

# Evaluación de la efectividad de la infraestructura verde para la mitigación del riesgo costero en América Latina y el Caribe

Silva Casarín, Rodolfo  
Chávez Cerón, Valeria  
Lithgow Serrano, Debora  
Tsuneki, Hori

División de Medio  
Ambiente, Desarrollo Rural  
y Gestión de Riesgo de  
Desastres

NOTA TÉCNICA N°  
IDB-TN-01887

Marzo 2020

# Evaluación de la efectividad de la infraestructura verde para la mitigación del riesgo costero en América Latina y el Caribe

Silva Casarín, Rodolfo

Chávez Cerón, Valeria

Lithgow Serrano, Debora

Tsuneki, Hori

**Catalogación en la fuente proporcionada por la  
Biblioteca Felipe Herrera del  
Banco Interamericano de Desarrollo**

Evaluación de la efectividad de la infraestructura verde para la mitigación del riesgo costero en América Latina y el Caribe / Rodolfo Silva Casarín, Valeria Chávez Cerón, Debora Lithgow Serrano, Hori Tsuneki.

p. cm. — (Nota técnica del BID; 1887)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Infraestructure (Economics)-Environmental aspects-Latin America. 2. Infrastructure (Economics)-Environmental aspects-Caribbean Area. 3. Coastal zone management-Latin America. 4. Coastal zone management-Caribbean Area. 5. Shore protection-Latin America. 6. Shore protection-Caribbean Area. 7. Wetland restoration-Latin America. 8. Wetland restoration-Caribbean Area. I. Silva Casarín, Rodolfo. II. Chávez Cerón, Valeria. III. Lithgow Serrano, Debora. IV. Tsuneki, Hori. V. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Medio Ambiente, Desarrollo Rural y Administración de Riesgos por Desastres. VI. Serie.

IDB-TN-1887

Código JEL: Q54

Palabras claves: Gestión Integrada de Zonas Costeras; Gestión de los Ecosistemas Costeros; Cambio Climático; Infraestructura Verde; Infraestructura Costera; Gestión del Riesgo de Desastres; Países de América Latina y el Caribe;

<http://www.iadb.org>

Copyright © [2020] Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



**Este documento fue preparado por:**

**Especialistas del Banco Interamericano de Desarrollo:** Hori Tsuneki, Especialista en Gestión de Riesgos de Desastres; Cesar Tulio Bustamante, Especialista Principal de Recursos Naturales; Gines Suarez Vazquez, Especialista en Manejo de Riesgos y Desastres Naturales; Yuri Chakalall, Especialista Senior en Gestión de Riesgos y Desastres Naturales; Onil Banerjee, Especialista de Sector en Recursos Naturales y Fernando Balcazar, Especialista Senior en Recursos Naturales.

**Consultores Externos:** Rodolfo Silva Casarín; Valeria Chávez Cerón; Debora Lithgow Serrano.

**Agradecimiento a los miembros de instituciones participantes:**

Agradecemos las valiosas aportaciones de los miembros del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos, particularmente a Pamela Flores, Yandy Rodríguez, Débora Ramírez, Cindy López, Graciela Rivera, Ana Escalante, Karla Lopes, Mireille Escudero, Itxaso Odériz y Edgar Mendoza.

El desarrollo y publicación de este documento fue financiado a través de la Cooperación Técnica Regional RG-T2675, financiado por el Fondo Fiduciario Multidonantes para la Prevención de Desastres



