sedimentos de las zonas de más de 10 m de profundidad, ya que en profundidades menores no se apreció el regreso de las plantas probablemente como consecuencia del enterramiento y muerte por abrasión de las semillas (Preen *et al.*, 1995).

Como se ha mencionado anteriormente, los efectos de fenómenos como huracanes o ciclones sobre los ecosistemas de pastos marinos son sumamente variables, y dependen de la magnitud y duración del huracán (Paerl *et al.*, 2006), además de las características de las comunidades y las condiciones locales (Rioja-Nieto *et al.* 2012). Esto se puede evidenciar al contrastar los resultados de diferentes estudios a lo largo del mundo.

Por ejemplo, Poiner *et al.*, 1993 evaluó los pastos marinos del Golfo de Carpentaria, Australia tras el paso de cuatro ciclones entre 1984 y 1987. Los ciclones “Kathy” de categoría 4 e “Irma” de categoría 2 no evidenciaron daños sobre los pastos, mientras que los ciclones ‘Sandy’ de categoría 4 y ‘Jason’ de categoría 3, los afectaron considerablemente. En el caso del ciclón “Sandy”, los daños fueron causados porque golpeó durante la marea baja y tuvo una marejada ciclónica negativa, lo que redujo aún más la profundidad del agua exponiendo extensas áreas de pastos marinos; esta exposición a los vientos y a la lluvia provocó la pérdida de aproximadamente 151 km² de los 183km² de pastos que presentaba la zona

antes del evento, a causa de arrancamiento, enterramiento por gruesas capas de sedimento o muerte por estrés fisiológico. La recuperación se empezó a notar solo hasta 3 años después del disturbio en solo 20% del área afectada y solo hasta 5 años después del paso de Sandy se pudo apreciar la recuperación del ecosistema. Por su parte “Jason” causó en áreas someras una disminución de la biomasa por arrancamiento, y en zonas más profundas se eliminaron casi todas las partes aéreas y los rizomas porque fueron enterrados por sedimentos. Sin embargo, en este caso el crecimiento y recuperación de los pastos fue visible menos de tres semanas después del ciclón y el área total de pastos marinos no cambió (Poiner *et al.*, 1989; Poiner *et al.*, 1993).

Otros estudios en el Indo-pacífico describen efectos particulares tras los disturbios provocados por ciclones, tal es el caso de Birch y Birch que en 1984 evaluaron cómo *Thalassia hemprichii* (Ehrenberg) Aschers., fue la única especie de pastos marinos que quedó después del paso del ciclón “Althea” de categoría 3 en Queensland, Australia; de igual forma [Amoné-Mabuto *et al.* en 2017](#) hacen una revisión de los ciclones que afectaron Mozambique entre 1992 y 2013 (21 años), en los cuales el área total de pastos marinos se redujo de 12.076 ha a 6.199 ha (51% del área original), describiendo así los efectos provocados por los ciclones “Bonita” en 1996, “Eline” en 2000, “Japhet” en 2003 y “Favio” en 2007, todos de categoría 4. Entre 1998 y 2001 se reportó la pérdida de 721 ha de pastos marinos asociada a los ciclones “Bonita” y “Eline”, ya que presentaron vientos muy fuertes, pero “Eline” particularmente presentó lluvias muy intensas sumadas a inundaciones a las que se les atribuye la descarga de un exceso de sedimentos y nutrientes a la bahía, acompañados por una drástica disminución en la salinidad. De igual forma, 2001 fue el año con la captura anual más baja de sardina *Amblygaster sirm* Walbaum en el periodo comprendido entre 1999 y 2006, lo cual se atribuye de manera indirecta a las pérdidas de pastos marinos por los ciclones. Posteriormente, entre 2001 y 2004 se observó una recuperación gradual de pastos marinos donde 958 ha se reestablecieron de forma natural, seguido de la pérdida de 400 ha de pastos entre 2004 y 2013, debido en gran medida a factores antropogénicos; sin embargo, el paso del ciclón “Favio” en 2007 alcanzó vientos de aproximadamente 200 km/h y generó inundaciones que pueden haber favorecido la pérdida de pastos. Otro caso relevante fue en 2013 en Madagascar tras el paso del ciclón “Haruna” de categoría 3, en donde se hicieron muestreos 8 días antes y 3 y 12 días después del evento mostrando cambios significativos en la turbidez de la columna del agua, además de una disminución promedio de 36.3% de cobertura total de pastos marinos por transecto y una disminución de 8,5 cm en la altura del dosel en solo uno de los transectos. De igual forma muchos pastos marinos fueron desprendidos o asfixiados debido al entierro y la reducción de la penetración de luz. Para este estudio cada especie y cada transecto presentaron respuestas diferentes ante el paso del ciclón (Côté-Laurin *et al.*, 2017).

En el Atlántico Occidental los efectos de los huracanes en los lechos de pastos marinos tropicales y subtropicales han sido menos dramáticos que en el pacífico. (Cruz-Palacios y Van Tussenbroek, 2005). Por ejemplo, Byron y Heck en 2006 evaluaron los efectos del

huracán “Ivan” de categoría 3 en 2004 y “Katrina” de categoría 5 en 2005 sobre la costa de Alabama a partir de fotointerpretación e indicaron que no hubo grandes pérdidas de *H. wrightii* luego del paso de estos huracanes, siendo *H. wrightii* la especie dominante en esta zona. Aunque se describió una inundación excesiva y el arrancamiento y enterramiento de algunas áreas de pastos después del paso de “Ivan”, se observó que los pastos marinos que se estaban recuperando después de 2004 habrían sido desarraigados o enterrados por “Katrina” en 2005 aunque sin generar mayores efectos en las praderas de pastos marinos. Este estudio fue el primero del atlántico en describir la importancia de realizar estudios pre-huracan para tener certeza total de los daños sobre los ecosistemas de pastos marinos. De igual forma, Hagy *et al.* en 2006 evaluaron los efectos de “Ivan” en Pensacola Bay, Florida. Ellos realizaron muestreos antes y después del huracán y encontraron que los lechos de pastos marinos sufrieron un daño mínimo, a pesar de que se dio una marejada ciclónica de 3.5 m que aumentó inicialmente la salinidad promedio de 23 a 30‰ y reduciendo las concentraciones de nutrientes y clorofila a. De igual forma la fuerza del viento fue suficiente para mezclar completamente la columna de agua durante la tormenta y la descarga de agua dulce del río más grande (*Escambia River*) se multiplicó por veinte durante los 4 días siguientes, estimulando una modesta floración de fitoplancton por el aumento de sedimentos y nutrientes y manteniendo un estado de hipoxia durante varios días. Aunque la perturbación física inmediata fue extrema, los efectos sobre la calidad del agua que persistieron más allá de los primeros días estuvieron dentro del rango normal de variabilidad para este sistema, por lo que parece ser bastante resistente frente al efecto de un huracán severo. Resultados similares fueron presentados por [Anton *et al.* en 2009](#) respecto a los efectos del huracán “Katrina” sobre los pastos marinos de Sandy Bay al norte del Golfo de México.

La comparación de estudios pre y post huracán no evidenciaron disminuciones en la densidad de pastos marinos, fauna asociada o abundancia de microalgas en la columna de agua y sedimentos. De igual forma, no se encontraron impactos importantes en la productividad primaria bruta, la respiración o la productividad neta de la columna de agua o el sedimento, lo que sugiere que el huracán tuvo poco impacto en el metabolismo del pasto. De hecho, se evidenciaron mayores afectaciones por cambios temporales naturales debido a la estacionalidad, indicando que esta pradera de pastos marinos era naturalmente muy dinámica y muy resistente al paso del huracán Katrina.

En contraste, un estudio de los pastos marinos en el sur de Florida realizado por Fourqurean y Rutten (2004), encontró pérdidas sustanciales (19%) de *S. filiforme*, y pérdidas solo del 3% de *T. testudinum* después del paso del huracán “Georges” de categoría 1, en 1998. De igual forma, Ridler *et al.* en 2006 reportaron una disminución en *S. filiforme* después de los huracanes “Frances” y “Jeanne” en 2004, en un estero de Florida, atribuido probablemente por una disminución de la salinidad bajo los límites de tolerancia de la especie.

“En el Caribe, la localidad geográfica determina la probabilidad del paso de un huracán, siendo máxima al noroeste de las Bahamas y decreciendo hacia el suroeste de la cuenca, siendo mínima (1-5% de probabilidad anual) para el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Sin embargo, se ha demostrado que el calentamiento global está incrementando la intensidad y frecuencia de los huracanes en esta zona”.

En la región Caribe, diferentes estudios han evidenciado que los huracanes han afectado notablemente los ecosistemas de pastos marinos (van Tussenbroek, 1994; Rodríguez-ramírez, 2008; Hernández-Delgado *et al.*, 2020). En esta región, la localidad geográfica determina la probabilidad del paso de un huracán, siendo máxima al noroeste de las islas Bahamas y decreciendo hacia el suroeste de la cuenca, siendo mínima (1-5% de probabilidad anual) para el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Pielke *et al.* 2003). Sin embargo, se ha demostrado que el calentamiento global está incrementando la intensidad y la frecuencia de los huracanes en esta área geográfica (Arellano-Méndez *et al.* 2011). Webster *et al.* en 2005 evidencian que desde los años 70, el porcentaje de huracanes de categoría 4 y 5 ha crecido aproximadamente al doble en el Caribe. En el año 2005, Cruz-Palacios y Van Tussenbroek realizaron un estudio en la Península de Yucatán, en Puerto Morelos, México en donde simularon los efectos generados por el paso de un huracán sobre los ecosistemas de pastos marinos de la zona. Al evaluar la remoción de sedimentos, encontraron que *S. filiforme* presentó pérdidas de hasta el 61% en su cobertura, mientras que *T. testudinum* resistió a casi todos los niveles de remoción de sedimentos, a lo cual le atribuyen las diferencias en el sistema de anclaje, donde *T. testudinum* posee raíces gruesas y profundas, a diferencia de *S. filiforme* que tiene profundidades medias de anclaje, pero rizomas ligeros, más delgados y casi flotantes. De igual forma a causa del enterramiento, *S. filiforme* presentó pérdidas de hasta el 94% de su cobertura y en ciertos puntos la pérdida fue total, por el contrario, *T. testudinum* presentó remoción parcial de los tejidos sobre el suelo, demostrando que la altura de las plantas no es un buen indicador de resistencia a este tensor. Cuatro meses posteriores al enterramiento se evaluó la capacidad de respuesta de cada una de las especies, en donde *T. testudinum* evidenció la presencia de un banco de meristemos inactivos que pueden activarse para producir tejido foliar en varios meses, además de que almacenan carbohidratos que les permiten resistir breves períodos de ausencia de actividad fotosintética, mientras que *S. filiforme* no logró recuperarse debido a sus rizomas delgados que no tienen una gran capacidad de almacenamiento, por lo que las reservas no fueron suficientes para formar hojas nuevas y sin un suministro continuo de carbono y oxígeno, los rizomas perecieron en 4 meses. El estudio concluyó que los efectos de las perturbaciones varían según la estación, lo cual se le atribuye a diferencias en los regímenes hidrodinámicos en los sitios, evidenciando a su vez diferencias en el tamaño de los sedimentos y la retención de nutrientes.

Otros estudios en el Caribe como los de Rioja-Nieto *et al.*, en 2012 evaluaron el efecto del huracán Emily de categoría 4 comparando la cobertura del sustrato, diez meses antes y dos meses después del paso del huracán, y encontraron que la cobertura de pastos marinos disminuyó en más del 50% lo que se sumó a una rápida recolonización de macroalgas que favoreció un cambio de fase en este sistema hacia una mayor dominancia de macroalgas, es decir un estado sucesional anterior. Por su parte Hernández-Delgado *et al.*, en 2020 evaluaron los efectos de los huracanes Irma y María de categoría cinco en Isla Culebra, Puerto Rico, y reportaron que la mayoría de los impactos documentados estuvieron asociados con el transporte horizontal de sedimentos, que resultó en entierro y asfixia de pastos. En menor medida se presentó formación de claros y enterramiento de pastos por restos de corales. Dentro de este estudio se correlacionó positivamente la disminución de los pastos marinos con la exposición a las olas, además se reportó un aumento en la turbidez del agua junto con un cambio en la carga potencial de nutrientes hasta 2 meses después del paso del huracán a causa de las fuertes lluvias. En este estudio no se midió directamente el enterramiento, pero se observó que la magnitud de los efectos del entierro podría depender del volumen de arena desplazada, el espesor de la capa de sedimentos depositados y la dinámica oceanográfica local, ya que después de unos meses del enterramiento a causa del paso de los huracanes, varias estaciones de muestreo se recuperaron, mientras otras presentaron pérdidas de cobertura de pastos y cambios de fase en la etapa sucesional del ecosistema. Además, un hallazgo notable fue la rápida recuperación, expansión y mayor dominio localizado de la hierba marina invasora *Halophila stipulacea* (Forssk.) Asch con consecuencias potencialmente significativas en la resiliencia del ecosistema y en la capacidad de los pastos marinos nativos para persistir y adaptarse a los impactos proyectados del cambio climático.

En Colombia son casi nulos los antecedentes sobre la evaluación inmediata de los impactos de los huracanes en los ecosistemas marinos, debido en parte a que nuestras costas no son sujetas a estos fenómenos como otras áreas del Caribe y Golfo de México (Rodríguez-Ramírez y Reyes-Nivia, 2008). No obstante, según los registros presentados por CORALINA-INVEMAR en el 2012, en los últimos 60 años, han pasado 30 ciclones (huracanes o tormentas tropicales) con nombre dentro del área del archipiélago, y según los registros históricos de huracanes para el área de las islas de San Andrés y Providencia, entre 1818 y 1988 se presentaron siete huracanes, siendo “Hattie” (1961) y “Joan” (1988) los de mayor impacto (Geister, 1992 en Rodríguez-Ramírez y Reyes-Nivia, 2008).

El huracán Beta en 2005 se constituyó en el huracán número nueve en afectar el Caribe colombiano desde 1818 y el cuarto en los últimos 44 años (1961-2005), este se formó entre las costas de Panamá y el Archipiélago de San Andrés y Providencia. Después de su formación la tormenta comenzó a intensificarse y a dirigirse hacia el norte, alcanzando vientos de 100 km/h cerca de San Andrés (a 60 km al este) y a su paso por inmediaciones de Providencia (este y norte de la isla), alcanzó a ser un huracán de categoría 1 estando a tan solo 15 km al norte de Providencia, con vientos de hasta 120 km/h y marejadas de 1.5 m por encima del promedio. Luego tomó dirección noroeste hacia Nicaragua y se convirtió

en huracán categorías 2 y 3, disipándose en tierra nicaragüense (Rodríguez-Ramírez y Reyes-Nivia, 2008). A tan solo 15 días de este fenómeno, el INVEMAR (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras) adelantó una evaluación rápida en los principales ecosistemas marinos y costeros, analizando 4 estaciones de pastos de la isla de Providencia en donde reportaron daños en las praderas marinas correspondientes a desprendimiento de algas y vástagos y descubrimiento de rizomas y raíces, estimando una pérdida en extensión y biomasa únicamente de manera cualitativa (Rodríguez-Ramírez y Reyes-Nivia 2008; Sierra-Rozo *et al.*, 2012;). Posteriormente Sierra-Rozo *et al.* en el 2012 presentaron resultados de una evaluación del estado del ecosistema de pastos un año y dos años después del paso del huracán (2006 y 2007) comparando dos estaciones sanas y dos afectadas, encontrando que las comunidades de pastos marinos en la isla de Providencia se encontraban sanas y sin signos de alteraciones significativas ocasionadas por el huracán. No obstante, se determinó que hubo una alteración en la etapa sucesional haciéndose más temprana dentro de las zonas afectadas, aunque al terminar el estudio se concluyó que dicha alteración se encontraba superada.

Posterior a este fenómeno, el Archipiélago ha sufrido dos huracanes de gran magnitud, nunca antes presenciados en las islas. El huracán Eta de categoría 4 a inicios de noviembre del año 2020 con vientos de hasta 222 km/h (IDEAM, 2020a), y después tan solo dos semanas llegó el huracán Iota de categoría 5 el 16 de noviembre de 2020 con hasta 260 km/h (IDEAM, 2020b; IDEAM, 2020c). Hasta el momento no se han publicado reportes de evaluaciones rápidas de los ecosistemas marinos y costeros posteriores al paso de estos huracanes, pero Dorado-Roncancio *et al.*, (datos no publicados) han avanzado en la medición de la composición granulométrica, biomasa aérea y subterránea, contenido de materia orgánica sedimentaria (MO) y crecimiento de pastos tras el paso de Iota en cuatro puntos al Este y NE de la isla de San Andrés. Esta evaluación rápida mostró cambios en la composición y el tamaño de partículas en el sedimento, un aumento en el contenido de MO, una disminución significativa en la biomasa de los pastos principalmente en el componente aéreo ya que se determinó que los individuos de pastos después de Iota presentaban un menor tamaño promedio que antes del huracán, y en promedio, se determinó que el crecimiento de *T. testudinum* en 3 de los 4 puntos evaluados disminuyó mostrando así una disminución en la productividad de las praderas. Estos resultados mencionados anteriormente se relacionaron con la pérdida de cobertura de pastos marinos y un aumento en la erosión costera y de sedimentos del fondo.

2.2.4. Localización de los ecosistemas de pastos más afectados por el paso de los huracanes en el Archipiélago.

La falta de estudios en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina respecto a la influencia de los huracanes sobre los ecosistemas de pastos marinos no permite proponer cuáles son las posibles áreas más vulnerables a partir de las afectaciones históricas, ya que los únicos estudios asociados a esta problemática son los realizados por Rodríguez-Ramírez y Reyes-Nivia en el 2008, por Sierra-Rozo *et al.* en el año 2012 para

Providencia y por Dorado-Roncancio *et-al.*, (datos no publicados) para San Andrés, los cuales no demostraron mayores afectaciones o consecuencias.

No obstante, a partir de información secundaria se sabe que el estado de los arrecifes de coral que protegen y rodean los ecosistemas de pastos, al igual que la cercanía a emisores o zonas estuarinas, la tasa de erosión de las costas o playas, la topografía del lecho submarino, el tipo de sedimentos de cada una de las praderas y la ubicación de estas respecto a sotavento o barlovento (en el momento de un fenómeno climático extremo) son los elementos primordiales en la evaluación y propuesta de áreas más o menos vulnerables. De esta forma, el uso de herramientas de modelación de las condiciones hidrodinámicas asociadas a las olas, en conjunto con mapas de los arrecifes y las praderas de pastos marinos, podrían representar una mayor aproximación a las praderas más vulnerables ante el paso de un fenómeno tropical extremo en el archipiélago.

Hasta la fecha no se tiene mayor conocimiento sobre muchas de estas características o factores ambientales o no se han integrado estos elementos con el fin de comprender mejor las dinámicas de las praderas del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina para evaluar la vulnerabilidad del ecosistema ante fenómenos climáticos extremos.

2.3. Estado del Arte en Protocolos de respuesta y restauración frente a huracanes para pastos marinos.

2.3.1. Protocolos generales de restauración y protocolos de restauración específica para pastos marinos post huracán.

Los protocolos de respuesta son un conjunto de acciones, procedimientos y medidas preventivas enfocados a establecer las acciones que permitirán dar una respuesta inmediata y oportuna en caso de una emergencia o un desastre, los cuales pueden presentarse en cualquier instante.

La tasa de destrucción y/o cambio de todos los ecosistemas en el mundo es acelerada, debido a prácticas humanas no sostenibles que se suman a eventos climáticos y ambientales cada vez más drásticos y con el agravante del cambio climático global. Ante esta situación, el manejo de ecosistemas a través de conservación y restauración ecológica toma fuerza como solución para revertir procesos de degradación de ecosistemas y pérdida acelerada de biodiversidad porque ya no es solo suficiente con conservar y proteger áreas representativas. La restauración de paisajes, ecosistemas, comunidades y poblaciones de plantas y animales, busca garantizar la sustentabilidad de sistemas naturales, seminaturales y sociales en grandes extensiones, y de esta forma garantizar la disponibilidad de servicios ambientales regionales, los cuales mantienen las economías funcionando (Vargas, 2011).

“La tasa de destrucción de todos los ecosistemas en el mundo es acelerada, debido a prácticas humanas no sostenibles, sumadas a eventos climáticos cada vez más drásticos y con el agravante del cambio climático global. Ante esta situación, el manejo de ecosistemas a través de conservación y restauración ecológica toma fuerza como solución para revertir procesos de degradación de ecosistemas y pérdida acelerada de biodiversidad”.

Hay varios elementos que menciona Vargas en 2011 fundamentales para comprender la restauración ecológica y sin los cuales ésta no tendrá el éxito deseado, siendo los más relevantes: (i) Entender que naturalmente los ecosistemas se recuperan por sí solos cuando no existen o se eliminan tensores o barreras que impiden su regeneración (restauración pasiva o sucesión natural); (ii) cuando los ecosistemas están muy degradados o destruidos, pierden sus mecanismos de regeneración y en consecuencia es necesario asistirlos para superar los tensores que impiden la regeneración y así garantizar el desarrollo de procesos de recuperación (restauración activa o asistida o sucesión dirigida o asistida); (iii) el entendimiento de conocimientos base, por ejemplo: estado del ecosistema antes y después del disturbio, grado de alteración, hidrología, geomorfología y suelos, causas por las cuales se generó el daño, estructura, composición y funcionamiento del ecosistema preexistente, condiciones ambientales regionales, interrelación de factores de carácter ecológico, cultural e histórico, disponibilidad de la biota nativa necesaria para la restauración, patrones de regeneración, o estados sucesionales de las especies, tensores y barreras que detienen la sucesión y el papel de la fauna en los procesos de regeneración; (iv) el éxito en la restauración dependerá de costos, las fuentes de financiamiento y voluntad política de las instituciones interesadas en la restauración; pero ante todo de la colaboración y participación de las comunidades locales en los proyectos. Los procesos de restauración presentan una serie de pasos que suelen ser comunes en casi todos, pero su aplicación total depende del estado de degradación del ecosistema que se va a restaurar y el tipo de ecosistema (Ver figura 3).

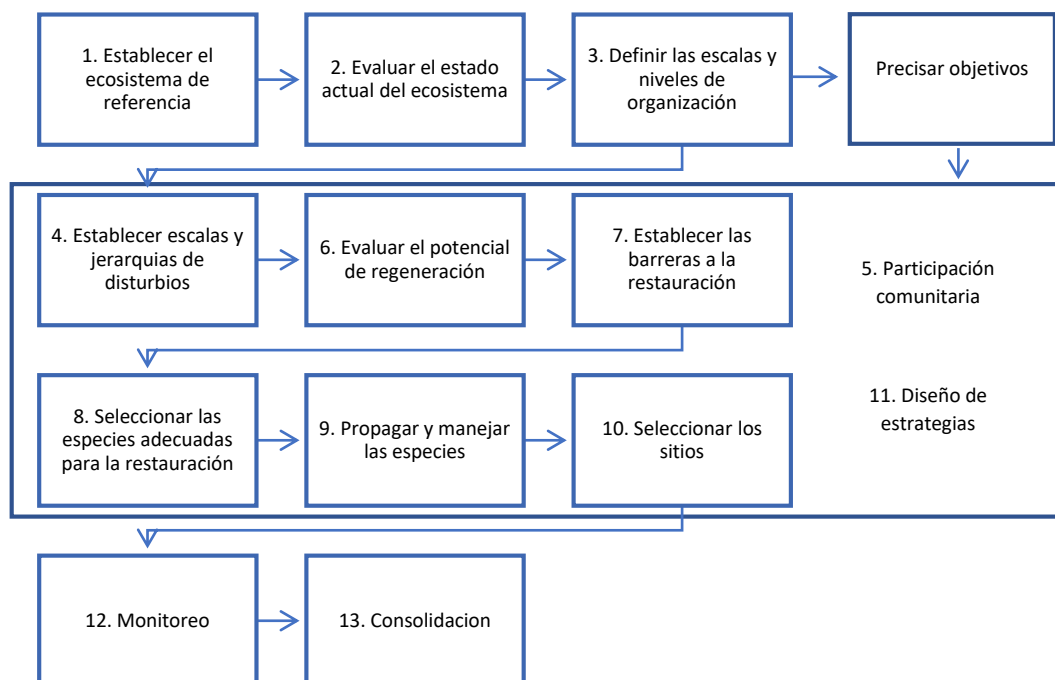


Figura 3. Secuencia y relaciones de los 13 pasos fundamentales en la restauración ecológica. Tomado y modificado de Vargas, 2011. Los pasos 5 y 11 son transversales y están presentes en casi todo el proceso de las fases diagnóstica y experimental. Esto quiere decir que la participación comunitaria es muy importante en todo el proceso de restauración y que el diseño de estrategias se va retroalimentando de los conocimientos derivados de los pasos 6 a 10.

Al abordar el tema de la restauración de ecosistemas de pastos marinos encontramos protocolos a nivel general y protocolos a nivel específico, siendo los protocolos a nivel general, guías completas para la restauración en regiones como Estados Unidos, Australia o el pacífico, y los protocolos específicos guías metodológicas para abordar la restauración de los pastos marinos. A nivel general, trabajos como Fonseca *et al.*, 1998 aportan una primera guía para la conservación y la restauración de los pastos marinos para el área de Estados Unidos y áreas adyacentes. En este describen el ecosistema y el estado del arte relacionado con vulnerabilidad, impactos e historia de la restauración de praderas de pastos en esta región, aportan bases bastante robustas sobre la fase de planeación o de desarrollo de línea base necesaria para atender un eventual caso de restauración, mencionando aspectos como (i) conocimiento de la diversidad genética de las poblaciones locales, (ii) requerimientos de las praderas de pastos (iii) los tiempos de restauración adecuados en los sitios de supervivencia, (iv) mínimos que justifiquen un proceso de restauración, (v) selección del sitio donante, (vi) selección del sitio a restaurar, (vii) barreras a la restauración, (viii) cultivos y micropropagación, (ix) manejo a largo plazo, y finalmente dan una idea general de las metodologías de restauración, así como del monitoreo y la evaluación de éxito de cualquier acción de restauración de pastos marinos.

Así mismo, otros trabajos como UNEP, 2020 dan muestra de los avances realizados tanto a nivel local como global en cuanto a la restauración de las praderas de pastos marinos, compilando las bases más importantes para la restauración de pastos marinos, las consideraciones más importantes para restaurar, los principales métodos, barreras, prácticas y monitoreos a la restauración, además de aportar diferentes casos de estudios importantes en la región.

Los protocolos a nivel específico se han venido desarrollando por medio de diferentes trabajos alrededor del mundo, en las que se han propuesto una serie de metodologías sobre restauración de pastos marinos, abordando temas como la germinación de semillas en ambientes controlados (Tanner y Parham, 2010; Pan *et al.*, 2012; Yue *et al.*, 2019), siembra manual de brotes, plantas o tapones (Van Keulen *et al.*, 2003; Paling *et al.*, 2007), siembra mecánica de pastos (Paling *et al.* 2001; Paling *et al.*, 2003; Fishman *et al.*, 2004; Uhrin *et al.*, 2009) y hasta siembra de material vegetal de pastos que han sufrido arrancamiento o desprendimiento por prácticas humanas evitando el uso y afectación de poblaciones donantes (Mancini *et al.*, 2021), en los que principalmente se ha buscado recuperar la integridad, estructura, cobertura y servicios de estos ecosistemas, o avanzar en conocimientos base para la implementación de protocolos de restauración. Así mismo se han desarrollado metodologías asociadas a rehabilitación del ecosistema como la adición de nutrientes al sistema, la remoción de especies de macroalgas, el control de especies de herbívoros o adición o remoción de otro tipo de especies, las cuales dependen en su totalidad de las características locales del ecosistema para su implementación.

“Sea cual sea el objetivo de restauración de ecosistemas de pastos marinos, es de suma importancia el trabajo previo al disturbio por el cual se desea recuperar el ecosistema afectado (ya sea por causas antrópicas o fenómenos ambientales extremos), alimentando y enriqueciendo lo mejor que se pueda la línea base.

Sea cual sea el objetivo de restauración de ecosistemas de pastos marinos, diferentes estudios (p. e. Fonseca *et al.*, 2000) recalcan la importancia del trabajo previo al disturbio por el cual se desea recuperar el ecosistema afectado (ya sea por causas antrópicas o fenómenos ambientales extremos), alimentando y enriqueciendo lo mejor que se pueda la línea base referente a regímenes hidrodinámicos, estacionalidad de eventos climáticos, flora y fauna asociada, servicios ecosistémicos, entre otros, que junto con una evaluación rápida de qué tipo de lesión sufrió el ecosistema, la selección del sitio a restaurar y los protocolos de monitoreo y éxito permiten que las diferentes metodologías implementadas en los protocolos de restauración realmente tengan éxito.

A continuación, se muestran diferentes metodologías usadas en protocolos de restauración específica, que se pueden aplicar tras el paso de un huracán o cualquier otro disturbio que afecte los ecosistemas de pastos marinos en el archipiélago.

2.3.2. Protocolos de germinación de semillas

Este tipo de protocolos permite trabajar con el material germinal de las diferentes especies de pastos marinos y se hace importante, ya que se puede desarrollar en ambientes controlados, a bajo costo y es una técnica menos destructiva respecto al trasplante del material adulto, además las semillas pueden contribuir con una mayor diversidad genética (Li *et al.*, 2021). Por medio de diferentes métodos se pueden obtener plántulas o plantas desarrolladas y sanas para su posterior siembra e incorporación a los ambientes marinos. En este caso se hace necesario evaluar la supervivencia y la tasa de permanencia de estas plántulas en el medio marino a lo largo del tiempo.

Esta técnica se ha venido implementando con mayor frecuencia, ya que en muchos casos la siembra de las semillas directamente en los ambientes naturales no resulta efectiva. De igual forma, se ha implementado el uso de técnicas de bajo costo que permitan mantener los cultivos de plantas y plántulas, ya que uno de los contras de trabajar con las semillas es que éstas no se pueden almacenar largos periodos de tiempo (Yue *et al.*, 2019).

Un ejemplo de este tipo de protocolo es el realizado por Li *et al.*, en el 2021, en el que se probaron diferentes técnicas para la germinación y crecimiento del pasto marino *Enhalus acoroides* (L. f.) Royle. En este estudio, se compararon los efectos de diferentes métodos de cultivo sobre el desarrollo de plántulas y el cultivo a más largo plazo de *E. acoroides* utilizando varios sustratos de cultivo artificial (cultivo con sustrato de lodo marino, sustrato de agar, sin matriz (solo agua de mar), y usando un sustrato de espuma sumergido). Los resultados sugirieron que ninguna de las plántulas mostró ningún signo de geminación de la raíz cuando se cultivó con sustrato de lodo marino, las plántulas cultivadas con un sustrato de agar crecieron más rápido que las cultivadas con lodo marino, aunque tras tres semanas el agar se pudrió. Las plántulas iniciales cultivadas en agua de mar sin matriz germinaron con un crecimiento foliar normal, pero no se desarrollaron raíces, mientras que las que se sembraron en agujeros de un sustrato de espuma sumergido crecieron con éxito, convirtiéndose en plántulas sanas con hojas verdes y raíces largas. Estas plántulas se lograron cultivar hasta por 23 semanas a muy bajo costo y se realizó un trasplante preliminar a campo, pero se esperan realizar más experimentos para evaluar la efectividad y supervivencia de las plántulas trasplantadas.

En síntesis, el método desarrollado por Li *et al.*, en el 2021 es el siguiente: (i) Colecta de frutos maduros; (ii) germinación de semillas en agua de mar; (iii) siembra de plántulas en agujeros sobre un tablero de espuma el cual se sumerge con el uso de pesos; (iv) mantenimiento y monitoreo de las plántulas hasta que tienen el tamaño adecuado para ser trasplantadas en medio marino.

2.3.3. Protocolos de siembra de brotes, plántulas o plantas

Son protocolos que consisten en proyectos de plantación que generalmente involucran unidades de pastos marinos libres de sedimentos, tapones de pastos marinos con sedimentos y sistemas de raíces/rizomas intactos (los tapones son núcleos completos de sedimento obtenidos con un corazonador de plástico de diámetro variable), o siembra de semillas y/o frutos principalmente en ambientes de baja energía. Para esto se requiere de una población o comunidad donante de donde se obtendrá el material vegetal a trasplantar. En zonas someras los trabajos de restauración se llevan a cabo con snorkel, siempre que la profundidad del agua sea lo suficientemente baja para permitir que una persona llegue al fondo mientras contiene la respiración, por el contrario, en aguas más profundas se requerirá el uso de equipo de buceo autónomo, operadores de botes experimentados y buceadores capacitados (UNEP, 2020).

Según el tipo de unidad que se siembre se tendrá ciertos pros y contras. (i) Para el caso de los pastos libres de sedimentos se cuenta con que tienen la ventaja de reducir la carga al momento del transporte, pero este enfoque representa un trabajo intensivo, lo que limita la escala espacial de la restauración, además se suelen usar grapas metálicas o elementos como redes que permitan fijar el pasto al sedimento, las cuales no son del todo aceptadas, pero que pueden retirarse más tarde (y reutilizarse) o sustituirse por una alternativa biodegradable. (ii) Por su parte los tapones de pastos representan un método relativamente más fácil, generalmente menos laborioso (por área) y que produce una mayor supervivencia respecto a los métodos sin sedimentos. No obstante, la principal desventaja de estos métodos es el desafío logístico que plantea el peso de los tapones, que pueden ser bastante pesados de transportar (dependiendo de su tamaño) en distancias más largas, especialmente con especies de raíces profundas o cuando el lecho donante está lejos del sitio de plantación. (iii) Los métodos de siembra de semillas y frutos son relativamente fáciles de implementar y se puede ver más adecuado para aplicaciones a gran escala. El problema es que hay una dependencia de la disponibilidad de semillas y el porcentaje de supervivencia es generalmente bajo. Sin embargo, esto último puede compensarse fácilmente esparciendo grandes cantidades de semillas según estén disponibles (UNEP, 2020).

En síntesis, el método de siembra de **pastos libres de sedimentos** es el siguiente: (i) Selección de la población o comunidad donante; (ii) Selección del sitio a restaurar; (iii) Remoción de los pastos marinos por medios mecánicos (comúnmente se usa una pala); (iv) Selección de las unidades de plantación, las cuales se debe garantizar que cuenten con la presencia de puntas de rizoma en crecimiento; (v) Remoción de sedimentos de rizomas y raíz por lavado; (vi) almacenamiento para transporte en agua de mar; (vii) Una vez en el sitio, plantar directamente en el lecho (como ramitas) o anclar usando dispositivos como varillas, clavijas, anillos, clavos, piedras, conchas, varillas, brochetas o grapas. En este punto según los objetivos y la metodología se decide el tamaño de la unidad de siembra, es decir, la cantidad de vástagos y puntas de rizoma unidos a un solo dispositivo por medio de bridas

o amarres que no sean plásticos. (viii) Ubicar boyas en la zona de plantación para indicar la presencia del proyecto de restauración, evitar daños de cualquier tipo y facilitar el monitoreo.

El método de siembra de **taponos o núcleos** es el siguiente: (i) Selección de la población o comunidad donante; (ii) Selección del sitio a restaurar; (iii) Remoción de los pastos marinos por medios mecánicos usando un corazonador de PVC del diámetro deseado o según la especie. En este punto es muy importante que no se pierdan los sedimentos al momento de sacar el bloque o tapón del corazonador por lo que se recomienda tapar el corazonador en ambos extremos, lo cual facilita el transporte pero implica un alto costo ya que cada unidad de plantación requeriría de su propio corazonador; (iv) disponer los taponos en bandejas o sistemas que permitan su transporte hasta el sitio a restaurar; (v) Una vez en el sitio, plantar directamente en el lecho haciendo espacio del tamaño necesario para sembrar todo el tapón; (vi) Ubicar boyas en la zona de plantación para indicar la presencia del proyecto de restauración, evitar daños de cualquier tipo y facilitar el monitoreo

El método de siembra de **semillas y frutos** tiene variantes según el tipo de semilla y el objetivo y recursos de restauración, pero en general es el siguiente: (i) Identificar las épocas de floración y fructificación de las especies; (ii) recolección de brotes fértiles (que contienen semillas) o frutos maduros poco antes de que sean liberados; (iii) mantenimiento de los brotes vivo en grandes tanques de agua de mar hasta que se liberen la mayoría de las semillas (Esto se puede hacer directamente en la zona de muestreo con redes y boyas para que se dé la dispersión de manera natural); (iv) recolección y almacenamiento de semillas hasta su uso; (v) difusión directa de semillas; (vi) Ubicar boyas en la zona de plantación para indicar la presencia del proyecto de restauración, evitar daños de cualquier tipo y facilitar el monitoreo.

“Si bien estos métodos pueden traducirse fácilmente en altos costos (por área de siembra), debido a las largas jornadas de trabajo, esto puede no ser necesariamente un problema en programas de restauración que involucran a comunidades locales y / o voluntarios (UNEP, 2020)”.

Los resultados en la implementación de estos métodos al restaurar ecosistemas de pastos marinos a lo largo del mundo han sido altamente variables, dependiendo en general de la especie, la población o comunidad donante, las condiciones hidrodinámicas y de sedimentos de las áreas donde se realiza la siembra, además de su estado sucesional y en algunos casos la extensión de siembra (diámetro del tapón o número de rizomas incorporados en una grapa). No obstante, al refinar estos aspectos se logran resultados bastante exitosos en la recuperación de coberturas de praderas de pastos marinos.

En el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Dorado-Roncancio et-al., (datos no publicados) han implementado acciones de restauración de pastos marinos a lo

largo de la última década en el área protegida de Old Point en la Isla de San Andrés, en la que se ha implementado tanto **la siembra manual de brotes** mediante el uso de ganchos plásticos, como la siembra manual de **núcleos o tapones** de pastos de *T. testudinum* en diferentes profundidades. Los resultados iniciales mostraron mortalidades bastante altas para ciertos tratamientos, y en general se lograron identificar los principales factores que podrían estar afectando el establecimiento y permanencia de los trasplantes, siendo estos: tipo de grano, sedimentación, bioturbación, profundidad, MO, nutrientes. Estos resultados son muy importantes ya que se ha registrado una velocidad de recuperación o una tasa de éxito mayor respecto a otras áreas del Caribe con una proyección de 1 hectárea de pastos marinos restaurada a partir del octavo año de trabajo en campo.

2.3.4. Protocolos de siembra mecánica de pastos

La siembra mecánica es un método que se ha venido implementando como respuesta a la limitación existente en la plantación manual respecto a la siembra de grandes áreas o extensiones marinas, más que por la complejidad de esta. Además, las pequeñas unidades de plantación manual son más susceptibles a cualquier tipo de perturbación. El uso de tapetes como unidad de siembra permite cosechar un mayor número de meristemas intactos lo que favorece las tasas de supervivencia y expansión (Uhrin *et al.*, 2009). En zonas como Australia, se han implementado debido a los efectos negativos que ha traído sobre métodos manuales en zonas con una alta energía de olas que no permiten que unidades pequeñas se establezcan. Este método tiene la ventaja de ser potencialmente adecuado para aplicaciones a gran escala, pero tiene la desventaja de que presenta altos costos de inversión inicial (alta tecnología), requisitos operativos y de mantenimiento.

“El uso de tapetes como unidad de siembra permite cosechar un mayor número de meristemas intactos lo que favorece las tasas de supervivencia y expansión”.

La extracción de los tapetes se realiza de forma mecánica por medio de herramientas altamente especializadas como por ejemplo el barco de trasplante mecanizado (propiedad de Seagrass Recovery Inc., Ruskin, FL, EE. UU.) (Fishman *et al.*, 2004; Uhrin *et al.*, 2009), y en Australia se ha usado el ECOSUB1 (Ocean Industries Pty Ltd., Australia Occidental) (Paling *et al.* 2001; Paling *et al.*, 2003), los cuales recolectan pastos cortando un bloque completo de material que contiene raíces, rizomas y sedimentos circundantes intactos. En el caso del barco de trasplante mecanizado se pueden cosechar tapetes de hasta 1.5 m de largo x 1.2 m de ancho x 0.3 m de profundidad mientras que el ECOSUB1 puede cosechar tapetes de 0.5 m x 0.5 m x 0.35 m.

Los estudios de siembra mecánica han tenido diversos resultados, por ejemplo, Uhrin *et al.* en el 2009 encontraron que el método de plantación mecánica para la especie *H. wrightii* es muy bueno donde los sitios donantes y receptores están muy próximos (<2 km de distancia) y tienen entre 0,6 y 1,5 m de profundidad, obteniendo después de 36 meses de

monitoreo un aumento de 38m² sembrados, una ganancia neta de más de 3500 m² y una supervivencia de 66,7%. No obstante, a pesar de la alta supervivencia de tapetes (88,9%), los autores no recomiendan este método para trasplantar *T. testudinum* debido a densidades reducidas y falta de expansión significativa de tapetes 3 años después del trasplante. Aunque proponen para estudios futuros la siembra de especies mixtas (es decir, *H. wrightii* sembrada en combinación con *T. testudinum*) lo cual puede promover un ambiente más favorable para la expansión de *T. testudinum*. Tras el estudio los investigadores recomiendan un monitoreo mínimo para *H. wrightii* de 3 años, mientras que para *T. testudinum* de al menos 5 años

Por su parte, Paling *et al.*, en el año 2003 sembraron 160 tapetes de pastos marinos de una pradera mixta compuesta por *Amphibolis griffithii* (J.M.Black) Hartog y *Posidonia coriacea* Cambridge & J.Kuo en un sitio de alta energía de olas con los tratamientos configurados como tres réplicas de 16 tapetes colocados en cuadrados de 4 x 4 metros a distancias de 0.5, 1.0 y 2.0 metros de distancia. El espaciamiento del césped no tuvo un efecto significativo sobre la supervivencia del trasplante, que se mantuvo por encima del 90% durante 4 meses después del trasplante, aunque tras 14 meses, la supervivencia de los tapetes individuales estuvo entre el 9% y el 40%. Las densidades de brotes iniciales fueron de 200 a 500 brotes/m² y disminuyeron a menos de 50 brotes/m² lo cual se asoció a las diferencias entre el sitio de toma de trasplantes vs. el sitio de trasplante, que probablemente tenía condiciones hidrodinámicas diferentes con una mayor fuerza de corriente impidiendo la producción de nuevos brotes. Adicionalmente, se observaron fluctuaciones de sedimentos de hasta 35 cm, que ocasionalmente se producían en cuestión de horas sumado a las tormentas durante el invierno que provocaron un aumento significativo del movimiento de sedimentos a lo cual se asocia la reducción de la extensión del rizoma y el impedimento en la expansión de los trasplantes. (Paling *et al.*, 2003)

Otros resultados importantes fueron los obtenidos por Fishman *et al.*, en el año 2004, mediante la siembra de *Zostera marina* L. en donde se evaluaron tres criterios: (1) éxito de siembra (Supervivencia confirmada / número de intentos); (2) supervivencia de las unidades de siembra tras 1, 4 y 24 semanas; y (3) eficiencia = trabajo (en persona x segundos) invertido en cada unidad de siembra superviviente. El éxito de la siembra inicial fue significativamente menor para el bote de siembra (24 y 56% en las dos estaciones) respecto el trasplante manual (100% en ambos sitios). En uno de los sitios la supervivencia de las unidades de siembra disminuyó inicialmente con el tiempo para ambos métodos, pero la supervivencia media siempre fue mayor para las unidades plantadas manualmente, no obstante, las diferencias en la supervivencia entre los métodos no fueron estadísticamente significativas. En el otro sitio, la supervivencia a 1 y 4 semanas fue significativamente menor para el trasplante mecánico, pero la supervivencia a 24 semanas no fue significativamente diferente. Si bien la siembra mecánica fue más rápida que el método manual (2,2 s frente a 5,8 s por unidad de siembra, respectivamente), esta velocidad fue compensada por tasas de éxito de siembra más bajas, lo que resultó en una inversión total de mano de obra mucho mayor para la siembra mecánica. En resumen, los trasplantes mecánicos sobrevivieron de manera similar que los trasplantes manuales, pero como resultado de un menor éxito de

siembra inicial, la siembra mecánica requirió una mayor inversión de mano de obra y mayor cantidad de plantas donantes por cada unidad de siembra que sobreviviera a las 24 semanas, lo que conlleva a una mayor afectación del ecosistema donante. Por lo tanto, se concluyó que el método mecánico no es una mejora significativa sobre el método manual para trasplantar *Z. marina*.

En síntesis, el método de siembra mecánica consiste en los siguientes pasos: (i) Seleccionar la población o comunidad donante; (ii) seleccionar las áreas a restaurar por medio de los trasplantes de tapetes; (iii) Hacer la remoción mecánica de los tapetes; (iv) definir el tamaño de los parches que se van a sembrar; (v) monitorear el estado de los trasplantes según la especie, por lo menos 3 años.

2.3.5. Protocolos de siembra de fragmentos de pastos

La siembra de fragmentos de pastos marinos consiste en el aprovechamiento del material vegetal afectado por el desprendimiento o arrancamiento de los vástagos debido a causas antrópicas o naturales como oleaje o mareas de tormenta, los cuales son recolectados y utilizados como unidades de siembra para propagación o recuperación de praderas marinas evitando así el uso de praderas donantes, ya que existe una creciente preocupación sobre el impacto sobre las poblaciones donantes, especialmente en áreas donde las poblaciones de pastos marinos están amenazadas, ya que se puede generar fragmentación en las poblaciones donantes o afectar las tasas de crecimiento o salud de la pradera. Además, para países de Europa o zonas de Australia los pastos marinos están legalmente protegidos y no se pueden recolectar esquejes para trasplante sin un permiso especial (Balestri *et al.*, 2011; Piazzini *et al.*, 2021; Ward *et al.*, 2020).

Mancini *et al.*, en el año 2021 desarrollan un protocolo para praderas de *Posidonia oceánica* (L.) Delile en el mediterráneo con esta metodología en cuanto a obtención de material donante. El protocolo consiste de tres fases: (i) selección de técnicas de trasplante y anclaje; (ii) recolección de terrones de mata desprendidos, y la selección e instalación de sus cortes; y (iii) seguimiento. Dentro de la fase experimental, en la fase i) se decidió seleccionar el material vegetal con potencial de uso en restauración desprendido en los bordes menos profundos de las praderas y esquejes de terrones de pastos obtenidos en las partes profundas, los cuales son extraídos principalmente por actividades de anclaje de embarcaciones.

Además, después de diferentes pruebas se decidió usar estacas de hierro de 0,6 cm de diámetro para anclar las unidades de siembra. En la fase ii) se colectó material vegetal entre 2 y 30 m de profundidad de los cuales se obtuvieron los esquejes seleccionados según: (A) tipo de crecimiento, (B) número de brotes y (C) longitud. Se prefirieron los esquejes plagiotrópicos (horizontales), con un mínimo de 4–5 brotes y 30–40 cm de largo, a los ortótropicos (verticales) debido a su mayor tasa de crecimiento, contenido en nutrientes y compuestos antibióticos. Luego se sembraron en parcelas de 1m² en cuatro profundidades de trasplante: 8, 12, 17 y 21 m probando además siembras a profundidad: i) similar, ii) más profundo o iii) menor respecto a la profundidad de la que fueron recolectados los esquejes.

La fase iii) se realizó mediante metodologías no destructivas. Este estudio, dio como resultado una tasa de supervivencia de los esquejes de 75% después de casi cinco años, además, una tasa de supervivencia más alta en las profundidades de trasplante más someras (8 y 12 m) en comparación con las más profundas (17 y 21 m) debido probablemente a la disponibilidad de luz. Por su parte, casi cinco años después del trasplante, la densidad de brotes aumentó significativamente en un 57%, siendo mayor el aumento en zonas profundas que en las más someras, lo cual se le atribuyó a las fuerzas hidrodinámicas.

Así mismo, se observó un alargamiento más significativo de las hojas de pastos trasplantados que de los naturales, lo que confirma la predisposición colonizadora de *P. oceanica* trasplantada frente a la estabilidad/equilibrio de la planta natural. Finalmente, uno de los hallazgos más importantes de este estudio es que los esquejes trasplantados a una profundidad similar a la que fueron recolectados pueden ramificarse más rápido que los trasplantados más profundo o menos profundo que la profundidad de recolección. Las plantas "similares" casi duplicaron los valores de densidad de brotes en el punto de inicio durante el período de estudio, probablemente debido al menor estrés experimentado durante el proceso de adaptación del trasplante.

“La siembra de fragmentos de pastos marinos consiste en el aprovechamiento del material vegetal desprendido o arrancado debido a causas antrópicas o naturales como oleaje o mareas de tormenta, y se ha implementado como solución a la creciente preocupación sobre el impacto de las poblaciones donantes, especialmente en áreas donde las poblaciones de pastos marinos están amenazadas o protegidas”.

Cabe resaltar que para este protocolo, una vez se han obtenido las unidades de siembra, la metodología puede ser similar o igual a la expuesta anteriormente en la sección **“Protocolos de siembra de brotes, plántulas o plantas”**.

2.4. Identificación de los pasos o etapas que se deben tener en cuenta para la preparación

Estar realmente preparado para la respuesta ante acciones de evaluación o restauración de un ecosistema requiere de un trabajo previo sin el cual al momento de la implementación de cualquier protocolo se podrían presentar barreras para su desarrollo y sin el cual el éxito del proceso se puede ver comprometido. Las distintas etapas que se requieren para prepararse a una posible evaluación o restauración de ecosistemas de pastos marinos se enlistan a continuación:

2.4.1. Levantamiento de información base

clave para la implementación de acciones de restauración: Ya sea a partir de información secundaria de carácter histórico, desarrollo de monitoreos sistematizados o

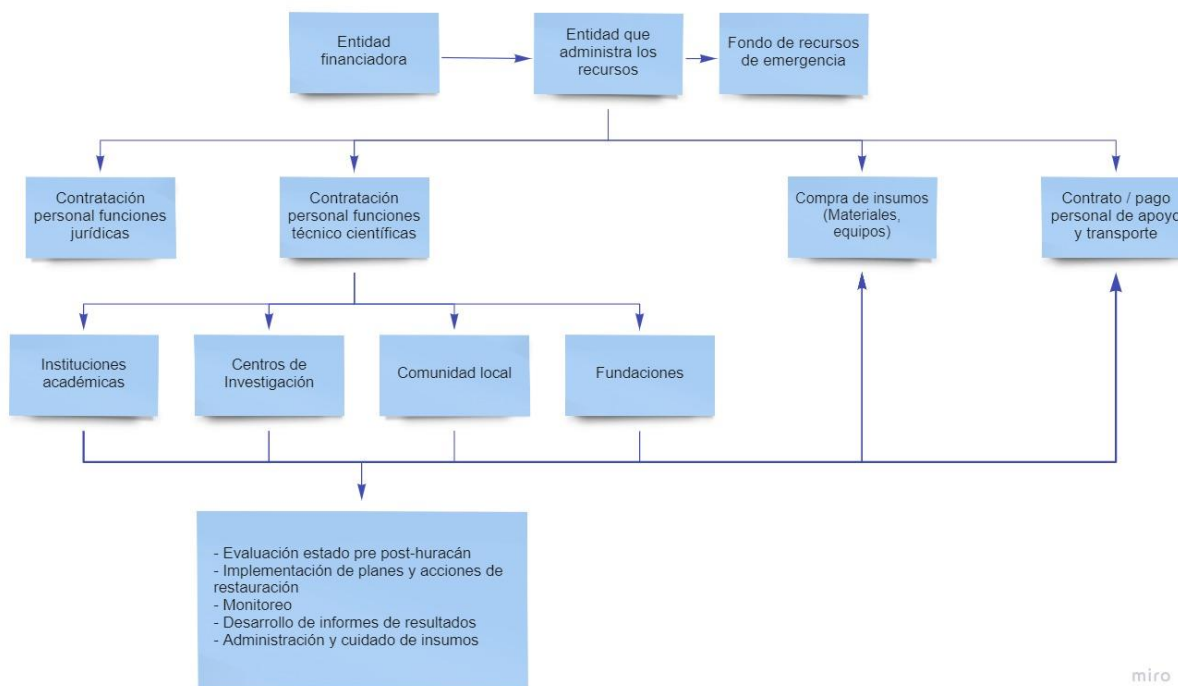
implementación de acciones de investigación y reconocimiento. Es muy importante establecer estaciones permanentes de monitoreo que permitan trabajar de manera más directa para establecer la línea base correspondiente a los ecosistemas de referencia. La información que se debería tener en cuenta para los ecosistemas de pastos marinos es la siguiente:

- Se debe conocer la estructura y composición del ecosistema que se quiere restaurar.
- Tener conocimiento del rol de las especies dentro del ecosistema (no solo pastos sino algas, animales, hongos, etc.). Especies pioneras, climáticas, invasoras, facilitadoras.
- Conocimiento de hidrología, geomorfología, vientos y sedimentos a nivel local.
- Qué funciones y servicios están prestando actualmente los ecosistemas de pastos marinos a nivel local.
- Conocimiento de la fenología de las especies de pastos marinos.
- Conocimiento de las semillas, tasas de germinación y métodos de germinación y cultivo.
- A partir de las especies que conforman los ecosistemas locales, definir poblaciones locales o aledañas de las especies de pastos que puedan servir como reservorios y donantes de material vegetal (brotes o plantas), frutos y semillas.

“El conocimiento de información histórica, los monitoreos sistematizados y la implementación de acciones de investigación y reconocimiento en estaciones permanentes de monitoreo previas al paso de un huracán, permitirá contar con una línea base de los ecosistemas de pastos lo suficientemente robusta para tomar acciones oportunas y adecuadas en cuanto a la posible implementación de un protocolo de restauración.”

2.4.2. Preparación logística:

La preparación logística requiere tener claridad respecto a quienes van a ser los actores principales dentro de los diferentes procesos, qué elementos, materiales, **permisos de intervención y acuerdos** se necesitan para llevar a cabo cualquier proceso de manera efectiva y establecer las personas o equipos de personas que pueden participar eventualmente en los procesos de evaluación, restauración y monitoreo. Cualquier proceso requiere de diferentes actores para llevarse a cabo de manera efectiva, desde las ideas hasta la implementación (Ver figura 4), por lo tanto, tener claridad sobre las rutas de acción es fundamental para el éxito de cualquier proceso o protocolo que se desee implementar.



miro

Figura 4 Principales actores dentro de un proceso de evaluación, restauración o monitoreo de ecosistemas de pastos marinos. Las diferentes contrataciones se pueden hacer por convocatoria o selección directa.

Además, el caso particular de la preparación ante la afectación de ecosistemas por el paso de huracanes se puede abordar desde dos momentos, una respuesta inmediata y una respuesta a largo plazo (Figura 5). La respuesta inmediata se dará siempre de manera transversal ante cualquier evento extremo, y se relaciona con la evaluación de daños y afectaciones al ecosistema de pastos marinos, permitiendo generar información y conocimiento respecto a los daños, cambios y procesos dentro de los ecosistemas, a partir de lo cual se tomarían las decisiones correspondientes respecto a la implementación de acciones de restauración al evaluar el costo-beneficio de implementar acciones según el tipo de daño y nivel de afectación, sumado a la evaluación de experiencias anteriores en literatura o en el archipiélago en las que se ha demostrado que la recuperación del ecosistema se puede dar de forma natural por la resiliencia del mismo, evitando así incurrir en planes y gastos que pueden llegar a ser innecesarios en algunos casos. Por otro lado, las respuestas a largo plazo van a permitir estar mejor preparados para la respuesta futura a una eventual afectación de ecosistemas de pastos marinos por tormentas tropicales o huracanes, permitiendo a su vez tener más insumos en cuanto a conocimiento, materiales, recursos y unidades de siembra en caso de ser requerido, aumentando las tasas de éxito de cualquier proceso de restauración que se desee implementar.

Cabe resaltar, que en la respuesta inmediata es de suma importancia evaluar mediante software especializado y si es posible mediante programas de modelación, la dirección de los vientos, la intensidad de estos, altura de oleaje y si es posible fuerza de las corrientes,

ya que esta información sería de gran utilidad al momento de determinar las zonas o sitios a priorizar en cuanto a la evaluación de daños (diferente a los sitios donde se tengan estaciones de monitoreo permanente) reduciendo costos al trabajar directamente con software y no con desplazamientos a campo y todos sus costos asociados.