# Contenido

<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>iv</b>
<b>Lista de Tablas.....</b>	<b>viii</b>
<b>I. Presentación .....</b>	<b>9</b>
I.1 Antecedentes: Resumen de antecedentes del proyecto .....	9
I.2 Objetivos del proyecto .....	9
I.3 Estructura del documento.....	10
<b>II. Conceptos generales .....</b>	<b>10</b>
II.1 La zona costera .....	10
II.2 Principales formaciones y ecosistemas en la zona costera .....	10
II.2.1 Formaciones por erosión .....	10
II.2.2 Formaciones por depositación .....	11
1.1.1. Ecosistemas en la zona costera.....	14
II.3 Bienes y servicios provistos por los ecosistemas en la zona costera.....	21
<b>III. Definición de Infraestructura verde .....</b>	<b>23</b>
III.1 Tipos de infraestructura verde .....	24
III.2 Oportunidades en ALC .....	26
III.3 Marcos internacionales.....	27
<b>IV. Alternativas más utilizadas de infraestructura verde.....</b>	<b>29</b>
IV.1 Playas y dunas .....	32
IV.2 Manglares y otros humedales costeros.....	36
IV.2.1 Restauración.....	36
IV.2.2 Rehabilitación .....	40
IV.2.3 Diseño de ecosistemas: Humedales artificiales .....	42
IV.3 Arrecifes y pastos marinos .....	43
IV.3.1 Restauración de arrecifes.....	44
IV.3.2 Restauración de pastos marinos .....	46
IV.4 Reubicación de infraestructura.....	49
IV.5 Ejemplos caso de uso de infraestructura verde .....	50
IV.6 Modelo para la selección de alternativas .....	57
<b>V. Factores determinantes para éxito de un proyecto de infraestructura verde costera.....</b>	<b>59</b>
V.1 Adecuado diagnóstico en un proyecto de infraestructura verde costera .....	60
V.1.1 Componente física .....	61
V.1.2 Componente ecológica .....	61
V.1.3 Componente social.....	61
V.1.4 Información requerida para la realización de un diagnóstico .....	61
V.1.5 Preguntas para resolver durante el diagnóstico.....	63
V.2 Resiliencia y resistencia de un sistema costero.....	64
V.3 Mimetización de funciones naturales .....	65
V.4 Conservación de flujos de materia y energía .....	66
V.5 Utilización de recursos locales .....	68
V.6 Participación de los actores locales .....	71
V.7 Monitoreo.....	73
<b>VI. Evaluación de la efectividad de infraestructura verde: pruebas físicas y numéricas.....</b>	<b>76</b>
VI.1 Pruebas físicas .....	76

VI.1.1	Hipótesis .....	77
VI.1.2	Características del prefabricado de concreto (Cubípodo) .....	78
VI.1.3	Escala de los Cubípodos .....	79
VI.1.4	Estructuras empleadas .....	79
VI.1.5	Características del canal de oleaje y arreglo experimental .....	79
VI.1.6	Condiciones de los casos ensayados .....	80
VI.1.7	Resultados .....	82
VI.3	Pruebas numéricas .....	85
<b>VII.</b>	<b>Estudios de caso .....</b>	<b>92</b>
VII.1	México .....	93
VII.1.1	Caracterización física .....	94
VII.1.2	Caracterización ecológica .....	98
VII.1.3	Caracterización socioeconómica .....	101
VII.1.4	Selección de alternativas .....	104
VII.2	República Dominicana .....	107
VII.2.1	Las Terrenas .....	107
VII.2.2	Bayahibe .....	112
VII.2.3	Punta Cana .....	116
VII.3	Colombia .....	120
VII.3.1	Caracterización física .....	121
VII.3.2	Caracterización ecológica .....	125
VII.3.3	Caracterización socioeconómica .....	127
VII.3.4	Problemática y selección de alternativas: Kilómetro 19 de la Vía Ciénega-Barranquilla..	128
VII.4	Trinidad y Tobago .....	130
VII.4.1	Caracterización física .....	131
VII.4.2	Caracterización ecológica .....	135
VII.4.3	Caracterización socioeconómica .....	138
VII.4.4	Problemática y selección de alternativas: Pigeon Point, Trinidad .....	140
VII.4.5	Problemática y selección de alternativas: Otaheite, Tobago .....	140
VII.5	Las Bahamas .....	142
VII.5.1	Caracterización física .....	143
VII.5.2	Caracterización ecológica .....	146
VII.5.3	Caracterización socioeconómica .....	148
VII.5.4	Problemática y selección de alternativas: Small Hope bay, Andros .....	148
<b>VIII.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>150</b>
<b>IX.</b>	<b>Referencias .....</b>	<b>152</b>
	Sitios web .....	157