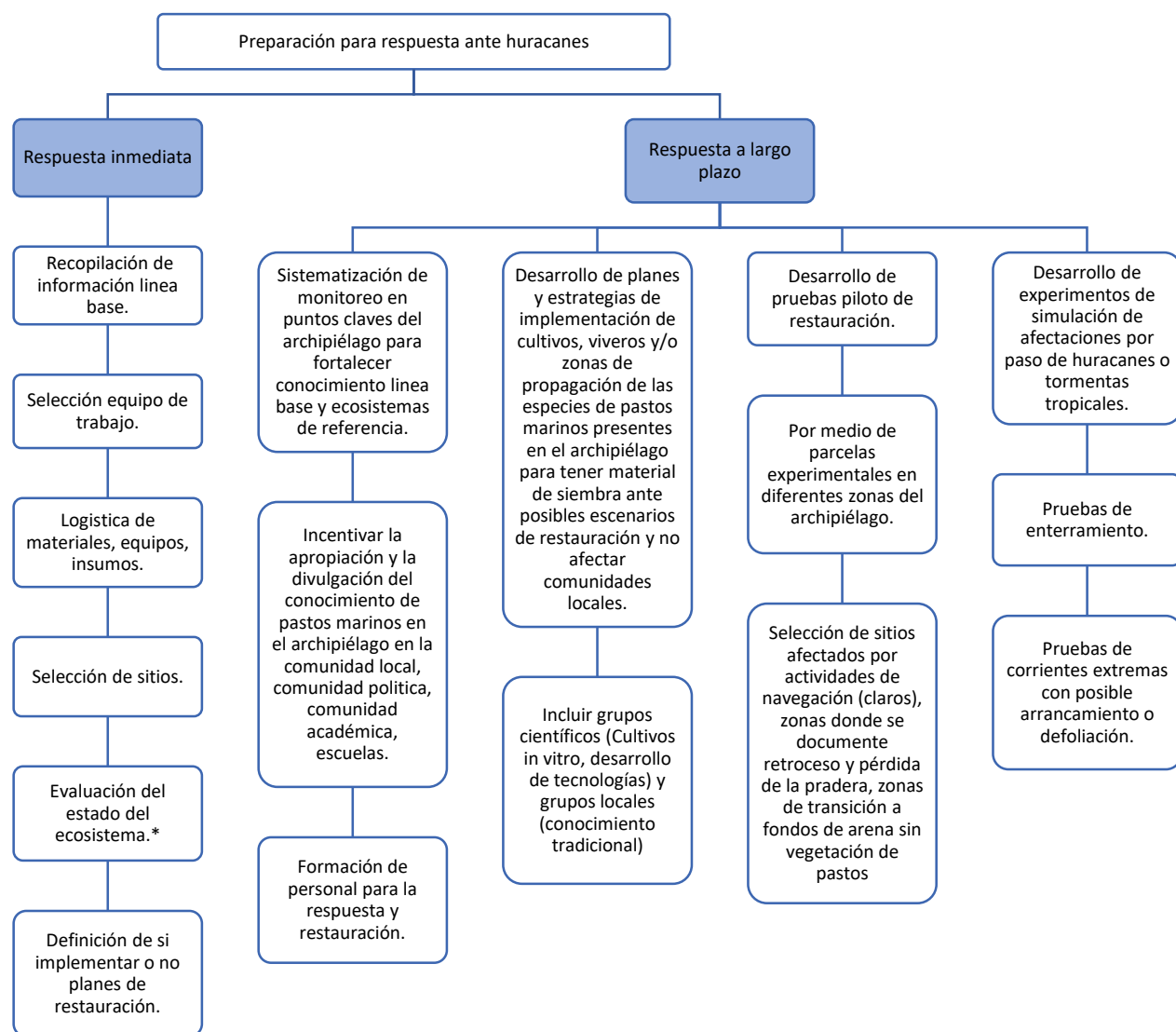


Figura 5. Rutas de respuesta para la preparación ante la afectación de eventos climáticos extremos como huracanes o tormentas tropicales sobre ecosistemas de pastos marinos. * Evaluación en campo y mediante herramientas SIG.

De igual forma, contar con todos los insumos, es decir, materiales o equipos, o con los permisos o convenios con diferentes instituciones para el uso de equipos especializados es un elemento fundamental de la preparación logística de cualquier proyecto de evaluación, restauración o monitoreo.

A continuación, se enlistan los principales insumos que se deberían preparar ante cualquier proyecto de respuesta rápida ante el paso de un huracán.

- Equipos: Geoposicionador (GPS); Cámara fotográfica + memoria SD; Computador; Brújula; Equipos de buceo autónomo; Sondas de parámetros fisicoquímicos.
- Materiales: Estacas (tornillo de acero inoxidable); Martillos o mazos de 2 kg Mínimo; Vara metálica de 20 cm; Boyas; Cuerda parafinada delgada; Cinta métrica (flexómetro) de 50 m; Al menos 3 Cuadrantes de PVC de 50 × 50 cm subdivididos en cuartos; Tablas acrílicas + Lápices; Formatos de campo; Corazonadores (diámetro según la muestra); Bolsas herméticas; Neveras de poliestireno; Balanza analítica; Tamiz; Bandejas, Coladores; Tijeras o cuchillas; Reglas, etc.
- Transporte: Lancha; Combustible para embarcación; Vehículo de transporte terrestre; Combustible para transporte terrestre.

2.4.3. Selección y preparación de personal:

- Personal de respuesta técnico/científico:

Persona o equipo con conocimiento técnico y formación académica, encargado de la evaluación del estado de ecosistemas de pastos marinos periódicamente en sitios establecidos como ecosistemas de referencia, dos o al menos una vez por año, procesamiento de las muestras en laboratorio, análisis de resultados y eventual monitoreo. Esto permitirá que la persona o el equipo se apropien de las metodologías para evaluación del estado y estén totalmente preparados para responder con metodologías de evaluación rápidas del estado de ecosistemas de pastos marinos tras la eventual afectación por el paso de huracanes cerca del archipiélago. De igual forma permitirá tener a la mano toda la información de línea base para la toma efectiva de decisiones ante una eventual restauración de los ecosistemas.

- Personal de asistencia

Cuenta toda aquella persona que brinde su conocimiento o apoyo a los procesos de evaluación, monitoreo y restauración. Estas pueden estar a lo largo de todo el proceso o solamente acompañar durante momentos específicos de los proyectos que así lo requieran. Por ejemplo, todas aquellas personas que brinden apoyo al transporte, al mantenimiento de equipos o parte de la comunidad local que apoye diferentes dinámicas a lo largo de los diferentes procesos implementados.

La preparación del personal estará a cargo de las diferentes instituciones asociadas a los diferentes proyectos, y se podrá realizar por medio de capacitaciones o facilitación de material bibliográfico o temático con información de importancia referente a la evaluación, restauración y monitoreo de ecosistemas marinos costeros, enfocados en pastos marinos. De igual forma, de no contar con personal de asistencia, será necesario diseñar estrategias para la formación y capacitación de personas, buscando incluir en este proceso a la comunidad local.

2.4.4. Preparación financiera y planeación económica:

Se debe contar con la capacidad económica para la adquisición de insumos y pago de personal a lo largo de los años de duración de los diferentes proyectos. En este sentido, se debe contar con una base constante para el monitoreo y evaluación del estado de los ecosistemas, así como recursos para el desarrollo de estudios que promuevan el enriquecimiento de la línea base. De igual forma, se debe contar con un fondo de recursos que se pueda utilizar ante cualquier imprevisto o necesidad de implementación de planes de restauración, los cuales pueden implicar gastos a lo largo de varios años de monitoreo.

- Recursos para imprevistos.
- Compra de materiales o equipos.
- Pago a personal.
- Recursos para sostenibilidad de protocolos implementados a largo plazo (mínimo 3 años de muestreos con por lo menos un muestreo anual).

2.5. Identificación de los pasos y metodologías que se deben tener en cuenta para la restauración y respuesta en el Archipiélago

A nivel general, basado en la ruta de los 13 pasos de la restauración, propuesta por Vargas en 2011 y las guías de referencia para restauración de pastos marinos (Fonseca *et al.*, 1998; UNEP, 2020) cualquier proceso de restauración de ecosistemas de pastos marinos dentro del archipiélago o el Caribe colombiano debería considerar los siguientes aspectos en cada una de sus fases.

2.5.1. Fase diagnóstica

La fase diagnóstica se puede interpretar como parte del proceso de **preparación y respuesta inmediata post-huracán**, en donde a partir de información secundaria, investigaciones y evaluaciones rápidas del estado del ecosistema se cuenta con la información necesaria para continuar en la implementación de acciones de rehabilitación o restauración del ecosistema. No obstante, algunas de las consideraciones de la fase diagnóstica se pueden desarrollar a la par del **proceso de restauración** en situaciones que no se cuenta con una línea base completa o suficientemente robusta, siendo la fase experimental del proceso de restauración a su vez una fase diagnóstica.

2.5.2. Definir el ecosistema o comunidad de referencia

El ecosistema de referencia sirve de modelo para planear un proyecto de restauración y más adelante, para su evaluación. No siempre es fácil identificar este referente, pero la reconstrucción con base en la información de diferentes fuentes como: crónicas, evidencia reciente de la región como fotografías aéreas, dibujos y descripciones, conocimiento de dinámicas sociales y relictos de vegetación original o poco intervenida, pueden dar mayor certeza de las condiciones previas anteriores a los disturbios (Vargas, 2011).

Para el Caribe colombiano y más específicamente el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina se ha avanzado en la documentación y estudio de los ecosistemas de referencia, los cuales se han descrito anteriormente en este capítulo en el numeral 1.1 correspondiente a la cobertura de pastos marinos en el archipiélago. Allí se hace una breve descripción de las praderas presentes en Providencia, las cuales difieren de las de San Andrés y las islas de los Cayos Bolívar y Albuquerque. Por lo que es importante tener en cuenta que un plan de restauración que abarque las cuatro áreas o al menos más de un área debe ser pensado desde las particularidades de cada una de las praderas. De hecho, las praderas del este de Providencia respecto a las del oeste difieren entre sí, por lo que este es un punto a evaluar considerablemente al momento de definir los objetivos y trayectorias de restauración.

2.5.3. Evaluar el estado actual del ecosistema

Es necesario realizar una evaluación de las condiciones previas y actuales del ecosistema. En esta fase se empieza a tener evidencia del problema que se quiere trabajar y resolver por medio de los objetivos de restauración (Vargas, 2011). La evaluación del estado del ecosistema de pastos marinos se puede hacer por medio de la medición de distintas variables. Entre más variables se evalúen más robusto va a ser el análisis y más acercamiento se tendrá al estado actual del ecosistema.

Para esto se pueden evaluar los ICT_{PM} descritos en por Gómez-López *et al.*, 2014, o se pueden medir las variables de Biomasa total, foliar y/o de raíces, el índice de área foliar, densidad de vástagos, densidad de hojas, enfermedades, estado sucesional (según especies presentes) y la diversidad faunística que albergan las praderas ya que está aparentemente

relacionada con la estructura de las mismas. A su vez factores indirectos como depredación, competencia, migración, reproducción, reclutamiento y proximidad de otras praderas pueden ser también relevantes (Díaz *et al.*, 2003).

De igual forma, contar con una evaluación completa del ecosistema no depende únicamente de los factores biológicos de éste. Tener claridad respecto a los factores ambientales que están influyendo o determinando la presencia de los ecosistemas de pastos marinos tanto a nivel regional como local es fundamental para entender a profundidad el estado actual del ecosistema. En este sentido, conocer a profundidad, las condiciones del paisaje: tipos de matriz, parches o relictos, forma y conectividad de estos; estado del sustrato (sedimentos), condiciones hidrodinámicas, valoraciones físico-químicas y de contaminación, estacionalidad, geomorfología; flujos de energía y de nutrientes; y el régimen natural de disturbios, permitirá definir mejor el contexto actual del ecosistema a restaurar (Vargas, 2007).

2.5.4. Definir las escalas y niveles de organización.

Entender si el proceso de restauración va a abarcar poblaciones de especies, comunidades, ecosistemas o paisajes es de suma importancia, ya que en cada nivel se definen objetivos de trabajo diferentes y consecuentemente los procesos críticos que se deben tener en cuenta para la restauración cambian según la escala y el nivel de análisis (Vargas, 2011). Según el nivel de organización seleccionado, Vargas, en el 2007 hacen una síntesis de los principales aspectos a tener en cuenta para un buen proceso de restauración:

- **Nivel de especie:** Se trabaja principalmente a nivel de parcela buscando restablecer poblaciones de una especie en particular, a partir de la recreación del hábitat que requiere dicha especie. Para el éxito a este nivel es fundamental tener claros los requerimientos de hábitat y los aspectos relevantes para el establecimiento y mantenimiento de la especie en cuestión. Es fundamental seleccionar especies clave que cumplen funciones importantes en los ecosistemas como ser soporte para otros organismos, propiciar condiciones que posibiliten la regeneración de poblaciones de otras especies, favorecer la supervivencia al modificar las condiciones ambientales. Uno de los contras que puede presentar esta escala es ignorar los procesos a mayores escalas o que al modificar para recrear el hábitat de la especie objetivo se modifique para otras especies o se generen cambios a nivel estructural, poblacional o genético que pongan en riesgo otras especies.

Por ejemplo, en el caso del archipiélago, seleccionar una especie de carácter sucesional temprano o pionera, comparado con una especie climática como *T. testudinum* representa diferencias muy significativas en cuanto a objetivos y resultados esperados en el proceso de restauración. De igual forma en cuanto a condiciones del hábitat a restaurar principalmente en cuanto a sedimentos y condiciones microclimáticas.

- Nivel de comunidad: A este nivel se hace un énfasis en el restablecimiento de la comunidad original, buscando preservar comunidades raras o en peligro de extinción. En esta escala la teoría de la sucesión ecológica y su aplicación es la base para la restauración ecológica. Este enfoque se trabaja al igual que el enfoque de especies, con énfasis en la necesidad de recrear las condiciones naturales como un procedimiento estándar para el éxito de la restauración.

Los avances que se han hecho a nivel de sucesión ecológica en el Caribe y el archipiélago, en donde se presentan las cuatro especies de pastos marinos mencionadas a lo largo de este capítulo se ha documentado en diferentes trabajos como, por ejemplo, Zieman 1982; Phillips y Meñez, 1988; Duarte 1991, Kenworthy *et al.*, 2002; Sierra-Rozo *et al.*, 2012. En resumen, la sucesión ecológica en los ecosistemas de pastos marinos en el archipiélago se puede entender como: (i) Temprana colonización de sedimentos no consolidados por parte de pequeñas especies algales del tipo tapete; (ii) crecimiento erguido de macroalgas calcáreas y carnosas (iii) crecimiento oportunístico rápido de los pastos *H. decipiens*, *H. wrightii* o *S. filiforme* junto a las macroalgas. (iv) Colonización y establecimiento de *T. testudinum* si las condiciones ambientales permanecen adecuadas y hay propágulos disponibles.

Esto anterior se da bajo ciertas condiciones ambientales, ya que según ciertos factores algunos pasos se pueden omitir. Por ejemplo, se puede dar que en zonas en donde predominan sedimentos muy gruesos el proceso no cuente con los pasos (ii) y (iii).

- Nivel de ecosistema: En esta escala, el objetivo principal consiste en recuperar algunas o la totalidad de las funciones del ecosistema, lo cual implica retornar el ecosistema a su estado predisturbio. Para esto es fundamental recuperar la composición y estructura integrando los procesos a escalas menores con los procesos a gran escala. Uno de los problemas de trabajar a esta escala es la definición de los límites e interfases entre ecosistemas, ya que, al no hacerlo correctamente, se puede dificultar la identificación del objeto de restauración.

Esta perspectiva, en el caso del Archipiélago, sería necesario abordarla en el momento en que se determine que se han perdido funciones o servicios relacionados con la productividad de las praderas visto en la densidad y vigor de estas, o a partir de la cantidad de herbívoros que está soportando o abundancia y riqueza de especies de peces asociados, la cual podría ser vista principalmente por los pescadores locales. De igual forma, la pérdida de funciones como el efecto regulador sobre el movimiento del agua visto en un aumento de las tasas de erosión de costas o un aumento de la turbidez del agua circundante podría acarrear efectos “bola de nieve” sobre los ecosistemas de pastos, afectar ecosistemas aledaños como los corales y hasta tener influencia sobre actividades humanas relacionadas principalmente con el turismo.

2.5.5. Establecer las escalas y jerarquías de disturbio.

Evaluar la dimensión espacial y la magnitud de los disturbios además de la dimensión temporal es fundamental. De igual forma, es necesario determinar dentro del área que se

desea restaurar si se presentan no solo disturbios naturales sino de carácter antrópico (Vargas, 2011).

En el caso del paso de un huracán por el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, se debe tener en cuenta el régimen de disturbios en el que se encuentra el área afectada, ya que intentos de restauración podrían verse afectados o alterados a causa de actividades humanas como navegación, turismo, construcciones, dragados o por fenómenos naturales como una época de lluvias extrema. Como menciona Vargas en 2011, para definir la dimensión espacial es necesario evaluar la extensión del disturbio en términos de las dimensiones físicas de la zona afectada, expresadas en unidades de área o de volumen, lo cual sería necesario hacerlo por medio de visitas rápidas a los ecosistemas de pastos conocidos en el archipiélago, sumado al uso de herramientas de teledetección si es posible. La magnitud por su parte, se relaciona con la fuerza, intensidad o severidad del disturbio, que para el caso de un huracán se mide según la escala Saffir-Simpson y es reportada por el IDEAM.

Finalmente, es necesario tener en cuenta la dimensión temporal en tanto al tiempo de afectación del huracán y la frecuencia y predictibilidad con que un disturbio de igual, mayor o menor magnitud se presente en el archipiélago. Esto permitirá clasificar los diferentes huracanes que afecten las islas como raros, si ocurren en un tiempo menor al lapso de vida de las especies más longevas o de sucesión avanzada, que en este caso es *T. testudinum* la cual se ha reportado que puede tardar hasta 17 años en recuperar su estado climácico; o frecuentes, si ocurren muchas veces dentro del lapso de vida de las especies menos longevas, que en este caso serían *S. filiforme*, *H. wrightii* y *H. decipiens*, que por su condición de pioneras en unos meses se pueden empezar a recuperar.

“La participación temprana de la comunidad es fundamental para lograr que ésta sea significativa y efectiva, además debe procurar mantenerse a lo largo de todas las fases del proyecto de restauración, ya que puede ser la diferencia entre un proyecto de restauración a largo plazo efectivo respecto a uno que no cumpla los objetivos con éxito “.

2.5.6. Buscar y lograr la participación comunitaria.

Este paso es fundamental, ya que puede ser la diferencia entre un proyecto de restauración a largo plazo efectivo respecto a uno que no cumpla los objetivos con éxito. Considerar la participación de las comunidades locales, las partes interesadas (p.e. entes gubernamentales, grupos de restauración) y/o ciudadanos voluntarios dentro de los proyectos de restauración de pastos marinos puede ayudar a reducir costos, ofrecer una fuente de mano de obra local, contribuir a garantizar la persistencia y sostenibilidad a largo plazo de las áreas de pastos marinos restauradas además de mejorar el éxito de los esfuerzos de restauración al ofrecer una oportunidad para incorporar el conocimiento local (tradicional) del área en la planificación y diseño del enfoque de restauración. La participación temprana de la comunidad es fundamental para lograr que ésta sea

significativa y efectiva, además debe procurar mantenerse a lo largo de todas las fases del proyecto de restauración (UNEP, 2020).

Vargas, en el 2007 describen algunas recomendaciones para implementar y lograr la participación comunitaria dentro de los procesos de restauración, los cuales podrían ser implementados de alguna forma en el Archipiélago como una forma de incluir a la comunidad dentro de la restauración de ecosistemas de pastos marinos. Estos se presentan a continuación:

- Integrar el conocimiento en los protocolos de restauración de pastos marinos y promover su aplicación en las estrategias de restauración.
- Difusión entre la comunidad local de técnicas de propagación de especies nativas de pastos.
- Integración del tema de la restauración ecológica en los programas académicos de los centros educativos en las islas.
- Realización de actividades prácticas e investigativas con los estudiantes de colegios y los padres de familia o voluntarios locales.
- Fortalecimiento del conocimiento de los funcionarios públicos con relación a la restauración ecológica.
- Creación participativa de materiales que divulguen el conocimiento local y las acciones de restauración iniciadas como plegables informativos, cartillas o boletines.
- Encuentros comunitarios para intercambiar experiencias de Restauración Ecológica.

2.5.7. Evaluar el potencial de regeneración del ecosistema.

El potencial de regeneración se define como el conjunto de especies nativas y trayectorias sucesionales que ofrece un paisaje, por lo tanto, se refiere a la disponibilidad de especies en la región, su ubicación, abundancia y su etapa sucesional. En esta fase se tiene una aproximación a las especies pioneras y a las especies de sucesión tardía, a las especies dominantes, codominantes y raras y sobre todo a las especies que potencialmente pueden ser utilizadas en experimentos y programas de restauración (Vargas, 2011).

Para el Caribe se ha descrito la trayectoria sucesional que ofrecen las cuatro especies de pastos marinos presentes en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. En el paso 3 se resumieron los pasos sucesionales para este sistema de pastos marinos en el Caribe, teniendo en cuenta el papel de pioneras o colonizadoras tempranas de *H. decipiens*, *H. wrightii* o *S. filiforme*, en contraste con *T. testudinum* que es una especie climática o de sucesión tardía. Adicionalmente, es importante tener en cuenta que, para todo el Archipiélago, *H. decipiens* se puede considerar como una especie rara, ya que hasta la fecha únicamente se ha descrito un pequeño parche en Providencia, mientras que *T. testudinum* es la especie dominante de pastos abarcando los parches de pastos de mayor extensión junto con *S. filiforme* según la localidad.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es el papel que juegan los sedimentos en cada etapa sucesional o en el proyecto de restauración, ya que de este factor también depende el éxito de la regeneración. Para esto hay que tener en cuenta que se pueden dar casos de remoción total o parcial de sedimentos modificando la etapa sucesional del ecosistema y a su vez la respuesta en cuanto a establecimiento y permanencia de las distintas especies de pastos marinos.

2.5.8. Establecer las barreras a la restauración a diferentes escalas.

Son todos aquellos factores que impiden, limitan o desvían la sucesión natural o asistida en áreas alteradas por disturbios naturales y antrópicos (Vargas, 2011). Es necesario hacer todo lo posible para garantizar que las amenazas locales (p.e. condiciones hidrodinámicas extremas, herbivoría, inestabilidad de sedimentos, tormentas intensas, actividades humanas adversas, nuevos huracanes) y las causas conocidas de declive y degradación de los pastos marinos en el sitio de restauración se comprendan y reviertan (reducidas a un nivel tan bajo como sea razonablemente práctico) (UNEP, 2020).

Los principales factores o barreras que se deben evaluar son:

- Barreras para la dispersión de las plantas: Predación de propágulos, corrientes extremas, ausencia de poblaciones donantes o de propágulos
- Barreras para el establecimiento de las plantas: Sedimentos, condiciones hidrodinámicas, herbívoros, turbidez, presencia de especies exóticas invasoras, competencia por espacio con macroalgas.
- Barreras para la persistencia de las plantas: Factores físico-químicos, etapa sucesional de la pradera, enterramiento, desprendimiento por corrientes extremas, presencia de especies exóticas invasoras.
- Barreras sociales: Actividades náuticas, dragados, liberación de residuos domésticos e industriales.
- Barreras por condiciones climáticas: Huracanes, tormentas tropicales, temporalidad de lluvias, temperaturas extremas.

2.5.9. Diseñar estrategias para superar las barreras a la restauración.

Al conocer las diferentes barreras que pueden presentarse al momento de restaurar poblaciones, comunidades o ecosistemas de pastos marinos, se pueden diseñar estrategias o tomar decisiones que superen estas problemáticas. A continuación, se enlistan las principales barreras o problemas que enfrenta la restauración de pastos marinos.

- Alto régimen hidrodinámico que impide el establecimiento y desarrollo de brotes y plantas.
- Inestabilidad del sedimento causando erosión, arrancamiento o enterramiento.
- Condiciones fisicoquímicas o de calidad del agua pobres.
- Excesivo epifitismo en el área a restaurar.

- Fase diagnóstica pobre y/o falta de conocimientos base.
- Excesiva herbivoría y predación.
- Niveles elevados de bioturbación.
- Alto porcentaje de patógenos a nivel local.
- Escalas de trabajo demasiado pequeñas.
- Ausencia de material donante.
- Daño constante o periódico a causa de actividades humanas.
- Trabajo a escalas muy grandes sin tecnología aprobada para ello.

Ciertas estrategias como la selección de especies niñeras o facilitadoras es un ejemplo de una estrategia para superar barreras a la restauración. Seleccionar ciertas especies de pastos como *H. wrightii*, *H. decipiens* o *S. filiforme* que faciliten el establecimiento y hasta las condiciones microclimáticas para *T. testudinum* es una opción viable. De hecho, la selección de zonas afectadas de pastos marinos, pero con presencia de ciertas algas calcáreas y carnosas podría representar una estrategia para superar barreras al establecimiento de los pastos a raíz de la estabilización de los sedimentos gracias a las algas. No obstante, sería necesario dirigir la trayectoria sucesional hacia un ecosistema de praderas de pastos, ya que se ha visto en ciertas zonas del caribe que áreas que inicialmente presentaban praderas de pastos marinos, después de un disturbio fuerte, volvieron a etapas sucesionales tempranas donde predominaban las algas y al no trabajar en las barreras que limitaban el establecimiento y persistencia de las diferentes especies de pasto, la trayectoria de este ecosistema se dirigía a un cambio de cobertura con predominancia de macroalgas sobre los pastos, cambiando de esta forma las dinámicas del ecosistema (Sierra-Rozo *et al.*, 2012).

“Es necesario eliminar todo el estrés y las perturbaciones que causaron los cambios en las comunidades naturales si se quieren lograr resultados de restauración efectivos”.

Otro ejemplo puede ser la selección del material que se va a sembrar para restaurar las áreas dañadas, ya que en un escenario en donde la remoción de sedimentos fue el factor clave del disturbio, las barreras al establecimiento y persistencia serán mucho mayores, ya que como se ha mencionado anteriormente, la presencia de sedimentos finos facilita en gran medida el desarrollo y crecimiento de las especies de pastos marinos. En un escenario donde un huracán genere una remoción considerable de los sedimentos disminuyendo la profundidad efectiva de estos o cambiando el tamaño de las partículas haciendo que predominen las de mayor tamaño, será indispensable aplicar técnicas de siembra que

incluyan consigo el sedimento y no solo el material vegetal, generando núcleos de pastos con el sedimento original que pueden facilitar los procesos sucesionales de retención y estabilización de sedimentos además del reclutamiento de nuevas especies o la propagación vegetativa de las especies dentro de los núcleos.

Finalmente, considerar la aplicación de disturbios experimentales puede ser un valioso recurso para superar barreras a la restauración y alcanzar de esta forma el objetivo de restauración planteado, Vargas, en el 2007 mencionan que estos pueden enfocarse a controlar una especie invasora, reducir la influencia de una especie dominante o aumentar el recurso disponible como la superficie de colonización o los nutrientes. En este sentido, un ejemplo pensado en el Archipiélago puede ser la remoción de cobertura de ciertas especies (macroalgas y/o pastos) que estén compitiendo con las especies que se desea restaurar. De igual forma, la limpieza de epifitos o especies invasoras de manera manual o el trabajo con la abundancia de ciertos herbívoros puede contribuir a un aumento en la productividad o las tasas de crecimiento y colonización naturales de las praderas, recuperando así diferentes servicios o funciones del ecosistema.

2.6. Costos de la restauración

En general los costos de la restauración de pastos marinos son altos, lo que ha hecho que estudios como el de Stowers *et al.*, en el año 2006 demuestren que es más rentable para estos ecosistemas preservar el hábitat que restaurar un área luego de su degradación. El problema surge cuando se presentan disturbios de origen natural que afectan la integridad y la salud del ecosistema de pastos, haciendo muchas veces necesario restaurar para ayudar a recuperar el ecosistema de referencia o por lo menos evitar que el ecosistema continúe degradándose tras la afectación por nuevos disturbios. Paling *et al.*, en 2018 realizan una revisión general de los costos de restauración en esfuerzos a nivel global (Ver Tabla 10), y determinan que es importante analizar los costos según la escala de la restauración (Pequeña vs. Gran escala). Por ejemplo, mencionan que para restauraciones que abarquen más de 20 ha, los costos pueden ser demasiado elevados, además de los problemas relacionados con el material donante para la siembra. Sin embargo, mencionan que a pequeña escala se cuenta con la capacidad de generar con éxito pequeñas praderas de pastos marinos (aunque a un alto costo), las cuales a menudo están dirigidas a compensar daños a pequeña escala.

Tabla 10. Costos de diferentes acciones de restauración de ecosistemas de pastos marinos. Se presentan en dólares estadounidenses de 2007, demás no todas incluyen los costos del monitoreo. Tomado de Paling *et al.*, en 2018.

Área de restauración	Costos	Metodología de restauración
----------------------	--------	-----------------------------

	\$50.000/ha (estimación inicial)	
Países bajos		No especifica
	\$4.000.000/ha (estimaciones recientes)	
	\$1.000.000/ha	Siembra mecánica
Australia	\$16.000 - \$34.000 / ha	Siembra manual voluntaria
	\$84.000 - \$168.000 / ha	Siembra manual por profesionales
	\$1.900.000 - \$3.387.000/ha	Siembra manual con diferentes diseños y siembra mecánica
Estados Unidos	\$33.000 - \$99.000/ha	Pequeña escala
	\$570.000 - \$972.000/ha	Manual y pequeña escala (bajos costos), mecánica (altos costos). Incluye costos de monitoreo

De esta forma, gracias a la experiencia de algunos expertos internacionales en otras áreas geográficas como por ejemplo Hernández-Delgado *et al.*, 2020, sabemos que al momento de decidir implementar acciones de restauración es importante tener en cuenta diferentes aspectos como: (i) Establecer estrategias de autogestión y financiamiento; (ii) Empoderamiento comunitario; (iii) Redes de apoyo y (iv) Definir los planes a corto, mediano y largo plazo. A partir de los cuales se podrá asegurar el éxito de la restauración de ecosistemas de pastos marinos.

Los costos asociados a la restauración, se podrán utilizar para estimar **un análisis de rentabilidad** como el expuesto por Saunders en el Simposio “Experiencias Internacionales en restauración de ecosistemas Marinos” en noviembre de 2021, permitiendo priorizar en las acciones más rentables según Costo-beneficio o evitando incurrir en procesos de restauración que no resulten rentables en el tiempo y por ende sean no exitosos. El análisis se podrá calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Rentabilidad} = \frac{\text{Beneficio (hectareas)} \times \text{Probabilidad de éxito de planes de restauración}}{\text{Costo total}}$$

2.7. Definición de implementación de protocolos de restauración

Este será el punto más importante dentro de la restauración de pastos en el archipiélago, y dependerá de los resultados que se espere obtener y los costos de cualquier plan de acción que se decida implementar.

Una vez se ha realizado una evaluación rápida del ecosistema tras el paso de un huracán, surgirán diferentes preguntas que encaminarán el protocolo de restauración y ayudarán a definir los objetivos que se desean cumplir con el tiempo. Algunas de estas preguntas serán:

- ¿Restaurar para qué?, ¿Se desea restaurar solo la cobertura o hacer énfasis en servicios y funciones del ecosistema? ¿Se desea restaurar con énfasis en servicios asociados a la erosión costera, mejorar la calidad del agua (p.e. menos turbidez con énfasis en turismo), disminuir la velocidad de corrientes, etc.?
- ¿Restaurar bajo qué costos?
- Si se va a restaurar, ¿Qué praderas son más importantes para restaurar? Tanto desde el punto de vista ecológico y ecosistémico como desde el punto de vista social y de los socio-ecosistemas.
- ¿Quiénes serán los actores de la comunidad académica y de la comunidad local involucrados en los procesos de restauración?
- ¿Cuánto será el tiempo o los plazos de restauración y monitoreo a la restauración?
- ¿Es rentable restaurar?
- ¿Cuánto es el mínimo de siembra?

2.7.1. Definición de objetivos

Serán los que guíen la trayectoria de los procesos de restauración, también definirán los indicadores de éxito de la fase de consolidación. Para la definición de los objetivos del proyecto de restauración es necesario tener diferentes aspectos en cuentas como menciona Vargas en 2011:

- Definir el estado deseado dentro de las trayectorias sucesionales posibles del ecosistema.
- Establecer objetivos con mucha claridad para lograr que el proyecto tenga éxito en términos de efectividad y costos.
- Se debe estar seguro del tipo de influencias externas que pueden afectar el desarrollo del proyecto.
- La definición de los objetivos se relaciona con el presupuesto destinado para el desarrollo del proyecto de restauración, porque de estos recursos depende la

extensión del área a intervenir, el personal contratado para las diversas funciones, la cantidad de estrategias que puedan ser implementadas y el tiempo que dure la implementación, evaluación y monitoreo.

- En algunos proyectos es necesario hacer investigación básica, la cual hay que tener en cuenta en los costos.
- En otros proyectos es necesario contratar muchos jornales para la siembra de especies, remoción de plantas invasoras y adecuación de las áreas, construcción y mantenimiento de infraestructura para la propagación y crecimiento de plantas.
- Es muy importante poder evaluar la relación costo-efectividad de diferentes técnicas de restauración.

“La definición de los objetivos es el paso más importante de la restauración, ya que será lo que guíe la trayectoria de los procesos de restauración y definirá los indicadores de éxito de la fase de consolidación. Estos responderán preguntas de ¿por qué y para qué restaurar?”.

2.8. Fase experimental

La fase experimental hace referencia al **diseño** y la **implementación** de las acciones de restauración, en donde a partir de trabajos realizados en campo por equipos de profesionales en conjunto con la comunidad local, se logran desarrollar los diferentes protocolos, basados y adecuados según los resultados de la fase diagnóstica.

Para el presente protocolo de restauración de pastos post-huracán, se establecen dos tipos de restauración: una primaria que correspondería a la restauración a corto plazo (desde el evento climático extremo hasta 1 año), y una restauración secundaria correspondiente a los planes realizados un año después del huracán.

2.8.1. Seleccionar las especies adecuadas para la restauración.

Una vez se ha llevado a cabo la fase diagnóstica y se tienen claros los objetivos del proceso de restauración que se desea llevar a cabo, se realiza la selección de especies para la restauración que es un aspecto muy importante, puesto que el éxito de los proyectos depende de la capacidad para dicha selección. Para esto, a partir del listado de especies y sus trayectorias sucesionales registrado en el potencial de regeneración, se seleccionan las especies más importantes bajo una escala de atributos o rasgos que pueden ser útiles en los sitios que se van a restaurar (Vargas 2011).

Por ejemplo, en zonas donde sea necesario recuperar la cobertura de praderas de pastos marinos y a su vez estabilizar los sedimentos, es muy importante combinar especies pioneras de rápido establecimiento como *H. wrightii* y *H. decipiens* sumadas a especies que crecen rápido y permiten estabilizar el sedimento con mayor firmeza como *S. filiforme*.

En esta fase es necesario combinar el conocimiento de la comunidad local y el conocimiento de expertos locales y científicos para obtener mejores resultados.

2.8.2. Propagar y manejar las especies.

Un problema muy común para la restauración ecológica, es la escasez de propágulos de especies pioneras que inicien la sucesión y de especies de estados sucesionales más avanzados que permitan no solo la recuperación de la estructura del ecosistema, sino también de la composición del mismo (Vargas, 2011). Contar con el conocimiento para propagar las especies desde su medio natural es muy importante, pero iniciar metodologías para el desarrollo de cultivos que sustituyan el material donante directamente de campo es un paso importante en la implementación de estrategias exitosas de restauración. Para esto se pueden promover a nivel local el desarrollo de cultivares ya sea por medio de material vegetal, o por semillas o por medio de una forma más especializada como lo es el desarrollo de cultivos *in vitro*. Así mismo, es importante empezar a hacer pruebas piloto de propagación manual de brotes, plantas y si es posible tapones de pastos dentro del archipiélago, para evaluar la capacidad y porcentaje de supervivencia de estas prácticas con respecto a las diferentes especies y los diferentes ambientes que ofrecen las islas a nivel local, y de esta forma desarrollar una perspectiva de los posibles resultados que puede ofrecer cada metodología y así optimizar futuros procesos de restauración en cuanto a recursos y tiempo.

De igual forma, este paso se vuelve importante en los procesos de restauración post-huracán en los que se decida utilizar metodologías de siembra manual de **fragmentos de pastos**, desprendidos de forma natural o por presiones antrópicas. En este caso, sería necesario desarrollar formas de manejo de estos potenciales esquejes y en casos en que no se pueda restaurar inmediatamente el área afectada por el paso del huracán, encontrar o desarrollar zonas de propagación de estos brotes, para su uso futuro como material donante en nuevos procesos de restauración.

“El éxito del trabajo de restauración en pastos marinos dependerá principalmente de la selección de los sitios a restaurar, del material donante y del diseño de las unidades de siembra”

2.8.3. Seleccionar los sitios a restaurar.

Al igual que el material donante es fundamental dentro del proceso de restauración, el sitio o los sitios en que se implementarían los protocolos de restauración son fundamentales y de ellos depende el éxito del trabajo. A continuación, se enlistan aspectos clave para tener en cuenta a la hora de seleccionar los sitios:

- Ubicación en sitios accesibles (Facilita el monitoreo).
- Áreas de interés comunitario.
- Áreas con las condiciones ambientales de referencia (Sin disturbios o alteraciones constantes)
- Praderas que no contengan gran abundancia de herbívoros y que sus niveles de bioturbación no sean muy altos.
- Procurar que los sitios o sus alrededores no presenten especies invasoras.
- Sitios en donde se puedan evaluar los gradientes topográficos naturales dentro de la restauración a nivel local.
- Tipo y composición de los sedimentos, procurando que sean finos.
- Definir el nivel de exposición de las praderas al oleaje, ya que sitios más expuestos requieren de mayores unidades de siembra porque la supervivencia suele ser menor.

2.8.4. Seleccionar los sitios o material donante

La selección de los sitios que ofertarán el material donante, el tipo y la calidad del material donante son la pieza clave en la restauración de pastos marinos. El contar con abundante material vegetal para sembrar y restaurar extensas áreas es clave, al igual que el tipo de esqueje utilizado, pues diversos son los estudios sobre efectividad de la restauración y supervivencia de diferentes unidades de siembra, según el tamaño, número de brotes, integridad del tapón o tapete, entre otras.

Debido a los altos costos de restauración de pastos marinos, en casi todos los proyectos se utilizaba como material donante, brotes o plantas obtenidas de una comunidad de pastos aledaña a la afectada, pero por los problemas que esta práctica puede traer sobre las praderas generando fragmentación del ecosistema e incurriendo en alteraciones a los pastos o los problemas que se pueden generar en cuanto a permisos ambientales por ser en algunos casos áreas protegidas, se han empleado en algunos casos el desarrollo de cultivos en condiciones controladas (con altísimos costos de manutención) y más recientemente, el uso de fragmentos de pastos desprendidos tanto natural como por acciones antrópicas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que, en áreas marinas remotas o Áreas Marinas Protegidas, la disponibilidad de terrones de pastos desprendidos por acciones de navegación u otras prácticas humanas debe evaluarse cuidadosamente ya que, en estas áreas, los únicos fragmentos desprendidos naturalmente puedan no ser suficiente para los objetivos de restauración (Mancini et al., 2021).

2.8.5. Diseñar y seleccionar la metodología de restauración.

El diseño y la selección de la metodología dependerá de todas las consideraciones mencionadas anteriormente. Ya sea que se empleen diferentes metodologías o materiales para evaluar a nivel local cuál tiene mejor respuesta, o ya sea que se planee desde la

relación costo-beneficio, o desde los retos y barreras que surjan a medida que se implementan las acciones de restauración.

La primera fase de la restauración (primaria o a corto plazo) deberá buscar diagnosticar la metodología más efectiva según las condiciones y el contexto del proyecto de restauración, por lo que en un primer año, el desarrollo de siembras manuales de brotes, fragmentos y núcleos o tapetes, será fundamental para posteriormente, en una segunda fase de la restauración (secundaria o a largo plazo) refinar estas metodologías y enfocar los esfuerzos en aquella que mejores resultados aporte en cuanto a supervivencia y respuesta de los trasplantes.

2.9. Fase de monitoreo

2.9.1. Monitorear el proceso de restauración.

El monitoreo se refiere al seguimiento y evaluación continuos de los cambios que experimenta el ecosistema bajo los diferentes tratamientos de restauración aplicados. El objetivo final del monitoreo es asegurar el éxito en la restauración ecológica del ecosistema, ya que por medio de éste se obtiene la información necesaria para evaluar y ajustar las prácticas de restauración, lo que permite modificar o detener tratamientos que están resultando negativos o indeseables en el proceso de restauración o continuar, modificar y hasta mejorar los tratamientos con resultados positivos (Vargas, 2007; 2011; UNEP, 2020). Idealmente, el monitoreo se debe llevar a cabo hasta el momento en que se considere que el ecosistema ha recuperado su integridad ecológica, es decir, que el ecosistema no necesitará ninguna acción humana para autosostenerse y auto mantenerse. El éxito de un proceso de monitoreo se verá reflejado en tres pasos: (i) el acompañamiento del proceso de restauración desde el diagnóstico del estado actual del ecosistema, (ii) acompañamiento durante la implementación de los tratamientos y el desarrollo de los mismos, (iii) definición de éxito, en el momento en que se considera que el ecosistema ha recuperado su integridad ecológica (Vargas, 2007).

Esta información se va a profundizar más adelante para el caso específico de los ecosistemas de pastos marinos presentes en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (ver 5. Métodos claves de monitoreo).

2.10. Fase de consolidación

2.10.1. Consolidar el proceso de restauración.

Se puede hablar de un proyecto de restauración consolidado cuando éste se puede considerar exitoso y cuando ha cumplido con los objetivos que se propuso. Este éxito puede evaluarse como un continuo desde los tratamientos iniciales planteados para la superación de las barreras a la restauración, hasta la recuperación de la dinámica y los atributos

funcionales del ecosistema, así como de su capacidad de resistencia, resiliencia y estabilidad, de modo que sea autosostenible en el tiempo (Vargas, 2007).

Vargas en el 2007 menciona estrategias que se pueden usar para evaluar el éxito de la restauración. Estas son: (i) la comparación directa, en la que algunos parámetros son determinados tanto en el ecosistema de referencia como en el restaurado. (Teniendo en cuenta que pueden existir diferencias entre el ecosistema de referencia y el ecosistema restaurado); (ii) el análisis de atributos, que consiste en la determinación de parámetros que permitan establecer si los criterios de éxito definidos en los objetivos han sido alcanzados.

2.11. Pasos para la restauración de pastos marinos en el contexto del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina tras el paso de un huracán.

A continuación, se enlistan los diferentes pasos para la restauración de pastos marinos en el caso del paso de un huracán, adaptando los 13 pasos para la restauración de Vargas, 2011 al contexto del Archipiélago y del ecosistema de pastos marinos.

- Fase diagnóstica:

Paso 1. Desarrollo línea base: Definir el ecosistema o comunidad de referencia; evaluar el potencial de regeneración del ecosistema; establecer las barreras a la restauración a diferentes escalas

Paso 2. Evaluar el estado actual del ecosistema (Post-huracán)

Paso 3. Establecer escala y jerarquía del disturbio: Intensidad, duración y magnitud del huracán.

Paso 4. Definir el escenario y grado de afectación general y contrastar con un análisis de rentabilidad a partir del cual se decide si es necesario implementar acciones y procesos de restauración.

-Fase de restauración:

Paso 1. Definir objetivos de restauración

*Las escalas a trabajar serán de comunidad o ecosistema; además, por el potencial de regeneración del ecosistema, los esfuerzos de restauración se enfocarán en la especie *T. testudinum*, o en casos específicos, unidades de siembra mixtas de *T. testudinum* x *S. filiforme*.

Paso 2. Seleccionar los sitios a restaurar.

Paso 3. Seleccionar los sitios o el material vegetal donantes.

Paso 4. Diseñar y seleccionar la metodología de restauración: Siembra manual de brotes o núcleos.

Paso 5. Implementar la metodología.

-Fase de monitoreo

Paso 6. Monitorear

-Fase de consolidación

Paso 7. Consolidar: Lograr la participación comunitaria

3. Guía metodológica para la restauración primaria post-huracán

3.1. Posibles problemas y diagnostico

Tras el paso de un huracán cerca al Archipiélago, las metodologías de respuesta a la restauración primaria se enfocarían principalmente en la toma de decisiones respecto a implementación de protocolos de restauración según tipo el tipo de afectación (por medio de una evaluación del estado). De igual forma estas metodologías se verían enfocadas a recuperar inicialmente la cobertura y densidad de pastos marinos o mitigar la pérdida de cobertura de estas.

“La restauración primaria se enfocaría principalmente en la toma de decisiones respecto a implementación de protocolos de restauración según tipo el tipo de afectación y estaría enfocada en recuperar o mitigar la pérdida de cobertura y densidad de pastos marinos”.

Los problemas a corto plazo sobre las praderas de pastos marinos se podrían ver de dos formas, los problemas que se pueden asistir desde la implementación de procesos de restauración como el arrancamiento, defoliación o enterramiento de pastos marinos y los problemas que no se pueden asistir desde la implementación de procesos de restauración como el aumento de la turbidez, falta de oxígeno, disminución de salinidad y nutrificación, los cuales habría que esperar que por medio de dinámicas naturales se restablecieran a sus valores normales.

De igual forma, la evaluación de la temporada climática es muy importante, ya que la implementación de cualquier acción de restauración se podría ver afectada por tormentas.

Al igual que considerar los problemas a largo plazo, con posibles afectaciones a raíz de eventos climáticos extremos como nuevos huracanes o tormentas tropicales extremas. En este caso, se aconseja seleccionar sitios con diferentes condiciones hidrodinámicas y distanciados considerablemente a lo largo de las islas, ya que así el paso de un nuevo huracán puede generar afectaciones diferenciales sobre los sitios, a diferencia de si se decide restaurar en zonas muy cercanas las cuales podrían verse todas afectadas, dando como resultado el fracaso de la implementación de las acciones de restauración y generando pérdidas a nivel de recursos.

Finalmente, a lo largo de esta primera etapa de restauración, sería necesario hacer monitoreos buscando posibles problemas como los descritos en Hernández-Delgado *et al.*, 2020, asociados a colonización de especies invasoras a raíz de las dinámicas generadas por los huracanes sobre las praderas de pastos marinos, o cambio de fase o dominancia de las especies asociadas a las praderas de pastos.

3.2. Pasos propuestos para la restauración primaria

A continuación, se enlistan los pasos que debería llevar cualquier proceso de restauración primaria inmediatamente después del paso de un huracán sobre el Archipiélago. Cabe resaltar que según el escenario de afectación (Ver 3.4 Protocolos de respuesta según escenario y nivel de afectación), estos pasos pueden cambiar un poco.

Tabla 11. Pasos para la restauración primaria de pastos marinos post-huracán. Entiéndase como barreras al establecimiento o persistencia niveles elevados de turbidez, disminución de oxígeno disuelto o de la salinidad, nutrificación, cambios en tipo y nivel de sedimentos * Se puede dar un escenario en el que al esperar que las condiciones ambientales se reestablezcan, en el monitoreo del estado del ecosistema se determine que por medios naturales el ecosistema se recuperó o está en una trayectoria a rehabilitarse naturalmente y no sea necesario implementar acciones de restauración.

Fase diagnóstica

PASO 1 Selección de sitios para evaluación rápida.

PASO 2 Evaluación rápida del estado del ecosistema post-huracán.

PASO 3 Definición del escenario y grado de afectación general a partir del cual se decide si es necesario implementar acciones y procesos de restauración.

RUTA A: Cuando no se presenten barreras al establecimiento o persistencia, es decir, condiciones ambientales iguales que antes del paso del huracán.

RUTA B: Cuando se presenten barreras al establecimiento o persistencia y se decide esperar estabilización de factores ambientales para restaurar. *(Recomendado cuando se cuenta con los recursos para manutención de cultivos o redes colaborativas)*

PASO 4 Definir objetivos de restauración.

PASO 4 Definir objetivos de restauración.

PASO 5 Selección de sitios a restaurar (Mayores afectaciones, Mayores tiempos de recuperación estimada, Mayor rentabilidad costo-beneficio).

PASO 6 Seleccionar los sitios o material donantes

PASO 7 Diseñar y seleccionar la metodología de restauración: Siembra manual de brotes o núcleos, tipo de anclaje de unidades de siembra.

PASO 8 Implementar la metodología.

PASO 9 Monitoreo

PASO 5 Seleccionar los sitios o material donantes

PASO 6 Implementación de metodologías de propagación en vivero o cultivos controlados si no se han establecido con anterioridad (zonas de propagación).

PASO 7 Monitoreo (3 meses tras Paso 2).

¿Persisten las barreras o ya se puede continuar con implementar procesos de siembra para restauración?

PASO 8 A) Si persisten: Esperar y realizar un nuevo monitoreo tras 6 meses del disturbio; B) * No persisten y tras el tiempo transcurrido aun es necesario restaurar: Implementar ruta A con ayuda de la comunidad donante establecida en los cultivos, solo si lograron ser efectivos.

“La restauración secundaria se enfocaría principalmente en la retroalimentación de las metodologías implementadas en la restauración primaria, con el fin de mejorar y adaptar las metodologías a los problemas locales y seleccionar las que mejores respuestas y rendimientos presenten para asegurar los resultados y el éxito de la restauración.”

3.3. Guía metodológica para la restauración secundaria

3.3.1. Posibles problemas y diagnostico

Un proyecto de restauración de pastos marinos, en su fase de restauración secundaria, es decir, en el mediano y en el largo plazo, estará caracterizado por la constante retroalimentación de las metodologías implementadas en la restauración primaria del proyecto a través de los distintos monitoreos realizados tras las siembras de pastos. Esto se hace con el fin de mejorar y adaptar las metodologías a los problemas locales y seleccionar las metodologías que mejores respuestas y rendimientos estén presentando para magnificar los resultados de la restauración. Así mismo, en fases muy avanzadas de la restauración (largo plazo) se puede evaluar si se han recuperado o restablecido las funciones y los servicios ecosistémicos brindados por las diferentes praderas, con el fin de determinar si se emplean metodologías o protocolos en pro de las funciones y servicios, en lugar de metodologías asociadas al aumento de la cobertura de pastos.

Los problemas en este contexto podrían verse principalmente en los resultados de la restauración primaria, es decir, se pueden presentar panoramas en que la implementación primaria no sea exitosa y por ende la restauración de coberturas y densidades de pastos dentro de las praderas no se haya efectuado haciendo necesario modificar los procesos

implementados hasta el momento. También pueden ocurrir escenarios en donde una tormenta tropical, un nuevo huracán o actividades antrópicas afecten las acciones de restauración primaria haciendo necesario implementar esas acciones nuevamente en el largo plazo de un proyecto ya iniciado.

3.4. Pasos propuestos para la restauración secundaria

A continuación (Figura 6), se enlistan los pasos que debería llevar cualquier proceso de restauración secundaria tras el paso de un huracán sobre el Archipiélago. Cabe resaltar que el restablecimiento o recuperación de una pradera puede tardar muchos años según el tipo y nivel de afectación. Por esto es muy importante definir bien los objetivos y los plazos máximos de tiempo en los cuales se puede implementar un proyecto según los recursos y el estado del ecosistema al que se quiere llegar tras la restauración.

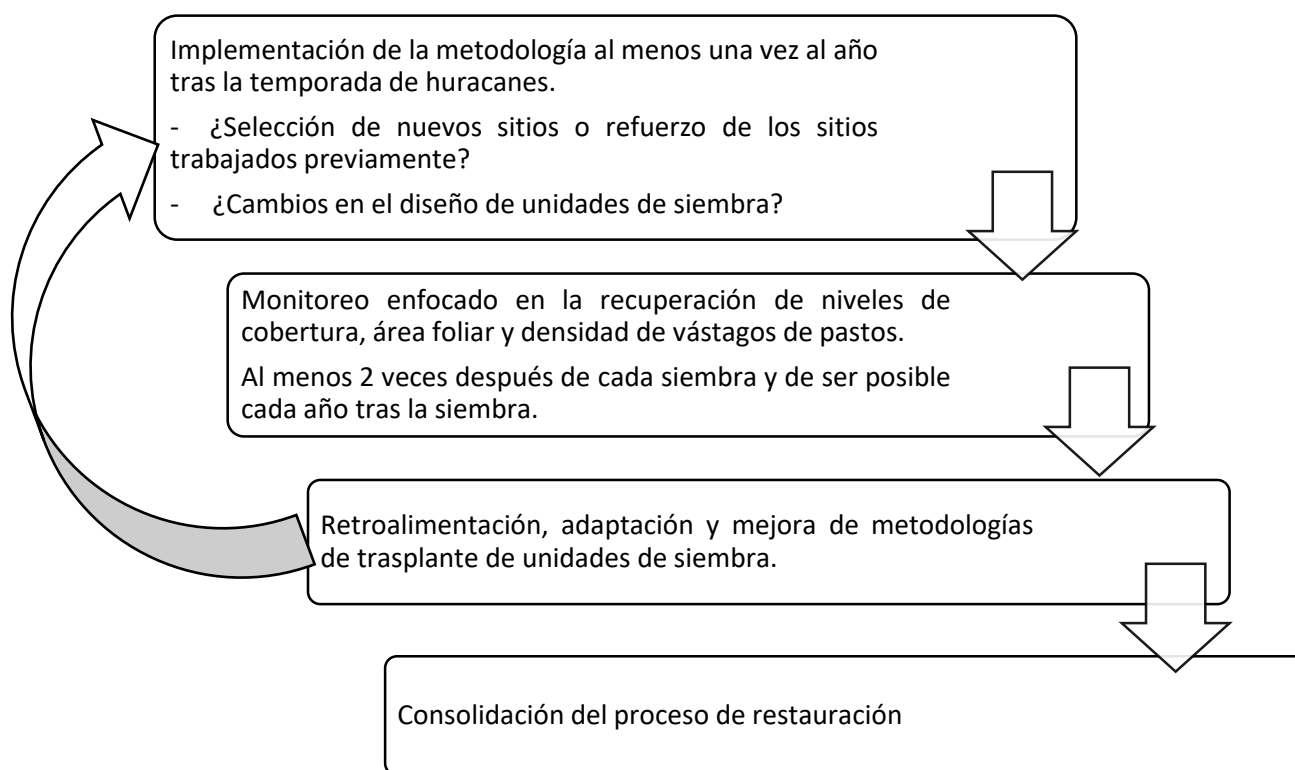


Figura 6. Pasos para la restauración secundaria de pastos marinos post-huracán en procesos a largo plazo (más de 2 años), y en los que el enfoque es básicamente restaurar biomasa y cobertura.

3.5. Evaluación de daños y nivel de afectación, procedimientos de restauración según afectación.

La siguiente tabla muestra los posibles escenarios de afectación de los ecosistemas de pastos marinos tras el paso de huracanes de diferente categoría. Los criterios tenidos en cuenta para desarrollar la Tabla 12 surgen de estudios previos (p.e. Tabla 1 en Cruz-Palacios y Van Tussenbroek, 2005; Tabla 7 en Cabaço *et al.*, 2008) en los que se han descrito las

afectaciones post-huracán en los ecosistemas, basados prácticamente en la fuerza de las corrientes a raíz de los vientos generados por el huracán que trae consigo además el arrastre de sedimentos, el aumento de las olas y cambios en factores fisicoquímicos. De igual forma, es sabido que en escenarios en que el viento de los huracanes o las tormentas tropicales golpea por barlovento a las praderas de pastos en sentido contrario a las barreras de coral, estos presentan mayores pérdidas debido a que las corrientes los afectan de manera directa sin la protección natural de los corales (Díaz *et al.*, 2003).

Tabla 12. Posibles escenarios de afectación según la categoría de los huracanes sobre los ecosistemas de pastos marinos presentes en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Basado en la información revisada en la sección 2 de este documento y en Cruz-Palacios y Van Tussenbroek, 2005 y Cabaço *et al.*, 2008.

Categoría huracán	Posibles afectaciones
Categoría I 119-153 km/h	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida total o parcial de cobertura de especies de menor porte: S. filiforme, H. wrightii y H. decipiens. • Cambios en sedimentos marinos: exposición de partes subterráneas; arrancamiento, enterramiento. • Defoliación de T. testudinum a causa de fuertes corrientes. • Disminución de productividad de las praderas.
Categorías II y III 154-177 km/h y 178-208 km/h	<ul style="list-style-type: none"> • (mismas afectaciones que Cat I pero con mayor nivel o severidad de afectación) • Disminución en la salinidad • Aumento considerable de turbidez
Categorías IV y V 209-251 km/h y 252 km/h o más	<ul style="list-style-type: none"> • (mismas afectaciones que Cat I, II y III, pero con mayor nivel o severidad de afectación) • Pérdidas de cobertura parciales en poblaciones de T. testudinum, disminuyendo su densidad. • Retorno de las praderas a un estado sucesional anterior. • Disminución de oxígeno por posible aumento de comunidad planctónica por variaciones en concentraciones de nutrientes post-huracan.

La categoría del huracán por sí misma no nos dice mucho sobre los posibles escenarios de afectación ya que estos pueden ser altamente variables como evidenciaron Cabaço *et al.* en el 2008. De esta forma, son las particularidades locales las que finalmente determinan los diferentes escenarios de afectación de los ecosistemas de pastos marinos, al igual que el nivel de afectación (Figura 7), a partir de los cuales se tomarán las decisiones en cuanto a restauración. No obstante, estos rangos son una guía ya que la restauración, se puede

aplicar a parches desde los 100m² que han sufrido pérdidas de cobertura o mortalidad tras un disturbio (Fonseca *et al.*, en 1998.).

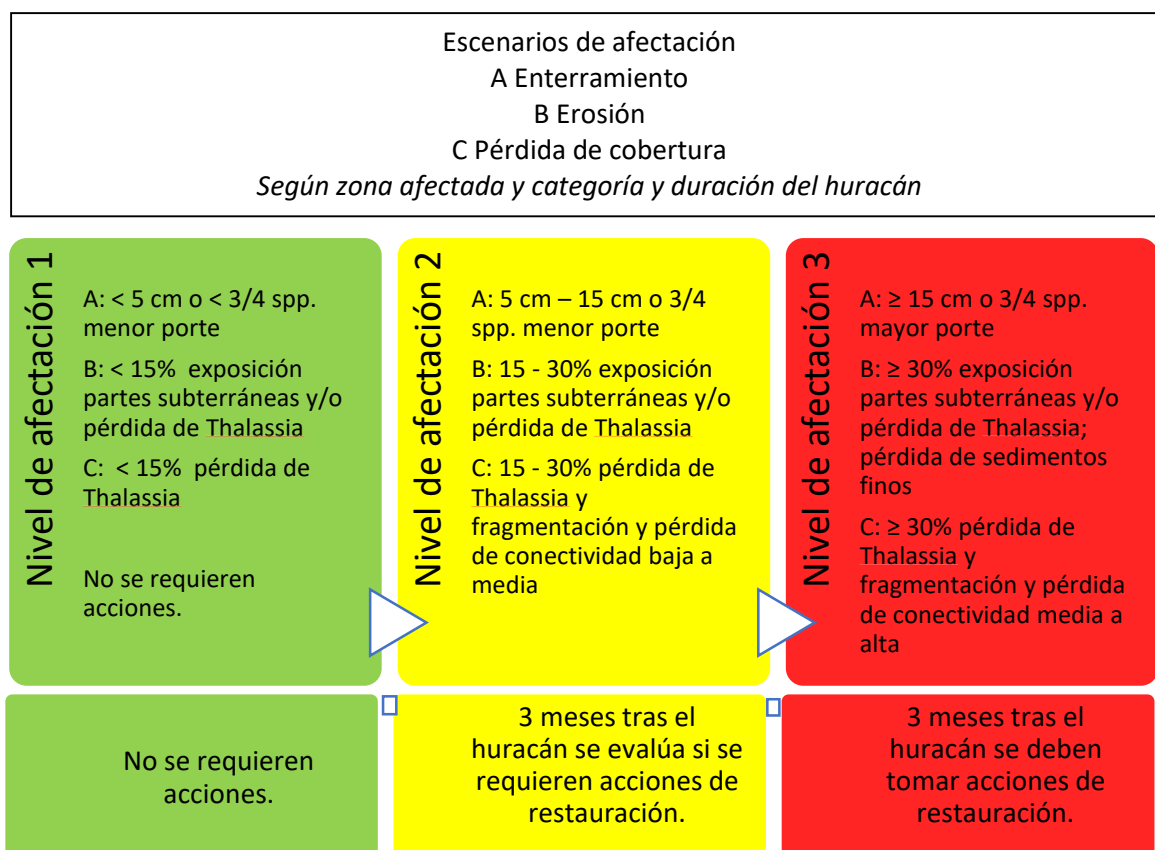


Figura 7. Niveles de afectación para los distintos escenarios de afectación de los ecosistemas de pastos marinos tras el paso de un huracán. Los porcentajes de pérdida de pérdida o afectación de *Thalassia* se consideran a nivel de cuadrantes (muestreo) y no como el porcentaje de cobertura total dentro del archipiélago.