# Lista de Figuras

Figura 1. Formaciones costeras asociadas a la erosión costera (tomado de Silva y Mendoza, 2015).....	11
Figura 2. Formaciones costeras asociadas con la acumulación del sedimento (tomado de Silva y Mendoza, 2015).....	12
Figura 3. Descripción por zonas de un perfil de playa (tomado de Silva y Mendoza, 2015).....	12
Figura 4. Clasificación de playas en función a su perfil transversal, a) Playa acumulativa y b) Playa erosiva.....	13
Figura 5. Principales componentes morfológicos y sedimentarios de un delta (tomado de Silva y Mendoza, 2015).....	14
Figura 6. Desarrollo de una duna costera. La arena se acumula alrededor de la planta, cubriéndola por completo. En respuesta, la planta crece y funciona como un obstáculo de mayor tamaño que retiene más arena (tomado de Silva <i>et al.</i> , 2018).....	16
Figura 7. Ciclos de erosión-restauración de dunas costeras. En tiempos de clima tranquilo (i) las olas son moderadas. Rompen en la playa, depositan arena y se forman las dunas. Durante las tormentas (ii) se erosionan las playas y el primer cordón de dunas. Cuando regresa el buen tiempo (iii) las olas nuevamente depositan sedimentos en la playa. Con el tiempo, la vegetación vuelve a cubrir la duna (NMP = Nivel del mar Máximo Promedio) (tomado de Silva <i>et al.</i> , 2018).....	16
Figura 8. Clasificación general de humedales. a) Humedal marino, Parque Nacional Galápagos. (Foto de Bolívar Erazo); b) humedal lacustre, Montebello, Chiapas, México (foto tomada de Rojas y Vidal, 2008) c) Humedal palustre (foto de SEMARNAT, 2017).....	17
Figura 9. Tipos de arrecifes: a) Arrecife coralino en Quintana Roo, México, b) Arrecife rocoso en el Golfo de California, México, c) Arrecife artificial en el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano, México.....	18
Figura 10. Tipos de arrecifes coralinos de acuerdo origen, configuración y su situación con respecto a tierra firme. a) Arrecifes costeros, b) Arrecifes de barrera, c) Arrecifes de plataforma, d) Atolones (tomada de Ortiz, 2005).....	18
Figura 11. Pradera de pastos marinos en Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos, México (Tomada de CONABIO 2012).....	19
Figura 12. Manglar en Tecolutla, Veracruz, México.....	21
Figura 13. Ejemplos de servicios ecosistémicos de los humedales en la zona costera.....	22
Figura 14. Clasificación de servicios ecosistémicos por Evaluación del Milenio y ejemplos en la zona costera.....	22
Figura 15. Principales beneficios de la infraestructura verde (modificado de Luque <i>et al.</i> , 2018). ....	24
Figura 16. Tipos de infraestructura verde.....	25
Figura 17. Elementos generales de decisión para la selección del tipo de infraestructura verde.....	26
Figura 18. Políticas internacionales para el uso de ecosistemas en la ingeniería costera.....	28
Figura 19. Definiciones de algunas de las técnicas utilizadas en los proyectos de infraestructura verde.....	29
Figura 20. Técnicas de recuperación de ecosistemas y alcances de cada una en función de la salud, integridad y sostenibilidad de los ecosistemas (modificado de Martínez <i>et al.</i> 2014). ....	30
Figura 21. Factores que pueden determinar la factibilidad de una restauración (modificado de Lithgow <i>et al.</i> , 2013).....	31
Figura 22. Algunos indicadores que pueden ser utilizados para determinar el éxito de una intervención basada en la restauración.....	32
Figura 23. Pasos para la restauración de dunas.....	33
Figura 24. Posibilidades de reconstrucción del cordón dunar en relación con el balance sedimentario del sector costero (modificado de Ley <i>et al.</i> , 2007). ....	34
Figura 25. Recuperación de dunas en proyectos de infraestructura verde (modificado de Ley <i>et al.</i> , 2007). ....	35
Figura 26. Aspectos a considerar en la recuperación y creación de humedales costeros.....	38