A continuación, se enlistan los principales escenarios de afectación y una guía metodológica o protocolos según sea el caso.

3.5.1. Enterramiento

- **Posibles problemas y diagnóstico**

Este es uno de los principales tensores tras el paso de un huracán o de una tormenta tropical de gran intensidad cerca o sobre ecosistemas de pastos marinos. La deposición de finas o gruesas capas de sedimentos de diferentes tamaños de partículas puede inducir cambios leves o drásticos sobre las praderas de pastos marinos. Generalmente, en especies de pequeño porte como *H. decipiens* y *H. wrightii*, el enterramiento suele generar grandes

pérdidas de cobertura o en algunos casos la totalidad de ésta (Fonseca *et al.*, 1998). Aunque se ha reportado que estas especies presentan mecanismos de respuesta más rápidos ante estos disturbios como la rápida colonización por semillas o por medio de rebrotes y fragmentos vegetales. De igual forma, son altamente susceptibles al cambio de composición de los sedimentos, ya que si la tormenta trae consigo sedimentos de partículas más grandes, esto representará una barrera al establecimiento que puede hacer tardar la recolonización de estas especies. Por su parte, las especies de mayor porte como *S. filiforme* y *T. testudinum* son más tolerantes a tasas de enterramiento mayores, pero se ha reportado para *S. filiforme* altas tasas de pérdida de cobertura mientras que para *T. testudinum* se han reportado tasas de recuperación bastante prolongadas.

“Se considera que un enterramiento mayor a 15 cm que persista por más de dos meses es un indicativo de que las praderas de pastos marinos pueden requerir de acciones de restauración”.

El enterramiento también puede traer consigo alteraciones en el contenido de nutrientes y materia orgánica de los sedimentos y en la diversidad y riqueza de la infauna asociada a estos, alterando las tasas de producción y el metabolismo de las especies de pastos, conllevando a pérdidas o cambios en la prestación de funciones o servicios ecosistémicos por parte de las praderas de pastos marinos.

Debido al estado del ecosistema que se desea alcanzar tras un proceso de restauración exitoso, se debe considerar el trasplante de unidades de siembra principalmente de *Thalassia* y *Thalassia x Syringodium* (en casos específicos según ecosistema de referencia), ya que trabajar con las otras especies (*H. decipiens* y *H. wrightii*) puede representar bajas tasas de rentabilidad debido a que se sabe que son especies pioneras que colonizan rápido gracias a buenos reservorios de semillas. Además, la presencia de estas especies luego de pérdidas de cobertura por el paso de un huracán es un indicador de la regeneración natural del ecosistema y funciones como estabilización de sedimentos que pueden contribuir al facilitamiento del establecimiento y recuperación de las poblaciones de *Thalassia*. No obstante, desarrollar planes que incluyan a la **comunidad** en metodologías de dispersión de semillas de *H. decipiens* y *H. wrightii* en casos donde se aprecien afectaciones grandes de las praderas tras el paso de un eventual huracán, reducirá y evitará costos, además de contribuir al proceso de restauración a mediano y largo plazo.

Los **factores mínimos** para implementar esta metodología de restauración tienen que ver con el nivel de enterramiento respecto a praderas dominadas por *T. testudinum* o en praderas mixtas con un porcentaje mayor a 30% de *T. testudinum*. Sumado a una evaluación posterior en la que se determine que *T. testudinum* ha presentado mortalidad, disminución en la productividad, pérdida o disminución en el crecimiento horizontal o inactivación de brotes o yemas, haciendo necesaria la implementación de acciones de restauración en busca de retornar a las condiciones iniciales asociadas al ecosistema de referencia (Ver

figura 7). Por estudios como los de Ooi *et al.*, 2011 o Cabaço *et al.*, 2008 se considera que un enterramiento mayor a 15 cm que persista por más de dos meses es un indicativo de que las praderas de pastos marinos pueden requerir de acciones de restauración, ya que a estos niveles sumado a daños en las estructuras subterráneas, pueden producir mortalidad del 100% en *Syringodium* y pérdidas considerables en coberturas de *Thalassia*, el cual podría tardar más de 3 años en recuperarse si no es muy extremo el daño y las condiciones hidrodinámicas lo permiten.

- ***Pasos propuestos para la restauración ante enterramiento de pastos***

El siguiente diagrama (Figura 8) muestra los pasos que se deben tener en cuenta para cualquier proceso de restauración de pastos marinos ante un escenario de afectación por enterramiento de sedimentos dentro del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

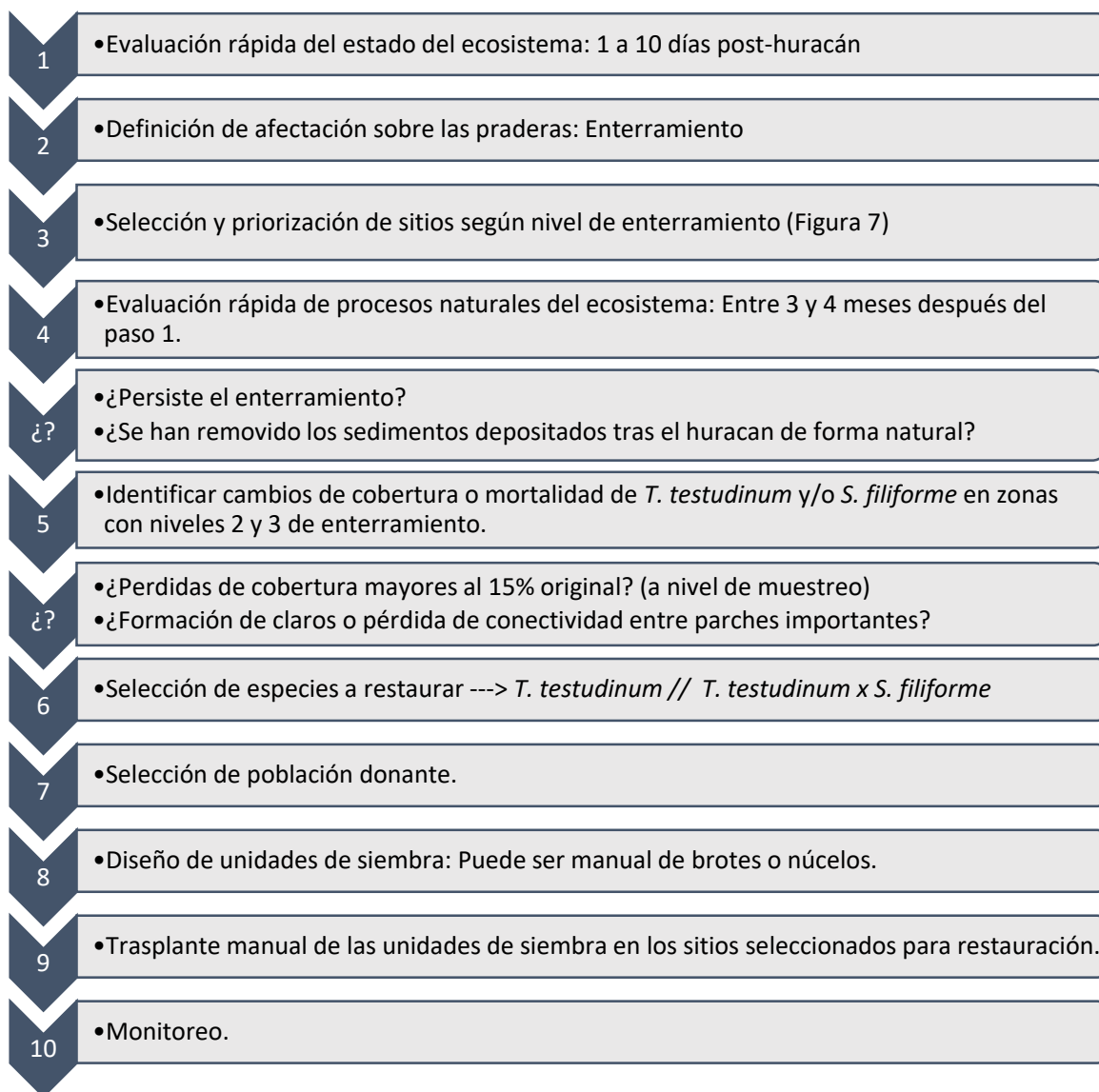


Figura 8. Pasos para la restauración en un escenario de enterramiento de pastos marinos por transporte y deposición de sedimentos. Las preguntas son puntos de control y retroalimentación, a partir de los cuales se define si es rentable o necesario continuar con la implementación de un protocolo de restauración.

3.5.2. Erosión

- **Posibles problemas y diagnóstico**

La remoción de sedimentos es otro de los principales factores que se relacionan con la pérdida de pastos marinos después del paso de un huracán. En este caso, la erosión de los sedimentos a causa del fuerte oleaje o las fuertes corrientes tanto superficiales como de profundidad, pueden generar el desplazamiento de las partículas del sedimento,

cambiando la composición y estructura de los fondos y en algunos casos exponiendo las partes subterráneas de los pastos marinos, afectando su crecimiento y productividad. Además, estos factores pueden generar graves daños como arrancamiento de las partes aéreas (defoliación), arrancamiento total del pasto con generación de importantes claros o volcanes y aumentos en la cantidad de nutrientes y de partículas en suspensión en la columna de agua.

La pérdida de las capas superficiales de sedimentos de partículas más finas a causa de la erosión, puede generar problemas para el establecimiento de las especies *H. decipiens* y *H. wrightii* que son removidas fácilmente con corrientes fuertes, pero como se ha mencionado anteriormente cuentan con mecanismos para una rápida recuperación natural por medio de semillas o restos vegetales, aunque dependen de sedimentos no tan gruesos para su establecimiento. Se ha registrado que después del paso de un huracán las comunidades de pastos se pueden recuperar tras unas semanas o meses de manera natural, de modo que se capturan sedimentos finos hasta el nivel original, tapando los volcanes o zonas erosionadas, conllevando a su vez a una rápida regeneración del ecosistema; aunque se han registrado casos contrastantes en los que por las fuertes condiciones hidrodinámicas, la erosión de los sedimentos y el arrancamiento de los pastos resulta en un efecto dramático, en el que las fuertes corrientes presentan barreras al establecimiento y persistencia, haciendo necesaria la implementación de técnicas de restauración con diseños de unidades de siembra más complejas que involucren la siembra y trasplante de grandes cantidades de sedimentos.

“Se considera que la pérdida de sedimentos finos y/o la exposición de las partes subterráneas que persista por más de dos meses es un indicativo de que las praderas de pastos marinos pueden requerir de acciones de restauración”.

En un panorama de estos, solo *Thalassia* se encuentra en condiciones de crecer bajo presencia de partículas de gran tamaño en el sedimento y se ha reportado que, a pesar de poder crecer, su estado de crecimiento y desarrollo no es el más óptimo. De igual forma, *S. filiforme* cuenta con los mecanismos de regeneración y colonización para recuperar sus poblaciones sin necesidad de una intervención de restauración, teniendo en cuenta que la pérdida de cobertura por arrancamiento y defoliación presenta la dispersión de fragmentos vegetales de la especie, promoviendo su dispersión, ya que se ha reportado que para el Caribe Colombiano esta especie se propaga principalmente por fragmentos vegetativos y no por semillas (Díaz *et al.*, 2003)

De esta forma, los **factores mínimos** para implementar esta metodología de restauración tienen que ver con el nivel de afectación sobre las praderas dominadas por *T. testudinum* o en praderas mixtas con un porcentaje mayor a 30% de *T. testudinum*. Estos factores mínimos para la implementación de metodologías de restauración serán: nivel de erosión

persistente mayor a 10 cm, inactivación de brotes, inactivación del crecimiento horizontal del rizoma y eventual muerte de parches de *T. testudinum*, además de remoción de las partículas finas del sedimento sin posterior retención y recuperación natural.

- **Pasos propuestos para la restauración ante erosión de praderas de pastos**

El siguiente diagrama (Figura 9) muestra los pasos que se deben tener en cuenta para cualquier proceso de restauración de pastos marinos ante un escenario de afectación por erosión a causa de fuertes oleajes o corrientes extremas dentro del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

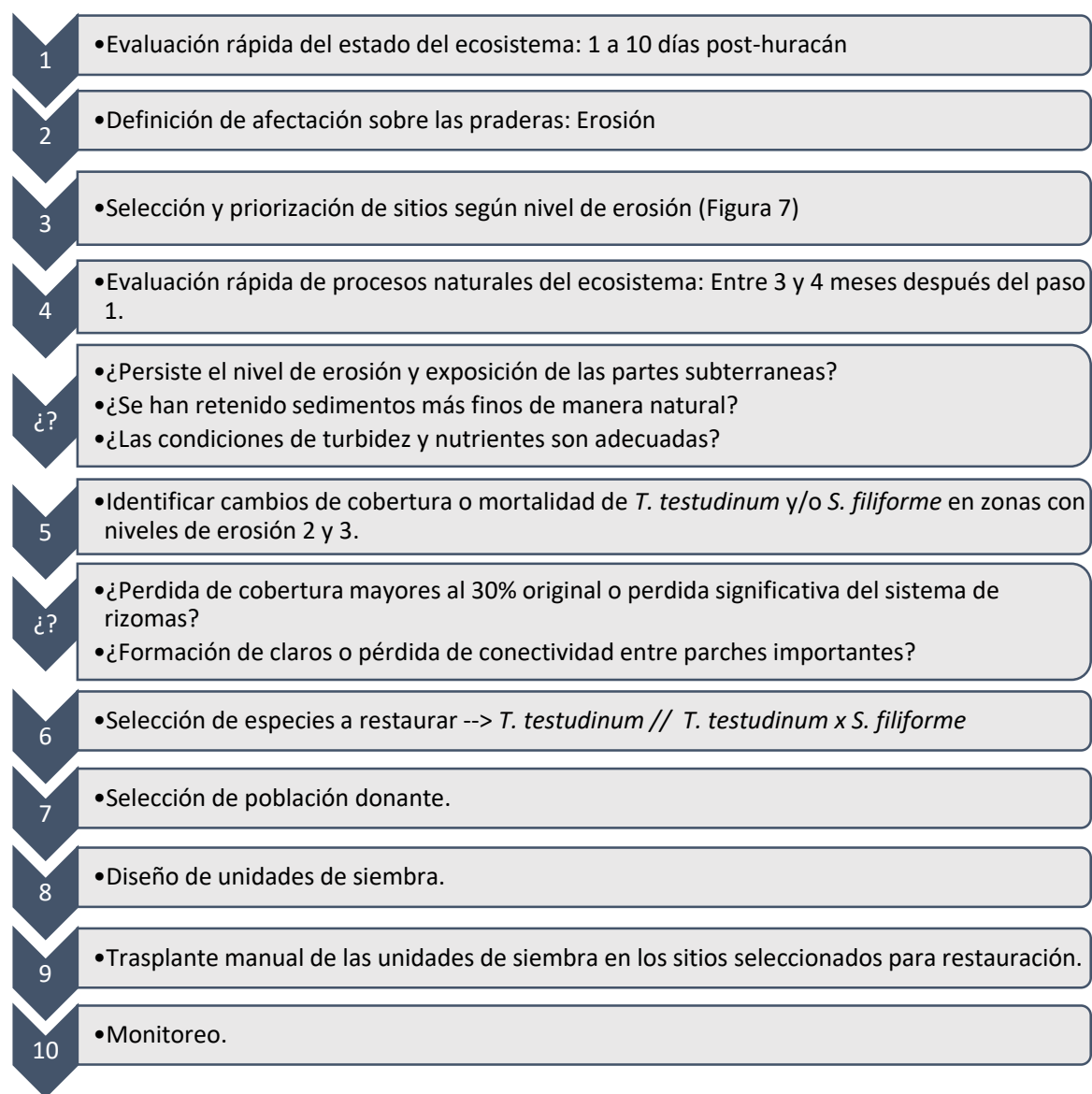


Figura 9. Pasos para la restauración en un escenario de erosión de pastos marinos a causa de fuertes oleajes o corrientes extremas. Las preguntas son puntos de control y retroalimentación, a partir de

las cuales se define si es rentable o necesario continuar con la implementación de un protocolo de restauración.

3.5.3. Mortalidad por condiciones extremas

- **Posibles problemas y diagnóstico**

Cuando se dan cambios en condiciones fisicoquímicas a raíz de tormentas tropicales o huracanes como disminución de la salinidad por el exceso de lluvias, aumentos en la turbidez del agua por erosión de costas, transporte de sedimentos o el aumento de nutrientes desencadenando proliferaciones algales y consecuentemente cambios en la concentración del oxígeno disuelto, es normal que las condiciones tarde o temprano se restablezcan de forma natural haciendo que las pérdidas en las praderas sean mínimas, no se presenten o se recuperen rápidamente por resiliencia misma del ecosistema. Sin embargo, en ocasiones, la intensidad o la duración del disturbio podrían desencadenar la proliferación de taxa oportunistas, incluido el fitoplancton, las macroalgas bentónicas y epifitas o especies de pastos invasores (Hernández-Delgado *et al.*, 2020) afectando a nivel competitivo a los pastos marinos, o simplemente pueden hacer que comunidades de *T. testudinum* (que es la especie climática de las praderas del archipiélago) presente altas mortalidades por estrés metabólico, que pueden tardar varios años en recuperarse haciendo que diferentes funciones y servicios ecosistémicos se pierdan o disminuyan. Es importante identificar estos escenarios, ya que las praderas pueden aparentar una buena salud desde la cobertura y densidad, pero estar realmente afectadas desde un punto de vista metabólico, acarreando problemas en productividad, secuestro de carbono, estabilización de sedimentos, retención de partículas, entre otros.

Bajo este contexto, sería la pérdida de cobertura de *T. testudinum* por muerte, y/o el cambio de fase sucesional a nivel de la composición y estructura del ecosistema, los principales factores a tener en cuenta para definir los mínimos bajo los cuales se implementarían procesos de restauración. En los casos que las pérdidas de cobertura de *T. testudinum* superen el 30% de la cobertura previa al huracán, será un claro indicador para avanzar en medidas de restauración. De igual forma, el cambio en la estructura de las praderas, con un aumento de macroalgas puede ser un **factor clave** en la determinación de la implementación de estrategias de restauración, ya que esta podría ser una señal de un cambio de trayectoria que a largo plazo puede representar la pérdida de mayores coberturas de praderas. Finalmente, una disminución significativa en la productividad de las praderas puede ser otro factor determinante en la implementación de acciones de restauración.

En el eventual caso de una pérdida masiva de cobertura de pastos por algún tensor ejercido por el paso de un huracán, podría representar un trabajo de éxito a largo plazo y de ahorro

de costos de restauración la implementación de protocolos de siembra de semillas y/o frutos de *T. testudinum* en los cuales se involucre mayormente a la comunidad.

- **Pasos propuestos para la restauración ante mortalidad de praderas de pastos**

En la Figura 10 se muestran los pasos que se deben tener en cuenta para cualquier proceso de restauración de pastos marinos ante un escenario de mortalidad masiva o significativa a causa de factores y condiciones ambientales extremas dentro del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

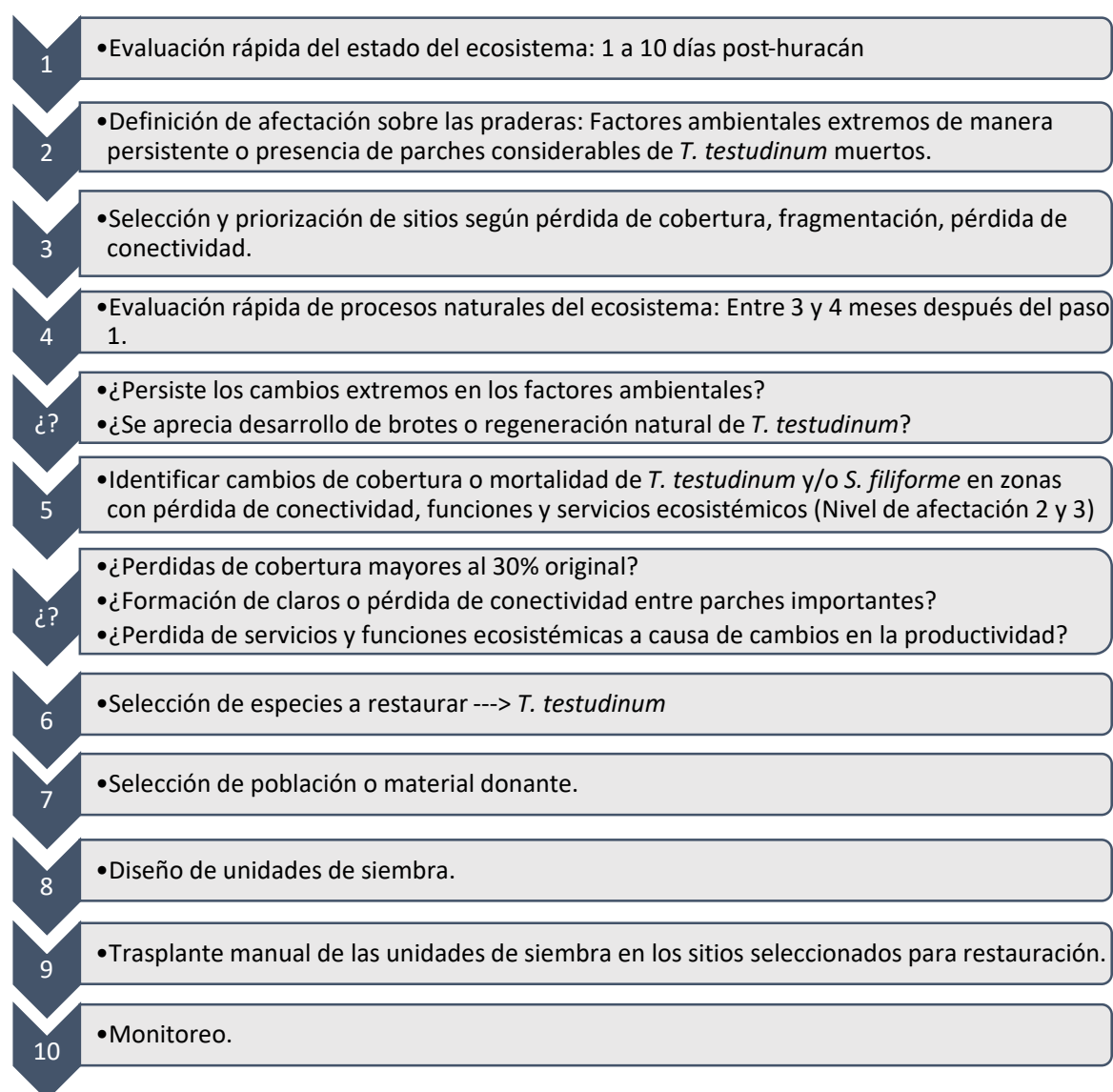


Figura 10. Pasos para la restauración en un escenario de mortalidad de pastos marinos a causa de condiciones y factores ambientales extremos. Las preguntas son puntos de control y

retroalimentación, a partir de los cuales se define si es rentable o necesario continuar con la implementación de un protocolo de restauración.

3.6. Criterio de selección de sitios a priorizar en la atención.

Partiendo de la importancia de los ecosistemas de pastos marinos, su distribución restringida a las zonas someras dentro del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina y sumado a que toda su cobertura en el archipiélago está resguardada bajo alguna figura de protección, toda el área que comprende a este ecosistema se debería considerar prioritario al momento de atención frente a un huracán o cualquier otro tipo de disturbio. No obstante, se muestran algunos criterios que igualmente podrían tener cierto peso al momento de priorizar la atención:

- Las praderas que por su mayor estructura y composición presenten prioridad desde la pérdida de funciones y servicios ecosistémicos. Por ejemplo, pérdida o disminución en la capacidad pesquera o la estabilización de los sedimentos. En este caso se tiene que evaluar tanto desde una perspectiva ecológica como económica.
- Cuando una zona específica presente una pérdida considerable de cobertura (Se puede considerar desde pérdidas de 100m²).
- Praderas de pastos marinos que se encuentren protegidas por barreras coralinas de menor extensión o menos complejas a nivel estructural, ya que las barreras coralinas son la primera línea de defensa de los pastos marinos ante fuertes oleajes o corrientes.
- Las praderas de Providencia que presentan composiciones mixtas de *T. testudinum* y *S. filiforme*, por su exclusividad dentro del archipiélago siendo la que presenta mayor complejidad estructural.
- Zonas que se encuentran en barlovento cuando el huracán pasa en sentido contrario a las barreras coralinas
- Pérdida de conectividad, creación de corredores biológicos
- Identificar zonas protegidas del oleaje aumentaría éxitos en restauración y puede ser el factor clave para la supervivencia de los pastos sembrados.
- Las praderas de las islas-cayos Albuquerque y las islas-cayos Bolívar, que han sido menos estudiadas si se cuenta con información sobre alguna posible función como islas y reservorios genéticos respecto a San Andrés y Providencia.

4. Métodos de evaluación ambiental rápida de estado pre, y de daños post-huracán.

El desarrollo e implementación de metodologías para la evaluación rápida de los ecosistemas permite conocer el estado de éstos a través del tiempo, medir el nivel de daños o afectación sufrida tras un disturbio e identificar necesidades que ayuden a orientar posibles líneas de acción para la restauración y recuperación ambiental post-desastre. Para esto hay que tener en cuenta ciertos elementos que permitirán priorizar en los sitios de evaluación de daños tanto pre- como post-huracán, por ejemplo, el tiempo de respuesta, la seguridad en el mar, el énfasis en las praderas más complejas, densas o extensas, presencia de especies raras o en peligro de extinción, mayor préstamo de servicios como captura de CO₂ (Hernández-Delgado, datos no publicados).

A nivel de daños, tanto en el Archipiélago como en otras zonas del caribe y el mundo, se suelen evaluar los daños post-huracán tanto cuantitativa (Sierra-Rozo *et al.*, 2012; Dorado-Roncancio *et al.*, datos no publicados) como cualitativamente (Rodríguez-Rámirez y Reyes-Nivia, 2008). A nivel cualitativo se hace un viaje de reconocimiento de impactos y se realiza una descripción general del estado del ecosistema de pastos respecto a enterramiento, arrancamiento y formación de claros o volcanes, exposición de partes subterráneas de pastos, presencia de fragmentos de coral rotos o desprendidos por el huracán, estimaciones de pérdida de biomasa y cobertura. Este enfoque a nivel cualitativo permite abarcar una mayor área respecto al método cuantitativo. Por su parte, mediante métodos cuantitativos se puede tener una estimación más precisa y con la cual se pueden realizar comparaciones tanto a nivel local como regional. Para esto se utilizan diferentes técnicas en campo para medir las variables que permitirán evaluar el nivel de daños. De igual forma, el uso de imágenes de alta resolución y herramientas SIG permite estimar de manera precisa los cambios en la cobertura tras el paso de un huracán al comparar imágenes históricas con las obtenidas días después del evento climático extremo.

La evaluación ambiental y del estado del ecosistema se puede desarrollar a partir de las metodologías propuestas por CARICOMP en el manual de métodos de mapeo y seguimiento de parámetros físicos y biológicos en la zona costera del caribe. Estos métodos son sencillos y se pueden desarrollar de manera sistemática, lo que permite comparar resultados a nivel local y regional y de esta forma desarrollar una imagen regional real de la ecología de las comunidades de pastos marinos del Caribe tropical. Así mismo, diferentes trabajos han buscado estandarizar metodologías para tener una mayor aproximación al estado de los ecosistemas de pastos marinos como Gómez-López *et al.* (2014), Short *et al.* (2015); Galeano y Gómez, (2015); Tanner *et al.* (2020)

4.1. Guía metodológica eficiente para evaluación de daños pre y post-huracán

A nivel general se plantea una metodología equivalente para la evaluación pre y post-huracán para poder tener la mayor información posible y poder compararla cuando sea necesario. La diferencia principal radica en que la evaluación previa va a estar enfocada en la anticipación de los hechos permitiendo una mejor toma de decisiones, mientras que la

evaluación posterior se va a ver enfocada en la decisión respecto a la evaluación de los daños y la posible implementación de acciones y protocolos de restauración. Por ejemplo, Hernández-Delgado, en el Simposio “Experiencias Internacionales en restauración de ecosistemas Marinos” en noviembre de 2021 recomienda realizar un plan de trabajo que se revise de manera anual antes de las temporadas de huracanes y tormentas tropicales con el fin de realizar ajustes a los diferentes protocolos para una mejor toma de decisiones, para lo cual sería necesario definir un equipo de trabajo permanente o un comité que se reúna para desarrollar estas actividades de manera periódica.

4.1.1. Selección de sitios

Idealmente la selección de sitios será principalmente en las zonas donde de manera visual los pastos marinos tengan la comunidad de *Thalassia* más exuberante o mejor desarrollada con hojas verdes limpias. Este sitio es el más simple de seleccionar y será indicativo del máximo que el área es capaz de producir. De ser posible, se seleccionará un segundo sitio representativo que tenga una comunidad de *Thalassia* promedio respecto a la pradera en general y un tercer sitio de comunidades representativas mixtas de *Thalassia* y *Syringodium*. Por cada sitio se seleccionarán por lo menos dos estaciones más para el análisis estadístico, las cuales deben estar separadas por al menos diez metros, pero pueden ser distancias mayores y deben ser visualmente equivalentes (CARICOMP, 2001).

En el caso del archipiélago ya se cuenta con algunas estaciones de muestreo o localidades que han sido evaluadas en trabajos previos, a partir de las cuales se puede tomar una referencia en cuanto a la selección de sitios al momento de una evaluación del estado del ecosistema de pastos marinos. De igual forma, la metodología planteada por Short *et al.* (2015) referente al *SeagrassNet Monitoring Manual* (Red Global de Monitoreo de Pastos Marinos) puede ser consultada para adaptarla a las necesidades de la evaluación pre y post-huracán.

4.1.2. Periodicidad

Según CARICOMP (2001), en la región Caribe se deberían recolectar datos correspondientes a la evaluación del ecosistema dos veces al año con el fin de tener información de la máxima y mínima productividad, basados en la duración del día. Tomando así las muestras en los horarios de máxima y mínima duración del día, que ocurren a finales de diciembre e inicios de enero y finales de junio e inicios de julio respectivamente. Si bien es deseable un muestreo más frecuente, el procesamiento de estas muestras requiere un gran esfuerzo de personal y económico. Además, en caso de no contar con una base suficiente de recursos, lo ideal sería realizar un muestreo al año en la época de máxima productividad, así los análisis al comparar el estado del ecosistema en su máximo de productividad con el paso de un huracán o una tormenta tropical muy fuerte serían de una u otra forma más contrastantes.

4.1.3. Principales metodologías

Respecto al estado de los ecosistemas de pastos marinos se encuentran diferentes metodologías para evaluar el estado de las praderas:

4.1.4. Biomasa de la comunidad de pastos marinos

El cultivo en pie o la biomasa aérea se compone de todo el brote corto, el cual está conformado por las hojas verdes y no verdes y la vaina del haz. Las hojas que se van a medir deben ser verdes principalmente, y deben estar libres de epífitos. La biomasa total comprende el cultivo en pie y las partes subterráneas no fotosintéticas de las plantas (CARICOMP, 2001). De igual forma, la toma de las muestras por este método también permitirá determinar la composición de la comunidad de pastos marinos.

Por medio del nucleador o corazonador se extrae la biomasa de *T. testudinum*, procurando sacar la totalidad de la biomasa o por lo menos un 90%; se recomienda que el núcleo obtenido se mantenga lo más intacto procurando perder la menor cantidad de biomasa, registrar la longitud del núcleo obtenido y que tenga una zona en la parte inferior de 5-10 cm sin raíces (Esto servirá como guía en el futuro sobre la profundidad a la que se deben tomar los núcleos posteriores). El transporte de los núcleos se puede hacer en las bolsas ziploc.

En el laboratorio, el material vegetal se separa en (i) hojas verdes, (ii) hojas muertas y (iii) rizomas de *T. testudinum*, se separa la biomasa de *S. filiforme* y de macroalgas. Esto se puede hacer en bandejas con agua de mar de unos 10 cm de profundidad que ayuda enormemente a clasificar los fragmentos finos, ya que las raíces vivas y los rizomas tienden a flotar, mientras que las muertas tienden a hundirse, haciendo más fácil descartarlas. El material vegetal se debe lavar con agua destilada para remover la sal, aunque en casos de epifitismo excesivo se recomienda hacer antes un lavado con ácido fosfórico o clorhídrico al 10%. El lavado debe procurar eliminar la totalidad de los sedimentos del material vegetal.

Si las muestras limpias no pueden ser procesadas inmediatamente, se pueden conservar refrigeradas después de ser lavadas

Posteriormente se seca cada una de las fracciones con papel absorbente y se ponen en un horno secador a 60°C hasta obtener peso seco constante. El material se debe dejar enfriar para ser pesado con una balanza analítica. Una vez obtenido el peso de las fracciones se procederá a analizar los valores.

Los resultados se expresan como:

- Biomasa total (Peso seco en g/m²)
- Biomasa foliar (peso seco en g/m²)

4.1.5. Densidad de vástagos

Se va a obtener de la misma forma que Gómez-López *et al.* (2014), adaptado a los transectos o parcelas seleccionadas para la evaluación de daños pre y post-huracán. Para esto se

tomarán cuadrantes de PVC de 25 cm x 25 cm en la línea del transecto y se contará la totalidad del número de haces de *T. testudinum* dentro del cuadrante. En los casos en donde se encuentran praderas mixtas con la presencia de especies como *S. filiforme*, se realizará el conteo de vástagos usando un cuadrante de 12.5 cm x 12.5 cm.

Los resultados se expresan como: Total de vástagos por m² (Número de vástagos/m²)

4.1.6. Densidad de brotes

Esta medición es importante realizarla en las evaluaciones previas para tener una referencia, ya que en una eventual evaluación post-huracán, servirá de indicador en cuanto al estado de salud y productividad de *T. testudinum*, sirviendo como **potencial indicador** de que es necesario desarrollar planes de restauración.

Para la mayoría de los pastos marinos, la densidad de brotes se determina a partir de la toma de núcleos de biomasa en campo, los cuales se analizan posteriormente en el laboratorio lavando completamente los sedimentos y contando el número de meristemas foliares dentro de la muestra central. Es necesario registrar el tamaño de la muestra en cuanto al área total del núcleo de biomasa tomado en campo.

Los resultados se expresarán como: Total de brotes por m² (Número de brotes/m²)

4.1.7. Índice de Área foliar y altura del dosel

Realizar mediciones periódicas de la altura del dosel de las praderas permitirá estimar en un monitoreo post-huracán daños por ruptura o desprendimiento de las partes aéreas de los pastos. Para esto con ayuda de una regla, se medirá la altura o longitud de las hojas de la especie dominante en el cuadrante. Es necesario hacer esto seleccionando al azar un grupo de hojas dentro del cuadrante las cuales se deben extender para medir desde el sustrato hasta la punta de las hojas. En casos en que la densidad de pastos sea muy baja, se medirá la longitud de cinco brotes individuales de la especie dominante dentro del cuadrante y se calculará el promedio.

El área foliar es importante, ya que el área y el ancho de las hojas son indicadores probados de estrés en las comunidades de pastos marinos, siendo menores cuando las plantas están estresadas.

El área foliar se determina de hojas de *T. testudinum* que es la especie clímax en las praderas del archipiélago. Para esto, de la zona aledaña de los cuadrantes medidos en pruebas anteriores se colectan 5 brotes (mínimo 3) teniendo cuidado de no romper ni perder hojas y se transportan en una bolsa de plástico hasta el laboratorio. En el laboratorio se lava el material, las hojas del brote se cortan y se colocan en el orden en el que estaban para medir cada hoja. Según CARICOMP (2001) se debe medir (i) la longitud total de la hoja desde la base hasta la punta, (ii) el ancho de la hoja en la base, (iii) si la hoja mide más de 2 cm de largo, el ancho en el medio, (iv) si la hoja todavía tiene una punta redonda, tener en cuenta, (v) si hay abundante epifitismo, el largo desde la base de la hoja hasta la primera aparición

de epífitas en la hoja; si las epífitas cubren toda la hoja hasta la base, registre 0.0 para la distancia.

Los resultados se expresarán como:

- Altura del dosel (p.e. Altura *T. testudinum* = 56 cm en Estación 1)
- Área foliar (cm²/brote)

4.1.8. Cobertura y extensión

La cobertura será el principal indicador del estado y el cambio de las praderas dentro del archipiélago pre y post-huracán, evidenciando cambios por mortalidad o cambio de fase de las praderas al comparar los datos en el tiempo. Para esto será posible realizar diferentes metodologías, desde análisis rápidos de tipo cualitativo, hasta mediciones cuantitativas en campo y el uso de herramientas SIG. Cada una de ellas aportando mayor precisión a la información con una mayor resolución para la toma de datos respecto a la implementación de acciones de restauración.

Dentro de parcelas permanentes o por medio de la ayuda de personas de la comunidad o con la experiencia suficiente en el área afectada, es posible por medio de recorridos rápidos determinar pérdidas en cobertura de pastos en escenarios post-huracán en plazos muy cortos de tiempo, no obstante, el uso de fotografías y mediciones permitirá estimar de manera más precisa la pérdida de la cobertura de pastos.

Se podrá determinar con ayuda de cuadrantes de 50 cm x 50 cm o en su defecto con cuadrantes de 25 cm x 25 cm el porcentaje estimado de cada una de las especies de pastos presentes en una escala de 0-100%. Las macroalgas, esponjas y corales deben incluirse como parte de las estimaciones de cobertura porcentual. Esto permitirá ver cambios de fase o trayectorias sucesionales. La toma de fotografías permitirá un análisis más robusto y preciso, pero depende de mayor esfuerzo y tiempo de análisis. Para esto se puede usar una cámara fotográfica y el análisis se puede hacer a partir de lo mencionado en la guía fotográfica presentada por Short *et al.* (2008), o por medio de Software de análisis de imagen.

Esta verificación en campo se puede integrar con análisis de imágenes de teledetección y herramientas SIG. Mediante el uso de imágenes satelitales históricas con la verificación en campo se puede el porcentaje de cobertura de las especies de pastos marinos, grupos funcionales de algas, arena, escombros y otros componentes bentónicos. Aunque algunos estudios han reportado que el uso del análisis de imágenes en pastos marinos muy densos puede tener una precisión limitada la cual se deberá trabajar para evitar sesgos o errores en las estimaciones. Esto permitirá definir la extensión de los ecosistemas de pastos dentro del archipiélago de manera periódica georreferenciando los límites de la pradera donde la cobertura sea mayor al 5%. Este valor que es particular para cada área específica y deberá ser revisado con una periodicidad no mayor a 5 años como menciona Gómez-López *et al.* (2014).

Igualmente **se recomienda el uso de drones** para la evaluación de la cobertura en praderas someras.

Los resultados se expresarán como:

- Porcentaje promedio de cada especie por estación (p.e. 65 % *T. testudinum*; 22% *S. filiforme*)
- Mapas SIG de cobertura de pastos

4.1.9. Sedimentos

Evaluar los sedimentos aporta un panorama a nivel de estructura y composición de la matriz sobre la que se están desarrollando las praderas de pastos marinos. Por medio de este tipo de análisis se puede describir la composición de los sedimentos, el tamaño de las partículas que lo conforman y las fracciones de cada una. Adicionalmente, permite describir la composición en cuanto a contenido de carbono y macronutrientes como N y P, en diferentes formas como nitratos, nitritos, amonio y fosfatos, aportando un panorama general del ciclaje de nutrientes y el secuestro de carbono de las praderas de pastos marinos cuando se desean analizar atributos y funciones del ecosistema.

En campo se puede realizar una evaluación rápida de los sedimentos superficiales en cada estación de muestreo por medio de la descripción del observador. En esta observación se definiría principalmente el tipo de sedimento y si presenta conchas o elementos mezclados de mayor tamaño de partícula.

Para el análisis cuantitativo en campo será necesario tomar muestras que se analizarán posteriormente en el laboratorio para obtener datos referentes a la granulometría y al contenido de materia orgánica sedimentaria (MO).

La granulometría y tipo de sedimentos se miden en cada estación sacando un núcleo con el corazonador de 6" de diámetro, suficientemente profundo para obtener la cantidad necesaria de sustrato. Este se guarda en una bolsa hermética y se transporta al laboratorio. Una vez en el laboratorio, se toman 100 g y se secan en un horno a 80°C. Luego, se agregan 5 mL de peróxido de hidrógeno y se colocan nuevamente en el horno a 60°C por 6 horas. Transcurrido el tiempo, se utiliza una batería de matices de diferentes aperturas para finalmente determinar el porcentaje de cada fracción para el total de cada una de las muestras.

El contenido de materia orgánica sedimentaria (MO) se puede obtener mediante la técnica de pérdida por ignición. Para esto, en campo se toman muestras del sedimento con un corazonador de 3.5 -5 cm de diámetro y 30 -50 cm de alto. Este se guarda en una bolsa hermética y se transporta al laboratorio. Una vez en el laboratorio, se secan las muestras en un horno a 80°C y tras estar secas se toman 5g para obtención de MO. Estos 5g se llevan a una mufla por 24 horas a 430-450°C para su posterior pesaje y análisis. El porcentaje de

materia orgánica corresponde al porcentaje de peso perdido después de pasar por el horno mufla.

Los resultados se expresarán como:

- Tamaño de las partículas presentes clasificadas según escala del sistema internacional
- Proporción de cada uno de los tamaños de partícula por estación
- Contenido de materia orgánica sedimentaria (% MO)

4.1.10. Fauna e infauna asociada a las praderas*

La fauna se puede medir a partir de la densidad de herbívoros, carnívoros y detritívoros/omnívoros presentes sobre el sustrato (epifauna) y la columna de agua, mediante recorridos de al menos 50 m en línea recta a lo largo de cada estación de muestreo, registrando el número de individuos de cada especie correspondiente a cada uno de estos grupos tróficos. De esta manera se contaría con censos de abundancia de todas las especies de peces en cada estación para contar con una línea base completa e identificar las especies correspondientes a cada grupo trófico de importancia para la pradera de pastos marinos. Estos censos, a su vez podrán servir en un futuro para desarrollar el ICT_{PM} que está siendo elaborado por Gómez-López *et al.* (2014) para el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

Al revisar la fauna presente también se podrán incluir registros sobre evidencia de pastoreo, por ejemplo, senderos de alimentación.

Por su parte la evaluación de la infauna se realiza mediante la extracción de núcleos de sedimento de 6" de diámetro en las estaciones de muestreo (según el caso se pueden usar nucleadores de menor diámetro). Estas pueden ser revisadas directamente en campo o llevarse al laboratorio para su análisis. Cabe resaltar que esta prueba no se puede demorar más de un día ya que diversos organismos que viven en los sedimentos son bastante frágiles afectando las muestras tomadas.

Los resultados para fauna como infauna se presentarían como: Número de individuos/estación

4.1.11. Físicoquímicos

Para medir la calidad del agua, se pueden medir datos a partir de sensores fijos desplegados en estaciones permanentes, o mediante la medición puntual en cada una de las estaciones al momento de realizar las otras metodologías. Lo ideal sería utilizar sondas multisensoriales que tomen datos de turbidez a partir de sólidos totales disueltos, fluorescencia de clorofila, temperatura, salinidad, pH y oxígeno disuelto y dispositivos de medición de la intensidad de luz.

Los resultados de los análisis se presentarán según el dispositivo utilizado para la medición y se consignarán en los formatos de campo y posteriormente en bases de datos para su análisis.

4.2. Ruta eficiente para evaluación del estado de pastos pre y post-huracán

Se propone un orden mediante el cual puede resultar más eficiente la toma de muestras en un caso de evaluación del estado pre o post- huracán (Figura 10). Cabe aclarar que esta ruta de acción está sujeta a modificación y adaptación según las experiencias desarrolladas con el tiempo y según el equipo de trabajo con el que se cuente al momento de desarrollar las actividades.

No obstante, se puede realizar una evaluación de carácter cualitativo por medio de recorridos visuales por las zonas afectadas por el huracán en el caso post-huracán.

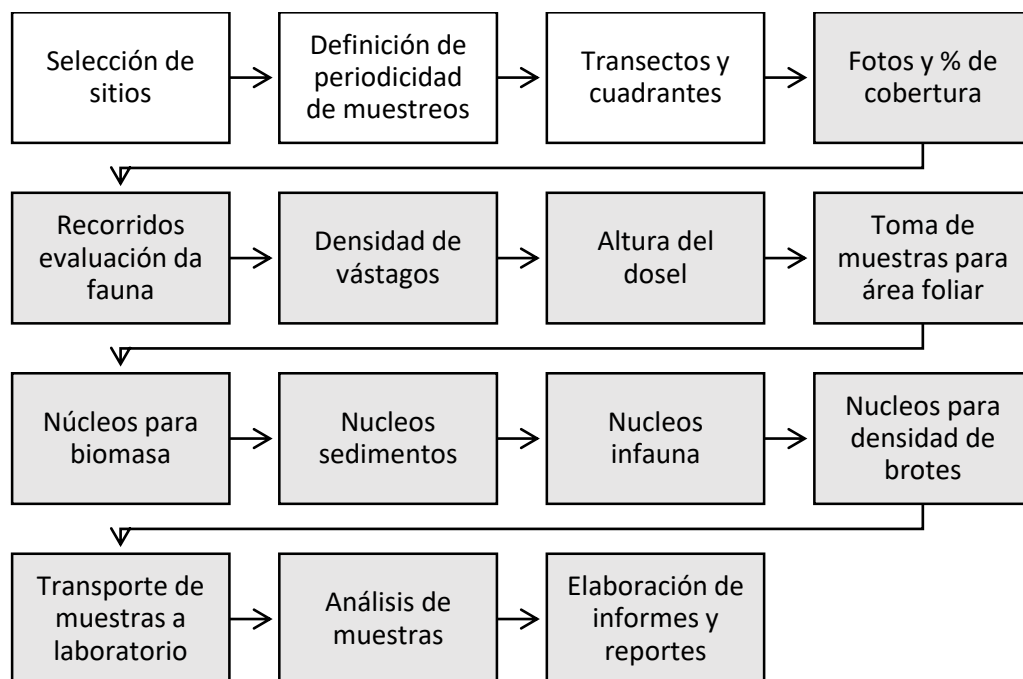


Figura 11. Ruta eficiente de evaluación cuantitativa del estado de los ecosistemas de pastos marinos pre y post-huracán. Los análisis de los factores físico químicos se pueden evaluar en cualquier momento a lo largo del muestreo. Los cuadros grises representan metodologías a trabajar por transecto con el fin de no confundir muestras, etiquetas y optimizar el trabajo en cuanto a desplazamiento.

5. Métodos clave de monitoreo

Desarrollar e implementar planes de monitoreo periódicos para documentar el progreso, los desafíos, el efecto de las medidas implementadas y el grado máximo de éxito de la restauración es un componente esencial de cualquier proyecto de restauración de pastos marinos (Fonseca *et al.*, 1998; Vargas, 2007; UNEP, 2020). Y no solo en el caso de la

implementación de planes de restauración, pues establecer planes de monitoreo sistemáticos para la evaluación del estado del ecosistema más allá de si se ha implementado o no un plan de restauración, permite tener una idea temporal del ecosistema a nivel local aumentando el conocimiento sobre este y facilitando la implementación de planes de manejo a corto y largo plazo.

En algunos casos, las labores de monitoreo pueden representar costos económicos elevados, pero son indispensables para garantizar la efectividad de los proyectos realizados, ya que, si no se hace un seguimiento de los procesos, estos quedan inconclusos o no se puede entender al final del tiempo de trabajo cómo se dieron los procesos y cambios que llevaron del punto inicial al punto final, es decir, si los resultados son debido a las intervenciones de restauración o si se dieron de manera naturales. De igual forma, los monitoreos son piezas claves en el proceso de retroalimentación a partir del cual se modifican y corrigen los protocolos o las metodologías implementadas tanto para el proceso que se está llevando a cabo como para planes de restauración futuros, al igual que permiten definir criterios de éxito por medio de los cuales evaluar si se dio cumplimiento o no de los diferentes objetivos de restauración. Estos criterios dependen de los objetivos y pueden ser tan simples como la extensión del área restaurada (en hectáreas) o el porcentaje deseado de cobertura del fondo marino (% de cobertura o densidad de brotes) de la vegetación y su persistencia en el tiempo o algo más complejos como medidas e indicadores de atributos funcionales asociados al ecosistema restaurado (Fonseca *et al.*, 1998; UNEP, 2020).

Diferentes estudios proponen que los programas de monitoreo de restauración de pastos marinos se ejecutan mejor por una duración de al menos cinco años con más de un monitoreo al año para así tener en cuenta factores como mareas, la estacionalidad del clima y los máximos y mínimos de productividad de las praderas. No obstante, cuando el monitoreo solo se puede hacer una vez al año, es mejor seleccionar la época del año en que los pastos marinos están en el pico de su crecimiento y desarrollo.

Para un monitoreo exitoso se deben seleccionar indicadores de seguimiento y éxito adecuados. Vargas en 2007 menciona algunos criterios que deben cumplir estos indicadores como ser definibles claramente, ser fácilmente medibles e interpretables, ser útiles para múltiples análisis, **no tener carácter destructivo**, brindar el máximo de información por unidad de área, proveer información con respecto al incremento en las características deseables y la reducción de las no deseables. De igual forma, dado que la restauración completa del ecosistema implica la recuperación tanto de la estructura como de la función del mismo, se recomienda elegir indicadores que permitan realizar inferencias respecto a estos dos aspectos.

Es importante tener en cuenta que para un mejor entendimiento del monitoreo a la restauración es indispensable contar con una parcela de control, en la que no se haya presentado afectación alguna a raíz del paso del huracán, y a partir de la cual, se midan las

mismas variables de monitoreo para comparar los efectos de las acciones de restauración sobre las áreas afectadas. A partir de lo anterior, un monitoreo de restauración de ecosistemas de pastos marinos debería proponer los siguientes Indicadores de seguimiento y éxito enlistados según orden de importancia para el análisis:

- Supervivencia de unidades de siembra trasplantadas (Número de esquejes vivos/m², representados por los que tienen al menos un brote).
- Densidad de vástagos y porcentaje de cobertura. (estimados en cantidad/ m²)
- Fotografía / video.
- Cobertura: Verificaciones de cobertura y extensión.
- Altura del dosel.
- Área foliar.
- Fisicoquímicos.
- Granulometría.
- Fauna.
- Infauna.
- Tasa de crecimiento (Únicamente a partir del primer año de siembra para no inducir estrés). (Mancini *et al.*, 2021)
- Biomasa. *
- Densidad de brotes. *
- Funciones del ecosistema. * (Tanner *et al.*, 2020)

*Se refiere a los monitoreos a largo plazo ya que hacer este tipo de monitoreos que implican extracción de material serían contraproducentes con el proceso de restauración.

Se deben presentar Informes de seguimiento con fechas, horas y ubicaciones geográficas (GPS) de las actividades de monitoreo, observaciones sobre el estado del mar y la marea en el momento del seguimiento, datos y observaciones sobre variables ambientales y meteorológicas para el período de seguimiento, datos cuantitativos sobre los atributos medidos o indicadores de seguimiento para cada parcela / sitio de trasplante y la interpretación detallada de los datos, respaldada por análisis estadístico (según corresponda).

6. Protocolo ejecutivo y procedimientos de evaluación, respuesta y restauración para el caso del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina

6.1. Consideraciones generales para acciones de restauración

- Asistencia a la regeneración natural: Se realiza cuando el ecosistema por sus propios medios tarda mucho tiempo en retornar a las condiciones del ecosistema de referencia. En este caso es necesario desarrollar o implementar acciones que faciliten o ayuden al ecosistema a regenerarse o recuperar su trayectoria sucesional. En el caso de los pastos marinos dominados por *Thalassia*, se sabe que la recuperación de las praderas luego de un disturbio puede ser mayor a décadas, y en casos en los que no se realizan acciones de restauración, estas afectaciones pueden generar mayores consecuencias o pérdidas de cobertura por la pérdida de funciones y servicios.
- Asegurar una línea base robusta: Para cualquier proceso de restauración es de suma importancia el conocimiento de lo que se quiere restaurar, su historia y sus dinámicas a través del tiempo. Para esto, la implementación de monitoreos sistematizados y de planes de acción anuales serán la mejor forma de enriquecer la línea base y de asegurar una mayor cantidad de insumos y referencias para el momento en que se necesiten desarrollar acciones de restauración de ecosistemas de pastos marinos. De esta forma, al trabajar en la línea base e incluir a la comunidad local en el desarrollo y divulgación de este conocimiento permitirá a largo plazo aumentar las tasas de éxito de cualquier acción de restauración que se desee implementar.
- Asegurar que los tensores o los disturbios ya no persisten: Muchos casos de restauración de pastos marinos se han visto afectados a lo largo del mundo debido a que al momento de implementar acciones de restauración, no se tiene certeza sobre la persistencia de los diferentes tensores o disturbios, por lo que la supervivencia de los esquejes o las unidades de siembra se ven afectadas por las condiciones ambientales de las zonas seleccionadas para la restauración ya que no son favorables para las diferentes especies de pastos marinos.
- Principales razones que dañan el procesos de restauración: No solo los disturbios o los tensores de manera persistente pueden representar un proceso de restauración fallido, la falta de implementación de monitoreos constantes, el plantear buenos objetivos de restauración y que sean realistas, junto con ser conscientes de los recursos y los tiempos que se tienen para cualquier proceso de restauración, son de suma importancia para que cualquier acción tenga realmente éxito en el tiempo. De igual forma, al final de este documento se encuentra una Caja (Caja 4) en la que se enlistan las principales recomendaciones para que la restauración sea efectiva, basada en diferentes protocolos y guías de restauración de pastos marinos a lo largo de todo el mundo.

6.2. Procedimientos preparación pre-huracán

La preparación pre-huracán consta de varios elementos fundamentales para estar listos ante cualquier evento climático extremo que requiera de una respuesta inmediata para evaluación y manejo de los ecosistemas costeros como los ecosistemas de pastos marinos.

Inicialmente, la recopilación y el levantamiento de información base será clave para la implementación de acciones de respuesta y/o restauración. Esta se puede obtener a partir de información secundaria de carácter histórico, desarrollo de monitoreos sistematizados o implementación de acciones de investigación y reconocimiento.

Tabla 13. Principales aspectos a considerar respecto a la información base de ecosistemas de pastos marinos para el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

Caja 1. Información base

- Conocer la estructura y composición de los ecosistemas de referencia.
- Conocimiento del rol y las dinámicas de cada especie dentro del ecosistema (Especies pioneras, climáticas, invasoras, facilitadoras).
- Conocimiento de hidrología, geomorfología y sedimentos a nivel local, con énfasis en condiciones hidrodinámicas como altura e intensidad de las olas.
- Funciones y servicios prestados por los ecosistemas de pastos marinos a nivel local.
- Conocimiento de la fenología de las especies de pastos en el archipiélago.
- Conocimiento de las semillas, tasas de germinación y métodos de germinación y cultivo.
- Definir poblaciones locales o aledañas de las especies de pastos que puedan servir como reservorios y donantes de material vegetal (brotes o plantas), frutos y semillas.

Es muy importante establecer estaciones permanentes de monitoreo que permitan trabajar de manera más directa con establecer la línea base correspondiente a ecosistemas de referencia. De igual forma permitirán comparaciones más directas y robustas en el tiempo o tras el paso de un huracán.

Un buen sitio monitoreo será:

- Una pradera típica, conformada por el ecosistema de referencia.
- Praderas que sean relativamente homogéneas.
- Praderas de fácil acceso para monitoreo y evaluación.
- Una pradera de pastos marinos que se aleja de cualquier gran impacto obvio.

De igual forma, para que las acciones a implementar sean efectivas, estas deberán ser realizadas y gestionadas por entidades que se encarguen de definir las rutas de acción, la selección de las entidades y el personal necesario y los planes logísticos. En este orden de ideas resolver las siguientes preguntas permitirá que la preparación y la posterior respuesta y restauración sean efectivos en el tiempo:

- ¿Qué entidades van a participar?
- ¿Quién va a administrar los recursos y cómo se van a mover éstos?
- ¿Quién va a conformar el equipo científico y técnico?
- ¿Quién va a realizar la interventoría a lo largo del proceso?
- ¿Qué actores locales van a participar y cómo se van a vincular?

La preparación ante eventos climatológicos extremos también se puede interpretar en el corto y en el largo plazo. Siendo en el corto plazo encaminada a acciones de monitoreo y evaluación rápida post-huracán, mientras que en el largo plazo se puede ver enfocada principalmente en tener más recursos e insumos para mejores respuestas o en acciones que impliquen aumentar la información de línea base como se muestra a continuación para el caso de los ecosistemas de pastos marinos. De igual forma, realizar un plan de trabajo que se revise de manera anual antes de las temporadas de huracanes y tormentas tropicales permitirá realizar ajustes a los diferentes protocolos para una mejor toma de decisiones.

Tabla 14. Preparación para los tipos de respuesta ante el paso de un huracán en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

Caja 2. Preparación para respuesta ante huracanes

- **Respuesta inmediata:**
 - a. Recopilación de información línea base → Selección equipo de trabajo → Logística de materiales, equipos, insumos → Selección de sitios → Evaluación del estado del ecosistema* → Definición de si implementar o no planes de restauración.
- **Respuesta a largo plazo:**
 - a. Monitoreo en puntos claves del archipiélago para fortalecer línea base → Incentivar la apropiación y la divulgación del conocimiento de pastos marinos en el archipiélago en la comunidad local, comunidad política, comunidad académica y escuelas → Formación de personal para la respuesta y restauración.
 - b. Desarrollo de planes y estrategias de implementación de cultivos y/o zonas de propagación de las especies de pastos marinos (material de siembra ante posibles escenarios de restauración para no afectar comunidades de pastos locales) → Incluir

- grupos científicos en los cultivos para el desarrollo de tecnologías (Cultivos in vitro) y grupos locales (conocimiento tradicional)
- c. Desarrollo de pruebas piloto de restauración → Por medio de parcelas experimentales en sitios afectados por actividades humanas, zonas donde se documente retroceso y pérdida de la pradera o zonas de transición a fondos de arena sin vegetación de pastos.
- d. Desarrollo de simulaciones de afectaciones por paso de huracanes o tormentas tropicales → Pruebas de enterramiento y pruebas de corrientes extremas con posible arrancamiento o defoliación.

La claridad en cuanto a recursos, equipos y materiales necesarios en la fase de preparación será fundamental para la implementación de cualquier acción de evaluación, restauración o monitoreo. En la siguiente tabla se enlistan y estiman los principales recursos necesarios en la fase de preparación (no se tienen en cuenta recursos necesarios para respuestas a largo plazo). En este caso, el rubro de transporte, personal y viáticos, se contemplan para una única salida de un día en la cual se realice la evaluación del estado del ecosistema. En caso de requerirse un valor aproximado para más días de trabajo en campo, el valor de Viáticos, personal (Biólogos acompañantes) y transportes se multiplicarán por los días que se requieran en campo para una mejor estimación de los costos totales.

Tabla 15. Presupuesto de los principales costos de la fase de preparación (Respuesta inmediata) pre huracán de pastos marinos en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Los valores se estiman con los costos a 2021. *El uso de laboratorios e instalaciones incluye el uso de balanza analítica de precisión, mufla, estufa u horno, los cuales no se consideran dentro de los costos de materiales. Los costos se estiman para un día completo de monitoreo en campo y un total de dos meses de análisis de muestras en laboratorios o instalaciones técnicas y mediante herramientas SIG. Estos no contemplan los gastos de personal administrativo del proyecto, sino la parte técnica y científica.

Ítem	Requisitos	Valor unitario (\$)	TOTAL (\$)
	Transporte		

Vía Terrestre de equipos, personal, muestras (Ida y vuelta)	2	20.000	40.000
Vía marítima (lancha) de equipos, personal, muestras (1 día de alquiler)	1	600.000	600.000
Subtotal			640.000

Materiales de campo			
Geoposicionador (GPS)	1	600.000	600.000
Cámara fotográfica	1	2`000.000	2`000.000
memoria SD 64 GB	1	100.000	100.000
Brújula	1	30.000	30.000
Equipos de buceo autónomo	1	200.000	600.000
(Alquiler por día; 3 personas)			
Sondas de parámetros Fisicoquímicos	1	3`000.000	3`000.000
Estacas	12	10.000	120.000
Mazos 2 kg	1	70.000	70.000
Boyas	12	40.000	480.000
Cuerda parafinada delgada x 20 m	3	25.000	75.000
Flexómetro de 50 m	2	35.000	70.000
Cuadrantes PVC 50 cm x 50 cm	3	115.000	345.000
Cuadrantes PVC 25 cm x 25 cm	3	75.000	225.000
Cuadrantes PVC 12.5 cm x 12.5 cm	3	25.000	75.000
Tablas acrílicas	3	15.000	45.000
Lápices caja	1	10.000	10.000
Formatos de campo	20	1.000	20.000

Corazonador 6" x 28"	3	75.000	225.000
Mango 2" x 50 cm (Para biomasa)			
Corazonador	3	30.000	90.000
5cm x 30cm (Para sedimentos)			
Bolsas herméticas 3 kg Paquete	1	35.000	35.000
Bolsas herméticas 1 kg Paquete	1	22.000	22.000
Neveras de poliestireno	3	35.000	105.000
Juego de Tamices Standard testing (Kit 6 piezas)	1	1'300.000	1'300.000
Bandejas plásticas	3	10.000	30.000
Bandejas plasticas 8 Litros	3	12.000	36.000
Coladores	3	8.000	24.000
Tijeras	2	8.000	16.000
Cuchillas caja	1	8.000	8.000
Reglas	6	3.000	18.000
Papel aluminio	1	6.000	6.000
Cinta	2	5.000	10.000
Etiquetas adhesivas 1 rollo	1	30.000	30.000
Licencias de Software SIG	1	40.000	40.000
Ácido clorhídrico o fosfórico (10% v / v; 10% ácido concentrado + 90% agua)	1	50.000	50.000
Subtotal			9'910.000

Personal			
Investigador principal (pago por mes; 2 meses)	1	3'000.000	6'000.000
Biólogos acompañantes (1 día campo)	2	120.000	240.000
Profesional en herramientas SIG y modelación (Pago por mes; 2 meses)	1	3'000.000	6'000.000
Asistentes trabajo de campo (Comunidad local) (1 día campo)	2	80.000	160.000
Subtotal			12'400.000
Viáticos			
Alimentación jornada de campo (5 personas)	5	20.000	100.000
Subtotal			100.000
Uso laboratorios, instalaciones *			
Uso laboratorio institución académica o instituto de investigación 6 meses	1	4'000.000	4'000.000
Espacio para almacenamiento equipos y materiales 1 año	1	2'400.000	2'400.000
Subtotal			6'400.000
Imprevistos (10%)			
Imprevistos	1		2'945.000
VALOR TOTAL			32'395.000

6.3. Procedimiento de evaluación de daños

La evaluación de los daños en los ecosistemas de pastos marinos post-huracán, permitirá determinar si es posible o necesario implementar acciones y protocolos de restauración.

La selección de los sitios es fundamental para una buena toma de decisiones, para lo cual se propone analizar los aspectos mencionados en la selección de sitios para monitoreo, sumado a lo siguiente:

- Sitios de mayor vulnerabilidad ante el paso de huracanes según modelos y simulaciones de altura de olas y velocidad de la corriente.
- Praderas que por trabajos previos se encuentren en zonas de mayor exposición a las olas y mayores velocidades de corriente.
- Praderas que tengan la comunidad de *Thalassia* más exuberante o mejor desarrollada con hojas verdes limpias. (Indicativo del máximo de productividad)
- Praderas mixtas de *Thalassia* y *Syringodium* representativas del ecosistema.
- Sitios trabajados previamente (Estaciones de muestreo).

Se deben seleccionar al menos tres sitios y por cada sitio se seleccionarán por lo menos dos puntos más para la replicación estadística, las cuales deben estar separadas por al menos diez metros, aunque pueden ser distancias mayores y deben ser visualmente equivalentes. Además, es de suma importancia considerar diferentes profundidades dentro de la selección de los puntos, tratando de abarcar una zona somera, una de profundidad media y una de profundidad alta.

Las principales metodologías que se deben desarrollar al momento de evaluar los daños en los ecosistemas de pastos en el archipiélago tras el paso de un huracán o una tormenta tropical deben ser fácilmente replicables y sencillos de realizar. Por lo tanto, basados en los 3 paquetes metodológicos: ICT_{PM}, CARICOMP y SeagrassNeT, se proponen las siguientes metodologías para implementar en un contexto de afectación por huracán:

Tabla 16. Metodologías para implementar en un contexto de afectación por huracán en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

Caja 3. Metodologías de evaluación del estado del ecosistema

- | | |
|------------------------|-------------------------------|
| • % de cobertura | • Biomasa total y aérea |
| • Fauna | • Granulometría de sedimentos |
| • Densidad de vástagos | • %MO de sedimentos |
| • Altura del dosel | • Infauna |
| • Área foliar | • Densidad de brotes |

6.3.1. Escenarios y niveles de afectación de pastos marinos tras la evaluación de daños

Según el escenario que se presente después de un evento climático extremo será necesario tomar diferentes rutas de acción para la restauración de los ecosistemas de pastos marinos según sea el caso, para optimizar y mejorar los resultados. A continuación, se muestran los principales escenarios y niveles de afectación que puede presentar un ecosistema de pastos

Escenarios de afectación

A: Enterramiento

B: Erosión

C: Pérdida de cobertura

Escenarios según zona afectada y categoría y duración del huracán

marinos tras el paso de un huracán, además de la respuesta a la restauración correspondiente.

Nivel de afectación 1

- A: < 5 cm o < 3/4 spp. menor porte
- B: < 15% exposición partes subterráneas y/o pérdida de Thalassia
- C: < 15% pérdida de Thalassia
- No se requieren acciones.

Nivel de afectación 2

- A: 5 cm – 15 cm o 3/4 spp. menor porte
- B: 15 - 30% exposición partes subterráneas y/o pérdida de Thalassia
- C: 15 - 30% pérdida de Thalassia y fragmentación y pérdida de conectividad baja a media
- 3 meses tras el huracán se evalúa si se requieren acciones de restauración.

Nivel de afectación 3

- A: ≥ 15 cm o 3/4 spp. mayor porte
 - B: $\geq 30\%$ exposición partes subterráneas y/o pérdida de *Thalassia*; pérdida de sedimentos finos
 - C: $\geq 30\%$ pérdida de *Thalassia* y fragmentación y pérdida de conectividad media a alta
- 3 meses tras el huracán se deben tomar acciones de restauración.

Figura 12. Niveles de afectación para los distintos escenarios de afectación de los ecosistemas de pastos marinos tras el paso de un huracán. Los porcentajes de pérdida o afectación de *Thalassia* se consideran a nivel de cuadrantes (muestreo) y no como el porcentaje de cobertura total dentro del archipiélago.

6.4. Procedimiento de respuesta a la restauración

La respuesta ante cualquier evento climático extremo va a contemplar la implementación de acciones de restauración, las cuales se pueden desarrollar a corto, mediano o largo plazo y que sean beneficiosas después de un análisis de rentabilidad.

En el corto plazo, las acciones estarán encaminadas a una restauración primaria y se enfocarán principalmente en definir el protocolo necesario para restaurar los ecosistemas de pastos marinos según tipo el tipo de afectación. De igual forma estas metodologías se verían enfocadas a recuperar inicialmente la cobertura y densidad de pastos marinos.

Los sitios a restaurar dependerán de los recursos disponibles, la accesibilidad y los resultados de la evaluación del estado del ecosistema post-huracán, buscando priorizar sitios con las siguientes características:

- Praderas que presenten mayor diversidad y estructura.
- Praderas con mayor contribución de funciones y servicios ecosistémicos.
- Zonas con una pérdida considerable de cobertura tras el huracán.
- Zonas que presenten pérdida de conectividad entre praderas.
- Pérdida de corredores biológicos.
- Zonas protegidas del oleaje.

De igual forma, cuando se decide implementar acciones de restauración activa tras el estudio del estado del ecosistema post-huracán, es importante realizar un análisis de rentabilidad en el cual determinar: (i) cuánto será el mínimo de unidades de siembra a trabajar, (ii) Cuál será el mínimo o el área ideal a restaurar (iii) Cual será el método de

siembra, y (iv) de dónde se obtendrá el material donante para implementar las acciones de restauración

El siguiente diagrama muestra los pasos que se deben tener en cuenta para cualquier proceso de restauración primaria (corto plazo) de pastos marinos ante un escenario de afectación por enterramiento por sedimentos, erosión (exposición de partes subterráneas y pérdida de sedimentos finos) o pérdida de cobertura por mortalidad a raíz de factores ambientales extremos dentro del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. En cuanto a los tres escenarios de afectación, las metodologías a seguir serán las mismas, ya que el objetivo principal de la restauración será recuperar la cobertura perdida por el disturbio. No obstante, en casos en que el primer punto de retroalimentación demuestre que los factores ambientales no son adecuados para la restauración, se podrá implementar una ruta alterna en la cual se desarrollen cultivos o zonas de propagación de pastos para poseer material donante suficiente para el momento en que se estabilicen los factores ambientales y permitan una restauración implementar los pasos de la restauración de manera eficiente.

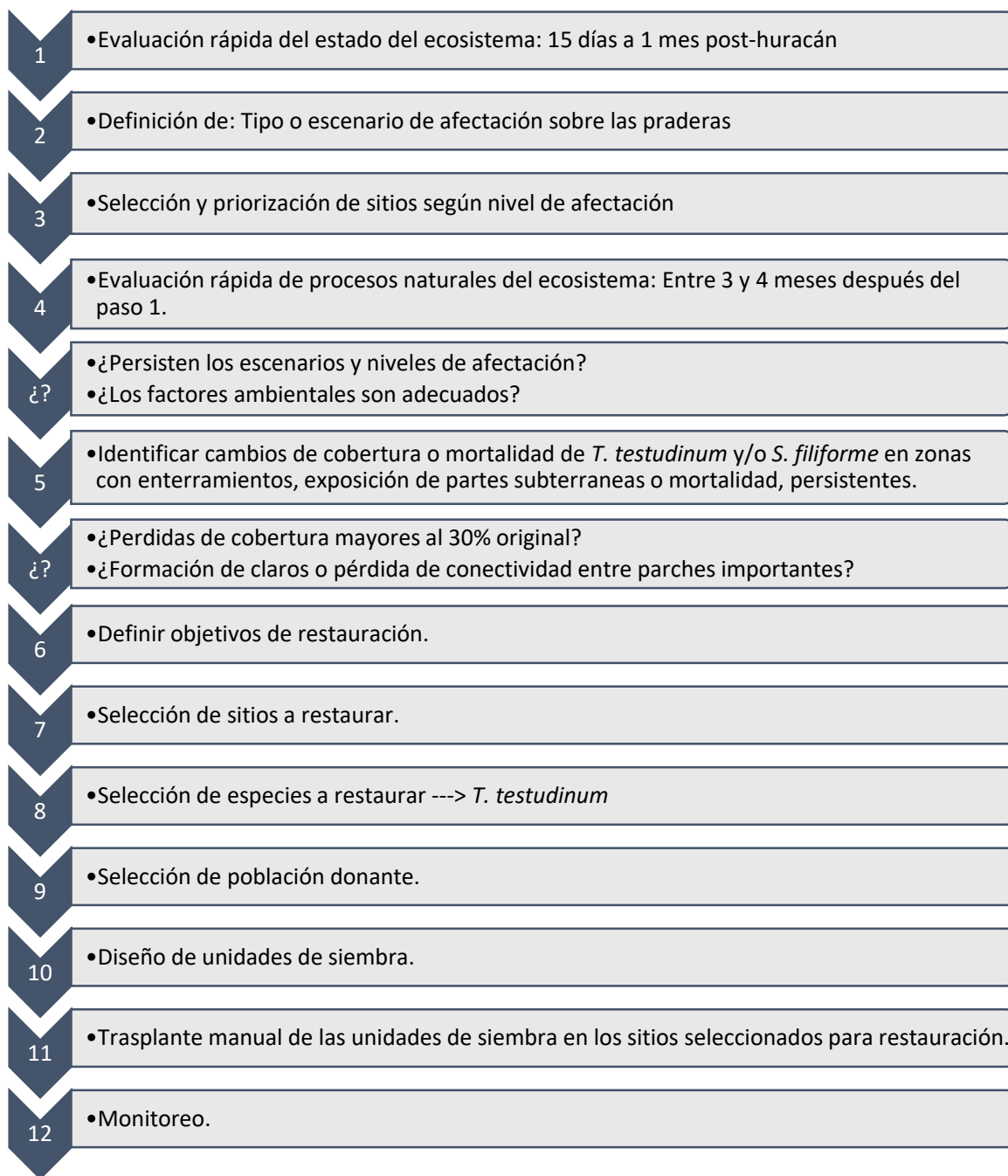


Figura 13. Pasos para la restauración a corto plazo de pastos marinos en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Las preguntas son puntos de control y retroalimentación, a partir de los cuales se define si es rentable o necesario continuar con la implementación del protocolo de restauración.

En el mediano y en el largo plazo, las acciones de restauración se verán enfocadas en el aumento de la extensión de los pastos marinos, la retroalimentación de los procesos de restauración implementados anteriormente y en algunos casos a la recuperación de

servicios y funciones de los ecosistemas de pastos marinos. Para esta última, se pueden desarrollar diferentes actividades como la asistencia al ecosistema, remoción de especies y/o adición de especies, las cuales se desarrollarán únicamente en casos de rentabilidad positiva y en los que se ha determinado que es necesario para el cumplimiento exitoso de los objetivos iniciales.

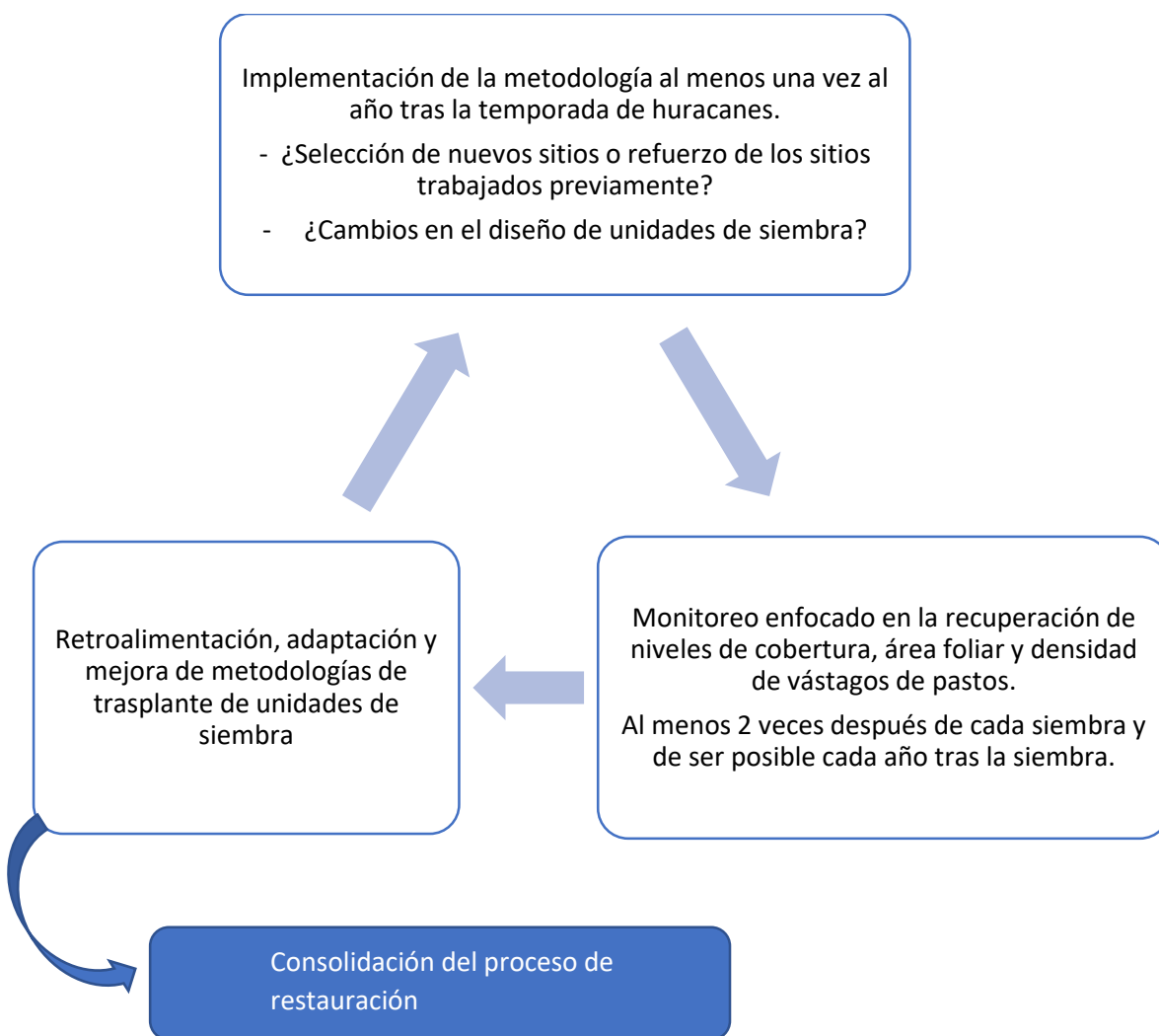


Figura 14. Pasos para la restauración secundaria (mediano y largo plazo) de pastos marinos en escenarios post-huracán y en los que el enfoque es básicamente restaurar biomasa y cobertura.

6.4.1. Diseño de unidades de siembra:

El diseño de las unidades de siembra es uno de los pasos más importantes de este protocolo, y de este depende el éxito de la restauración de pastos marinos. Es de suma importancia determinar el sistema de anclaje que se va a utilizar, y según el escenario, el nivel de

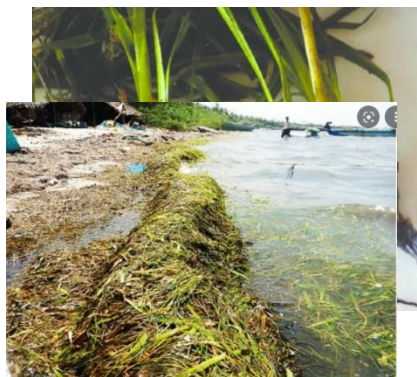
afectación y el material donante de esquejes, el tipo de unidad de siembra, ya sea un brote o un núcleo o tapón. No obstante, en la restauración primaria sería importante trabajar con diferentes tipos de unidades de siembra para determinar cual es la que mejor costo-beneficio trae y cual según el escenario y nivel de afectación brinda las mejores tasas de supervivencia de esquejes a lo largo del tiempo. Cabe resaltar que en el caso de los brotes o esquejes, se recomienda el uso de brotes plagiotropicos ya que suelen presentar mayor numero de brotes activos y por ende una mayor tasa de recuperación y supervivencia.

Brotes o esquejes

*Brote
ortotropico*



Brote plagiotropico



Fragmentos

Tapones o núcleos



Sistemas de anclaje

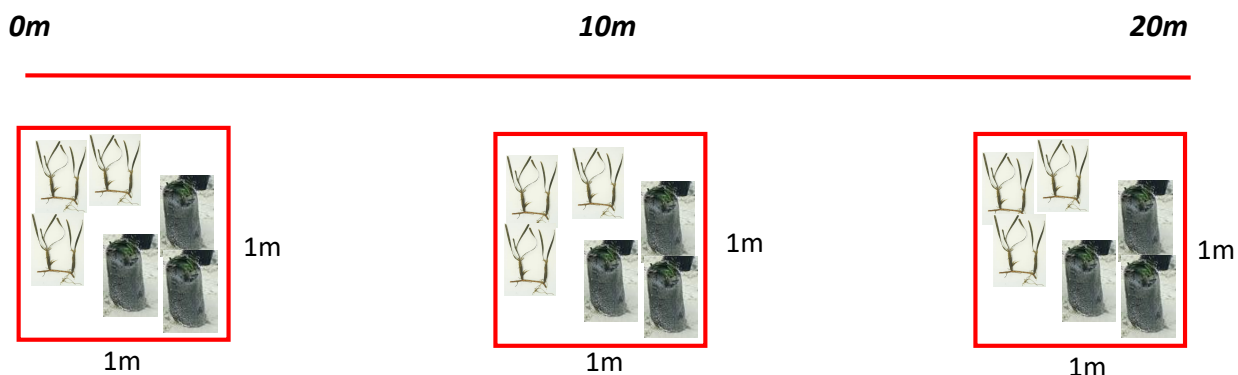


Figura 15. Tipos de material donante y de sistemas de anclaje para el desarrollo de las unidades de siembra usadas en la restauración de pastos marinos.

6.4.2. Diseño de metodología restauración

El diseño de la metodología constará de transectos que contemplen diferentes niveles de profundidad (pueden ser tres: somero, profundidad media y profundo; o cuatro: Dos someros y dos profundos) en los cuales se realizarán cuadrantes de 1 x 1 m en los cuales se sembrarán tres replicas por cuadrante y por unidad de siembra

(Baja profundidad: Hasta 7m)



(Mayor profundidad: A partir de 7m)

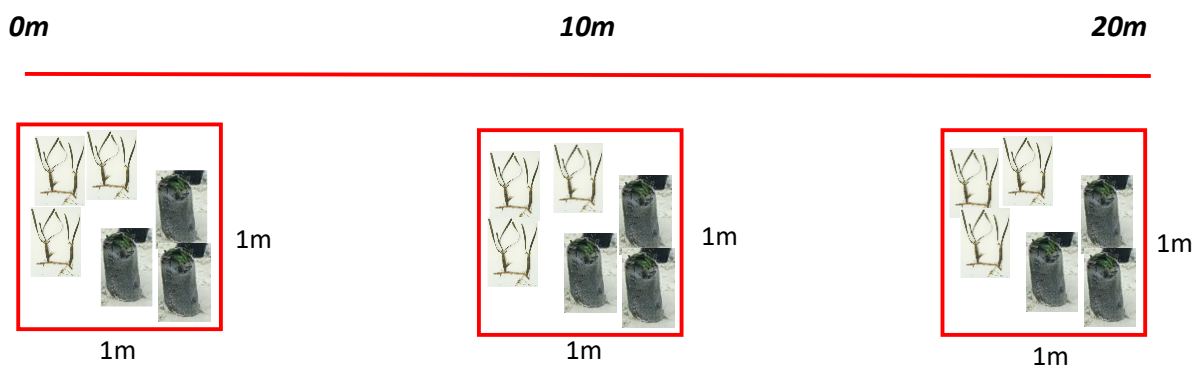


Figura 16. Ejemplo del diseño de los transectos para la implementación de metodologías de restauración de pastos marinos en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

Finalmente, al igual que en la etapa de preparación, la claridad en cuando a recursos, equipos y materiales necesarios en la fase de restauración será fundamental para el éxito de cualquier acción implementada en el corto, mediano y largo plazo, para que no se den casos en los que la implementación de acciones de restauración se vea detenida debido a falta de recursos o equipos.

En la siguiente tabla se enlistan y estiman los principales recursos, materiales y servicios necesarios en la fase de restauración, estimados para los protocolos de restauración primaria a lo largo de un año en el cual se implementen dos jornadas de acciones de restauración (cada jornada de siembra correspondiente a 3 días) y dos fechas de monitoreo tras la implementación (1 y 3 meses tras la siembra). Esto nos da en total 10 días en campo, los cuales se complementarán con el uso de instalaciones técnicas o laboratorios a lo largo de todo el año y de herramientas SIG. Cada jornada de siembra se espera que abarque por lo menos 3 puntos: haciendo 4 cuadrantes de siembra de 1 m² en 3 transectos para cada punto o 4 transectos con 3 cuadrantes de siembra de 1 m² (**área total de siembra por jornada = 36 m² Que equivale a 72 m² año si se hacen dos jornadas**).

Aunque el área total a restaurar es poca en cantidad, se estima como el mínimo de siembra en 3 días de campo, los cuales pueden ser mayormente aprovechados según la logística y el personal que trabaje y se vincule al proyecto, teniendo así en cuenta que una mayor participación local permitirá abarcar mayores áreas de restauración sin incrementar los costos ni los días de trabajo. Adicionalmente, este presupuesto se hace pensando en la fase de restauración primaria, que, en pastos marinos sin trabajos de restauración local previos, se convierte en una fase de restauración diagnostica, a partir de la cual se evalúan rendimientos y los mejores métodos, para a partir del segundo año obtener mayores resultados y abarcar mayores áreas de siembra. Por lo tanto, acciones que impliquen restauración secundaria o modificaciones en los días que contemplan las jornadas de siembra o de monitoreo estarán entonces sujetos a cambios principalmente en los rubros de transporte, personal y viáticos.

Tabla 17. Presupuesto de los principales costos de la fase de restauración primaria de pastos marinos en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Los valores se estiman con los costos a 2021. *El uso de laboratorios e instalaciones incluye el uso de balanza analítica de precisión, mufla, estufa u horno, los cuales no se consideran dentro de los costos de materiales. **Los costos se estiman para dos días completos de monitoreo en campo, 2 jornadas de siembra (6 días en campo) y un total de dos meses de análisis de muestras en laboratorios o instalaciones técnicas y mediante herramientas SIG. Estos no contemplan los gastos de personal administrativo del proyecto, sino la parte técnica y científica.**

Ítem	Requisitos	Valor unitario (\$)	TOTAL (\$)
Transporte			
Vía Terrestre de equipos, personal,	12	20.000	240.000

muestras para
implementación de
protocolos (ida y vuelta,
6 días)

Vía marítima (lancha) de equipos, personal, muestras para implementación de protocolos (6 días de alquiler)	6	600.000	3`600.000
Vía Terrestre de equipos, personal, muestras para monitoreos (ida y vuelta, 4 días)	8	20.000	160.000
Vía marítima (lancha) de equipos, personal, muestras para implementación de protocolos (4 días)	4	600.000	2`400.000
Subtotal			6`400.000

Materiales de campo

Geoposicionador (GPS)	1	600.000	600.000
Cámara fotográfica	1	2`000.000	2`000.000
memoria SD 64 GB	1	100.000	100.000
Brújula	1	30.000	30.000
Equipos de buceo autónomo	10	200.000	6`000.000
(Alquiler por día; 3 personas)			
Sondas de parámetros Fisicoquímicos	1	3`000.000	3`000.000
Estacas	12	10.000	120.000
Mazos 2 kg	1	70.000	70.000
Boyas	12	40.000	480.000
Cuerda parafinada delgada x 20 m	3	25.000	75.000
Flexómetro de 50 m	3	35.000	105.000

Cuadrantes PVC	3	115.000	345.000
50 cm x 50 cm			
Cuadrantes PVC	3	75.000	225.000
25 cm x 25 cm			
Cuadrantes PVC	3	25.000	75.000
12.5 cm x 12.5 cm			
Tablas acrílicas	3	15.000	45.000
Lápices caja	1	10.000	10.000
Formatos de campo	60	1.000	60.000
Corazonador 6" x 28"	3	75.000	225.000
Mango 2" x 50 cm (Para biomasa)			
Corazonador	3	30.000	90.000
5cm x 30cm (Para sedimentos)			
Bolsas herméticas 3 kg Paquete	1	35.000	35.000
Bolsas herméticas 1 kg Paquete	1	22.000	22.000
Neveras de poliestireno	3	35.000	105.000
Juego de Tamices Standard testing (Kit 6 piezas)	1	1'300.000	1'300.000
Bandejas plásticas	3	10.000	30.000
Bandejas plasticas 8 Litros	3	12.000	36.000
Coladores	3	8.000	24.000
Tijeras	6	8.000	48.000
Cuchillas caja	1	8.000	8.000
Reglas	6	3.000	18.000
Papel aluminio	1	6.000	6.000
Cinta	4	5.000	20.000

Etiquetas adhesivas	1	30.000	30.000
1 Rollo			
Licencias de Software SIG	1	40.000	40.000
Ácido clorhídrico o fosfórico	1	50.000	50.000
(10% v / v; 10% ácido concentrado + 90% agua)			
Pala o palustre	3	20.000	60.000
Ganchos plásticos	100	1.000	100.000
Rollo de pita	1	20.000	20.000
Bandejas o cantastillas	10	8.000	80.000
Subtotal			15`687.000

Personal			
Investigador principal (12 meses de trabajo)	1	3`000.000	36`000.000
2 biólogos acompañantes (10 días de campo)	2	120.000	2`400.000
Profesional en herramientas SIG y modelación (Pago por mes; 3 meses)	1	3`000.000	9`000.000
Asistentes trabajo de campo (Comunidad local) (6 día campo)	2	80.000	960.000
Asistente trabajo laboratorio (Pago por mes; 4 meses)	1	2`200.000	8`800.000
Subtotal			57`160.000

Viáticos			
Alimentación jornada de campo (5 personas; 10 días)	10	20.000	1`000.000

Subtotal			1`000.000
Uso laboratorios, instalaciones *			
Uso laboratorio institución académica o instituto de investigación 1 año	1	8`000.000	8`000.000
Espacio para almacenamiento equipos y materiales 1 año	1	2`400.000	2`400.000
Subtotal			10`400.000
Imprevistos (10%)			
Imprevistos	1		9`064.700
VALOR TOTAL			99`711.700

Métodos seguimiento y monitoreo de restauración

Desarrollar e implementar planes de monitoreo periódicos para documentar el progreso, los desafíos, el efecto de las medidas implementadas y el grado máximo de éxito de la restauración es un componente esencial de cualquier proyecto de restauración de pastos marinos.

Según Vargas en 2007, para un monitoreo exitoso se deben seleccionar indicadores de seguimiento y éxito adecuados que cumplan con ciertas características:

- Ser definibles claramente
- Ser fácilmente medibles e interpretables
- Ser útiles para múltiples análisis
- **No tener carácter destructivo**
- Brindar el máximo de información por unidad de área
- Proveer información con respecto al incremento en las características deseables y la reducción de las no deseables
- Indicadores que permitan hacer inferencias sobre la recuperación de la estructura y de la función del ecosistema.

A partir de lo anterior, un monitoreo de restauración de ecosistemas de pastos marinos debería proponer los siguientes Indicadores de seguimiento y éxito enlistados según orden de importancia para el análisis:

Tabla 18. Metodologías a implementar en los monitoreos de procesos de restauración de ecosistemas de pastos marinos en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. *Se refiere a los monitoreos a largo plazo (de carácter destructivo) ya que hacer este tipo de monitoreos que implican extracción de material serían contraproducentes con el proceso de restauración.

Caja 4. Metodologías de monitoreo de procesos de restauración

- | | |
|---|-------------------------------|
| • Supervivencia de unidades de siembra trasplantadas. | • Área foliar. |
| • Densidad de vástagos y porcentaje de cobertura. | • Fisicoquímicos. |
| • Fotografía / video. | • Granulometría. |
| • Cobertura: Verificaciones de cobertura y extensión. | • Fauna. |
| • Altura del dosel. | • Infauna. |
| | • Biomasa. * |
| | • Densidad de brotes. * |
| | • Funciones del ecosistema. * |

Se deben presentar Informes de seguimiento con fechas, horas y ubicaciones geográficas (GPS) de las actividades de monitoreo, observaciones sobre el estado del mar y la marea en el momento del seguimiento, datos y observaciones sobre variables ambientales y meteorológicas para el período de seguimiento, datos cuantitativos sobre los atributos medidos o indicadores de seguimiento para cada parcela / sitio de trasplante y la interpretación detallada de los datos, respaldada por análisis estadístico (según corresponda).

Tabla 19. Principales recomendaciones para una restauración efectiva. Tomado y modificado de UNEP, 2020.

Caja 5. Recomendaciones para una restauración efectiva

- | | |
|--|---|
| • Selección apropiada de sitios. | • Evitar sitios, temporadas o momentos con mala calidad del agua (turbidez, eutrofización, poca luz). |
| • La alta energía de las olas y la fuerza de las corrientes puede generar desarraigo de los trasplantes. | • Evitar zonas con registros de florecimientos algales. |

- Zonas con inestabilidad de sedimentos pueden causar erosión y entierro de plántulas.
- Desarrollo de anclajes adecuados de los trasplantes para evitar su desarraigo.
- No seleccionar zonas demasiado superficiales (afectación por desecación en bajamar) o demasiado profundas (luz insuficiente).
- No trabajar a escalas muy pequeñas.
- Evitar trabajar a escalas muy grandes sin la tecnología necesaria.
- Evitar sitios con altas tasas de epifitismo o enfermedades.
- Evitar sitios con bioturbación excesiva o presencia abundante de herbívoros.
- Procurar tener siempre material donante o reserva de semillas.
- Evitar zonas con alta actividad humana.
- Trabajar después de temporada de lluvias.
- No trabajar con poca planificación o con objetivos poco realistas.

7. Bibliografía

- Albis-Salas, M. , & Gavio, B. (2011). Notes on marine algae in the International Biosphere Reserve Seaflower, Caribbean Colombian I: new records of macroalgal epiphytes on the seagrass *Thalassia testudinum*. *Botánica Marina*, 54(6), 537-543.
- Albis-Salas, M.R.A., López, D.I.G., & Duque, G. (2010). Estructura de las praderas de *Thalassia testudinum* en un gradiente de profundidad en la Guajira, Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 92(2), 381-395.
- Amone-Mabuto, M., Bandeira, S., & da Silva, A. (2017). Long-term changes in seagrass coverage and potential links to climate-related factors: The case of Inhambane Bay, southern Mozambique. *Western Indian Ocean Journal of Marine Science*, 16(2), 13-25.
- Amórtegui Rodríguez, E. L., Polanía, J., & Campos, N. (2006). Variación espacial de la comunidad macroinfaunal de praderas de pastos marinos de San Andrés Isla, Caribe colombiano. *Acta Biológica Colombiana*, 11(1), 145.
- Ángel, I.F., & Polanía J. (2001). estructura y distribución de pastos marinos en San Andrés Isla, Caribe colombiano. *Boletín Ecotrópica*, 35, 1-24.

- Anton, A., Cebrian, J., Duarte, C., Heck Jr, K. L., & Goff, J. (2009). Low impact of Hurricane Katrina on seagrass community structure and functioning in the northern Gulf of Mexico. *Bulletin of Marine Science*, 85(1), 45-59.
- Avendaño, J., Rodríguez Rodríguez, A., & Gómez López, D. I. (2019). Servicios Ecosistémicos Marinos y Costeros de Colombia: Énfasis en Manglares Y Pastos Marinos. *INVEMAR*, 1-34.
- Balestri, E., Vallerini, F., & Lardicci, C. (2011). Storm-generated fragments of the seagrass *Posidonia oceanica* from beach wrack – A potential source of transplants for restoration. *Biological Conservation*, 144(5), 1644-1654.
- Batista-Morales, A., & Gómez D. (2010). Indicadores de estado de conservación de los ecosistemas marino-costeros de Colombia. En *Invemar, Informe del Estado de los Ambientes y Recursos Marinos y Costeros en Colombia: Año 2009*. (págs. 173-210). Santa Marta, Colombia: Serie Publicaciones Periódicas del Invemar.
- Birch, W.R., & Birch, M.,. (1984). Succession and pattern of tropical intertidal seagrasses in Cockle Bay, Queensland, Australia: a decade of observations. *Aquatic Botany*, 19, 343-367.
- Burkholder, J. M., Tomasko, D. A., & Touchette, B. W. (2007). Seagrasses and eutrophication. *Journal of experimental marine biology and ecology*, 350(1-2), 46-72.
- Byron, D., , & Heck, K. L. (2006). Hurricane effects on seagrasses along Alabama's Gulf Coast. *Estuaries and Coasts*, 29(6), 939-942.
- Cabaço, S., Santos, R., & Duarte, C. M. (2008). The impact of sediment burial and erosion on seagrasses: A review. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 79(3), 354–366.
- CARICOMP. (2001). MANUAL OF METHODS FOR MAPPING AND MONITORING OF PHYSICAL AND BIOLOGICAL PARAMETERS IN THE COASTAL ZONE OF THE CARIBBEAN LEVELS 1 AND 2. *Florida Institute of Oceanography*, 1-93.
- Castillo-Torres, P. (2002). Caracterización estructural y evaluación del estado ambiental de las praderas de pastos marinos del Caribe colombiano. Trabajo de grado (Biólogo Marino). *Universidad Jorge Tadeo Lozano. Facultad de Biología Marina. Área de Ingeniería y Recursos Naturales.*, 1-66.
- CORALINA-INVEMAR. (2012). *Atlas de la Reserva de Biósfera Seaflower. Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina*. (Gómez-López, D. I., Segura-Quintero C.,, Sierra-Correa P. C.,, & Garay-Tinoco J., Edits.) Santa Marta, Colombia: Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives De Andréis" -INVEMAR- y Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina - CORALINA-. Serie de Publicaciones Especiales de INVEMAR # 28.
- Côté-Laurin, M.-C., Benbow, S., & Erzini, K. (2017). The short-term impacts of a cyclone on seagrass communities in Southwest Madagascar. *Continental Shelf Research*, 138, 132-141.
- Cruz-Palacios, V., & Van Tussenbroek, B. I. (2005). Simulation of hurricane-like disturbances on a Caribbean seagrass bed. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 324(1), 44-60.

- Dawes, C. J., Lobban, C. S., & Tomasko, D. A. (1989). A comparison of the physiological ecology of the seagrasses *Halophila decipiens* ostenfeld and *H. Johnsonii* eiseman from Florida. *Aquatic Botany*, 33(1-2), 149–154.
- Díaz, J.M., Barrios, L. M. , & Gómez-López, D. I. (2003). *Las praderas de pastos marinos en Colombia: Estructura y distribución de un ecosistema estratégico*. Santa Marta: INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No. 10.
- Díaz-M., J.M. , & Gómez-López, D. I. (2003). Cambios históricos en la distribución y abundancia de praderas de pastos marinos en la bahía de Cartagena y áreas aledañas (Colombia). *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR*, 32(1), 57-74.
- Duarte, C. (1991). Allometric scaling of seagrass form and productivity. *Marine Ecology Progress*, 77, 230-289.
- Fishman, J. R., Orth, R. J., Marion, S., & Bieri, J. (2004). A comparative test of mechanized and manual transplanting of eelgrass, *Zostera marina*, in Chesapeake Bay. *Restoration Ecology*, 12(2), 214-219.
- Fonseca M.S., & Fisher J.S. (1986). A comparison of canopy friction and sediment movement between four species of seagrass with reference to their ecology and restoration. *Marine Ecology Progress Series*, 29, 15-22.
- Fonseca, M. S. (1989). Sediment stabilization by *Halophila decipiens* in comparison to other seagrasses. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 29(5), 501-507.
- Fonseca, M. S., Julius, B. E., & Kenworthy, W. J. (2000). Integrating biology and economics in seagrass restoration: How much is enough and why? *Ecological Engineering*, 15(3-4), 227-237.
- Fonseca, M.S., Kenworthy, W. J., & Thayer, G. W. (1998). *Guidelines for the Conservation and Restoration of Seagrasses in the United States and Adjacent Waters, Volumen 55*. Universidad de Illinois en Urbana-Champaign: U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Coastal Ocean Office.
- Fourqurean, J. W., & Rutten, L. M. (2004). The impact of Hurricane Georges on soft-bottom, back reef communities: site-and species-specific effects in south Florida seagrass beds. *Bulletin of Marine Science*, 75(2), 239-257.
- Fourqurean, J. W., Powell, G. V., Kenworthy, W. J., & Zieman, J. C. (1995). The effects of long-term manipulation of nutrient supply on competition between the seagrasses *Thalassia testudinum* and *Halodule wrightii* in Florida Bay. *Oikos*, 349-358.
- Galeano E.G., & Gómez D. I. (2015). *Monitoreo de Pastos Marinos en el Caribe colombiano como insumo para el indicador condición tendencia ICTPM*. Santa Marta: INVEMAR.
- Geister, J. (1992). Modern reef development and cenozoic evolution of an oceanic island/reef complex: Isla de Providencia (Western Caribbean Sea, Colombia). *Facies*, 27(1), 44-45.

- Gillis, L. G., Bouma, T. J., Jones, C. G., van Katwijk, M. M., Nagelkerken, I., & Jeuken, C. J. L., et al. (2014). Potential for landscape-scale positive interactions. *Marine Ecology Progress Series*, 503, 289-303.
- Gómez-Cubillos, C., Licero, L., Perdomo, L., Rodríguez, A. M., Romero D'Achardi, D. C., Ballesteros Contreras, D. C., & Ricaurte Villota, C. (2015). *Portafolio "Áreas de arrecifes de coral, pastos marinos, playas de arena y manglares con potencial de restauración en Colombia"*. Santa Marta: Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR. Serie de Publicaciones Generales del Invemar No. 79.
- Gómez-López, D. I., NavarreteRamírez, S. M., Navas-Camacho, R., Díaz-Sánchez, C. M., Muñoz-Escobar, L., & Galeano, E. (2014). *Protocolo Indicador Condición Tendencia Praderas de Pastos Marinos (ICTPM). Indicadores de monitoreo biológico del Subsistema de Áreas Marinas Protegidas (SAMP)*. Santa Marta: Invemar, GEF y PNUD. Serie de Publicaciones Generales del Invemar No. 68.
- Gómez-López, D.I., Acosta-Chaparro, A., Gonzalez, J. D., Sanchez, L., Navas-Camacho, R., & Alonso, D. (2018). *Reporte del estado de los arrecifes coralinos y pastos marinos en Colombia (2016-2017)*. Santa Marta: Serie de publicaciones Generales del INVEMAR # 101.
- Guannel, G., Arkema, K., Ruggiero, P., & Verutes, G. (2016). The Power of Three: Coral Reefs, Seagrasses and Mangroves Protect Coastal Regions and Increase Their Resilience. *PLOS One*, 11(7).
- Guerra, L., & Guerra-Vargas, V. (2017). Determinación y cartografía del área de los pastos marinos del lagoon arrecifal de la isla de San Andrés. *VI Seminario Las Ciencias del Mar en la Universidad Nacional de Colombia "20 Años de la sede Caribe"* (pág. 4). San Andrés Isla, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Guerra, L., Mancera, J., & Werding, B. (2017). Aproximación al inventario de carbono azul en sustratos superficiales de pastos marinos en la Isla de San Andrés, Caribe suroccidental. *XVII Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar SENALMAR 2017* (pág. 21). Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Guerra-Vargas, L. A., Gillis, L. G., & Mancera-Pineda, J. E. (2020). Stronger Together: Do Coral Reefs Enhance Seagrass Meadows "Blue Carbon" Potential? *Frontiers in Marine Science*, 7.
- Hagy, J. D., Lehrter, J. C., & Murrell, M. C. (2006). Effects of Hurricane Ivan on water quality in Pensacola Bay, Florida. *Estuaries and Coasts*, 29(6), 919-925.
- Hernández-Delgado, E. A., Toledo-Hernández, C., Ruíz-Díaz, C. P., Gómez-Andújar, N., Medina-Muñiz, J. L., Canals-Silander, M. F., & Suleimán-Ramos, S. E. (2020). Hurricane Impacts and the Resilience of the Invasive Sea Vine, *Halophila stipulacea*: a Case Study from Puerto Rico. *Estuaries and Coasts*, 43, 1263-1283.
- IDEAM. (2020). *COMUNICADO ESPECIAL N°088 HURACAN ETA CATEGORIA 4*.
- IDEAM. (2020). *COMUNICADO ESPECIAL N°135 HURACÁN IOTA CATEGORIA 5*.
- IDEAM. (2020). *COMUNICADO ESPECIAL N°136 ACTUALIZACION HURACÁN IOTA CATEGORIA 5*.

- INVEMAR. (2004). Estado de las praderas de pastos marinos en Colombia. pp 111-124. En *Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros en Colombia* (pág. 360). Santa Marta: Serie de Publicaciones periódicas, INVEMAR; No. 8.
- Kenworthy, W.J., Fonseca, M.S., Whitfield, P.E. , & Hammerstrom, K.K. (2002). Analysis of seagrass recovery in experimental excavations and propeller-scar disturbances in the Florida Keys National Marine Sanctuary. *Journal of Coastal Research*, 37, 75-85.
- Mancini, G., Casoli, E., Ventura, D., Lasinio, G. , Belluscio, A., & Ardizzone, G. D. (2021). An experimental investigation aimed at validating a seagrass restoration protocol based on transplantation. *Biological Conservation*.
- Moreira, A., Barcia, S., Cabrales, Y., Suarez, A. M., & Fujii, M. T. (2011). El impacto del huracán Dennis sobre el macrofitobentos de la Bahía de Cienfuegos, Cuba/The impact of huracan Dennis on macrophytobenthos from Cienfuegos Bay, Cuba. *Revista de Investigaciones Marinas*, 30(3), 175-185.
- Morris, L. J. , & Tomasko, D. A. (1993). Proceedings and conclusions of workshops: Submerged aquatic vegetation and photosynthetically active radiation. Palatka, Florida: St. Johns River Water Management District Special Publication SJ93-SP13.
- Orth, R., Carruthers, T. J. B., Dennison, W. C. , Duarte, C. M. , Fourqurean, J. W. , Heck Jr., K. L. , . . . Williams, S. L. . (2006). A global crisis for seagrass ecosystems. *Bioscience*, 56(12), 987-996.
- Paerl, H. W., Valdes, L. M., Joyner, A. R., Peierls, B. L., Piehler, M. F., Riggs, S. R., . . . Luettich, R. A. (2006). Ecological response to hurricane events in the Pamlico Sound system, North Carolina, and implications for assessment and management in a regime of increased frequency. *Estuaries and Coasts*, 29(6), 1033-1045.
- Paling E. I., Fonseca M., van Katwijk M. M., & van Keulen M. (2018). Seagrass restoration. En Perillo, G., Wolanski, E., Cahoon, D. R., & van Keulen M., *Coastal wetlands: an integrated ecosystem approach* (págs. 687 - 713). Elsevier.
- Paling, E. I., Van Keulen, M., & Tunbridge, D. J. (2007). Seagrass transplanting in Cockburn Sound, Western Australia: a comparison of manual transplantation methodology using *Posidonia sinuosa* Cambridge et Kuo. *Restoration ecology*, 15(2), 240-249.
- Paling, E. I., van Keulen, M., Wheeler, K. , Phillips, J. , & Dyhrberg, R. . (2001). Mechanical seagrass transplantation on Success Bank, Western Australia. *Ecological Engineering*, 16, 331-339.
- Paling, E. I., Van Keulen, M., Wheeler, K. D., Phillips, J., & Dyhrberg, R. (2003). Influence of spacing on mechanically transplanted seagrass survival in a high wave energy regime. *Restoration Ecology*, 11(1), 56-61.
- Pan, J., Han, H., Jiang, X., Zhang, W., Zhao, N., Song, S., . . . Li, X. (2012). Desiccation, moisture content and germination of *Zostera marina* L. seed. *Restoration Ecology*, 20(3), 311-314.
- Peterson, C. H., Luettich Jr, R. A., Micheli, F., & Skilleter, G. A. (2004). Attenuation of water flow inside seagrass canopies of differing structure. *Marine Ecology Progress Series*, 268, 81-92.

- Phillips, R. C., & Meñez, E. G. (1988). Seagrasses. *Smithsonian contributions to the marine sciences*, 39, 1-104.
- Piazzì, L., Acunto, S., Frau, F., Atzori, F., Cinti, M.F., Leone, L., & Ceccherelli, G. (2021). Environmental Engineering Techniques to Restore Degraded *Posidonia oceanica* Meadows. *Water*, 13(5), 661.
- Poiner, I. R., Conacher, C. A., Loneragan, N. R., & Sonters, I. (1993). Effects of cyclones on seagrass communities and penaeid prawn stocks of the Gulf of Carpentaria. *CSIRO Marine Laboratories Report*, 1-35.
- Poiner, I.R., Walker, D.I., & Coles, R.G. (1989). Regional studies-seagrasses of tropical Australia. (Larkum, A.W., McComb, A.J., & Sheperd, S.A., Edits.) *Biology of Seagrasses*. Elsevier, 279-303.
- Preen, A. R., Lee Long, W. J., & Coles, R. G. (1995). Flood and cyclone related loss, and partial recovery, of more than 1000 km² of seagrass in Hervey Bay, Queensland, Australia. *Aquatic Botany*, 52(1-2), 3-17.
- Prato J., Santos-Martínez A., Castaño D., Cupul-Magaña A., Schuhmann P., Mancera-Pineda J.E. Robles A., Macariz A., Hudson A. Medina J. 2020. Natural shields for Caribbean insular territories: Wave and wind attenuation by coral reef barriers and mangroves at San Andrés Island, Seaflower Biosphere Reserve, Colombian Caribbean. GCFI 73th. Book of abstracts. Gulf and Caribbean Fisheries Institute. 72 pp.
- Ralph, P. J., Tomasko, D., Moore, K., Seddon, S., & Macinnis-Ng, C. M. O. (2007). Human Impacts on Seagrasses: Eutrophication, Sedimentation, and Contamination. *Seagrasses: biology, ecology and conservation*, 567-593.
- Ridler, M. S., Dent, R. C., & Arrinton, D. A. (2006). Effects of two hurricanes on *Syringodium filiforme*, manatee grass, within the Loxahatchee River Estuary, southeast Florida. *Estuaries and Coasts*, 29(6), 1019-1025.
- Rioja-Nieto, R., Chiappa-Carrara, X., & Sheppard, C. (2012). Effects of hurricanes on the stability of reef-associated landscapes. *Ciencias Marinas*, 38(1A), 47-55.
- Rodríguez, E. A., Mancera Pineda, J. E., & Gavio, B. (2010). Survey of benthic dinoflagellates associated to beds of *Thalassia testudinum* in San Andrés Island, Seaflower biosphere reserve, Caribbean Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 15(2), 229-246.
- Rodríguez-Ramírez, A., & Reyes-Nivia, M. C. (2008). Evaluación rápida de los efectos del huracán beta en la Isla Providencia (Caribe colombiano). *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 37(1), 215-222.
- Saunders, M. I., Leon, J. X., Callaghan, D. P., Roelfsema, C. M., Hamylton, S., Brown, C. J., . . . Mumby, P.J. (2014). Interdependency of tropical marine ecosystems in response to climate change. *Nature Climate Change*, 4(8), 724-729.

- Short, F. T., Montgomery, J., Zimmermann, C. F., & Short, C. A. (1993). Production and Nutrient Dynamics of a *Syringodium filiforme* Kütz. Seagrass Bed in Indian River Lagoon, Florida. *Estuaries*, 16(2), 323-334.
- Short, F.T., Coles, R.G., & Short, C.A. (2015). SeagrassNet Manual for Scientific Monitoring of Seagrass. *University of New Hampshire Publication*, 1-73.
- Sierra-Rozo, O., Gavio, B., , & Mancera-Pineda, J. E. (2012). Estructura de las praderas de *Thalassia testudinum* en la isla de Providencia, Caribe Colombiano, después del paso del huracán beta/Structure of *Thalassia testudinum* beds in Old Providence island, Caribbean Colombian, after hurricane Beta. *Caldasia*, 155-164.
- Tanner, C. E., & Parham, T. (2010). Growing *Zostera marina* (eelgrass) from seeds in land-based culture systems for use in restoration projects. *Restoration Ecology*, 18(4), 527-537.
- Tanner, J. E., McSkimming, C., Russell, B. D., & Connell, S. D. (2020). Rapid restoration of belowground structure and fauna of a seagrass habitat. *Restoration Ecology*, 29(1).
- Thorhaug, A., Belaire, C., Verduin, J. J., Schwarz, A., Kiswara, W., Prathep, A., & Dorward, S. (2020). Longevity and sustainability of tropical and subtropical restored seagrass beds among Atlantic, Pacific, and Indian Oceans. *Marine Pollution Bulletin*, 163.
- Uhrin, A. V., Hall, M. O., Merello, M. F., & Fonseca, M. S. (2009). Survival and expansion of mechanically transplanted seagrass sods. *Restoration Ecology*, 17(3), 359-368.
- UNEP-Nairobi Convention/WIOMSA. (2020). Guidelines for Seagrass Ecosystem Restoration in the Western Indian Ocean Region. *UNEP, Nairobi*, 1-63.
- Van Keulen, M., Paling, E. I., & Walker, C. J. (2003). Effect of planting unit size and sediment stabilization on seagrass transplants in Western Australia. *Restoration Ecology*, 11(1), 50-55.
- Vargas, J. O. (2011). Restauración ecológica: biodiversidad y conservación. *Acta biológica colombiana*, 16(2), 221-246.
- Vargas, O., Ospina, N. E. O., Rodríguez-Ramírez, N., & Castañeda, A. (2007). *Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino*. (O. Vargas, Ed.) Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Vega-Sequeda, J., Díaz Sánchez, C.M., Gómez Campo, K., López Londoño, T., Díaz Ruiz, M., & Gómez-López, D.I. (2016). BIODIVERSIDAD MARINA EN BAJO NUEVO, BAJO ALICIA Y BANCO SERRANILLA, RESERVA DE BIOSFERA SEAFLOWER. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 44(1).
- Vides, M., Alonso, D. , Castro, E., & Bolaños, N. (2016). *Biodiversidad del mar de los siete colores. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras – INVEMAR y Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina - CORALINA*. Santa Marta - Colombia: Serie de Publicaciones Generales del INVEMAR No. 84.

- Virnstein, R. W., & Hall, L. M. (2009). Northern range extension of the seagrasses *Halophila johnsonii* and *Halophila decipiens* along the east coast of Florida, USA. *Aquatic Botany*, 90(1), 89-92.
- Ward, E. A., Meek, S. K., Gordon, D. M., Cameron, T. C., Steer, M. D., Smith, D. J., . . . Tsimpidis, T. (2020). The use of storm fragments and biodegradable replanting methods allows for a low-impact habitat restoration method of seagrass meadows, in the eastern Aegean Sea. *Conservation Evidence*, 17, 1-6.
- Waycott, M., Duarte, C. M., Carruthers, T. J., Orth, R. J., Dennison, W. C., Olyarnik, S., . . . 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.
- Webster, P. J. (2005). Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment. *Science*, 309(5742), 1844-1846.
- Yue, S.D., Zhou, Y., Zhang, Y., Xu, S.C., Gu, R.T., Xu, S., . . . Zhao, P. (2019). Effects of salinity and temperature on seed germination and seedling establishment in the endangered seagrass *Zostera japonica* Asch. & Graebn. in northern China. *Marine Pollution Bulletin*, 146, 848-856.
- Zieman, J. C. (1975). Seasonal variation of turtle grass, *Thalassia testudinum* König, with reference to temperature and salinity effects. *Aquatic Botany*, 1, 107-123.
- Zieman, J. C. (1975). Tropical seagrass ecosystems and pollution. (Ferguson, E. J., & E. J. Johannes, Edits.) *Tropical Marine Pollution. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam*, 63-74.
- Zieman, J. C. (1982). The ecology of the seagrasses of south Florida: a community profile. *Department of the Interior, US Fish and Wildlife Service*, 63-74.