Figura 27. Supuestos que deben cumplirse antes de decidir intervenir un manglar. Basado en López <i>et al.</i> , 2009.....	38
Figura 28. Elementos a considerar durante la restauración de un humedal costero.....	39
Figura 29. Elementos que determinan la factibilidad de una restauración de un humedal costero .....	40
Figura 30. Algunos objetivos de la regeneración hídrica y el manejo de la vegetación, principales actividades en una rehabilitación de humedales.....	41
Figura 31. Tipos de humedales artificiales.....	43
Figura 32. Mecanismos por los cuales los humedales artificiales proveen el servicio de purificación de agua.....	43
Figura 33. Diagrama de planeación de la propagación de corales (tomado de Lirman y Schopmeyer, 2016).....	45
Figura 34. Diagrama conceptual para planeación de la restauración de pastos marinos (modificado de van Katwijk <i>et al.</i> , 2009). .....	48
Figura 35. Nivel mínimo de desplante de estructuras en la costa (tomada de Silva <i>et al.</i> , 2018).....	50
Figura 36. Uso de infraestructura verde: basada en ecosistemas (ejemplo 1).....	51
Figura 37. Uso de infraestructura verde: basada en ecosistemas (ejemplo 2).....	52
Figura 38. Uso de infraestructura verde: basada en ecosistemas asistidos.....	53
Figura 39. Uso de infraestructura verde: basada en infraestructura blanda .....	54
Figura 40. Uso de infraestructura verde: infraestructura rígida mejorada con el uso de ecosistemas.....	55
Figura 41. Uso de infraestructura verde: desmantelamiento y reubicación de infraestructura.....	56
Figura 42. Selección de alternativas de infraestructura verde.....	57
Figura 43. Alternativas de actuación en función del tipo de infraestructura verde .....	58
Figura 44. Factores determinantes para éxito de un proyecto de infraestructura verde .....	59
Figura 45. Grupos de información y categorías de relevancia (modificado de Silva <i>et al.</i> , 2019).....	62
Figura 46. Ejemplos de información por grupo y categoría (modificado de Silva <i>et al.</i> , 2019).....	62
Figura 47. Esquema de actuación en casos de emergencia .....	63
Figura 48. Preguntas a resolver durante el diagnóstico.....	63
Figura 49. Relación entre el grado de naturalidad y la provisión de servicios ecosistémicos .....	64
Figura 50. Relación entre el grado de naturalidad y la provisión de servicios ecosistémicos .....	65
Figura 51. Conectividad en la zona fótica .....	66
Figura 52. Alteraciones hidrodinámicas en la zona costera.....	67
Figura 53. Ejemplos de efectos no deseados producidos por estructuras costeras tradicionales .....	68
Figura 54. Principios recomendados para la utilización de recursos locales (modificado de Carballo-Cobas, 2018). .....	70
Figura 55. Logros esperados para cualquier tipo de campaña, concientización o técnica implementada por los actores locales (modificado de Carrero de Blanco y García, 2008).....	72
Figura 56. Objetivos de los programas de monitoreo en proyectos de infraestructura verde .....	74
Figura 57. Variables de monitoreo para proyectos de restauración de playas y pastos marinos, según Baldera <i>et al.</i> 2018 .....	74
Figura 58. Elementos a considerar durante la planeación y ejecución de los planes de monitoreo .....	75
Figura 59. Conectividad entre ecosistemas costeros (Tomada de <a href="https://www.usc.edu.au/research-and-innovation/animal-and-marine-ecology/marine-and-coastal-ecology">https://www.usc.edu.au/research-and-innovation/animal-and-marine-ecology/marine-and-coastal-ecology</a> ).....	77
Figura 60. Sistema con presencia de dique, mejorado ecológicamente (modificado de Schoones <i>et al.</i> , 2019).....	77
Figura 61. Cubípodos para la construcción de diques en talud ( <a href="http://www.ohlinnovacion.com">http://www.ohlinnovacion.com</a> ).....	78
Figura 62. Cubípodos para la construcción de una HLCS.....	78
Figura 63. Características de los Cubípodos a escala.....	79
Figura 64. Estructuras empleadas en las pruebas físicas .....	79
Figura 65. Canal de oleaje (izq.) y pala generadora de oleaje (der.).....	80
Figura 66. Arreglo experimental .....	80
Figura 67. Resultados estructuras tipo A .....	83
Figura 68. Resultados estructuras tipo B .....	83

Figura 69. Resultados estructuras tipo B .....	83
Figura 70. Localización de Puerto Morelos, Quintana Roo, México (imagen modificada de Google Earth). .....	85
Figura 71. a) Sitio de estudio en Puerto Morelos, México, b) Zona costera frente al hotel Now Jade. ....	85
Figura 72. Configuración modificada para la tercera etapa del proyecto .....	86
Figura 73. Malla de modelación con la configuración modificada .....	87
Figura 74. Velocidades de corrientes de oleaje para la configuración del proyecto, condición de régimen medio .....	88
Figura 75. Velocidades de corrientes de oleaje para la configuración del proyecto, condición de régimen medio. Detalles A a E. ....	89
Figura 76. Respuesta morfológica para las distintas condiciones de oleaje simuladas para la configuración del proyecto.....	90
Figura 77. Cambio de la línea de costa, comparación de escenarios: (a) Calma vs Tormenta E; (b) Tormentas.....	91
Figura 78. Localización de Puerto Morelos, Quintana Roo, México (imagen modificada de Google Earth). .....	93
Figura 79. Clasificación geológica de la Península de Yucatán (Durán & Méndez, 2010).....	94
Figura 80. Rosa de oleaje (izq.) y rosa de vientos (der.) para Puerto Morelos - Anual .....	95
Figura 81. Probabilidad de excedencia de alturas de ola significativa (izq.) y de periodos medio de ola (der.) para Puerto Morelos - Anual .....	96
Figura 82. Probabilidad conjunta altura de ola significativa y periodo medio de ola para Puerto Morelos – Anual.....	96
Figura 83. Probabilidad conjunta altura de ola significativa y dirección de propagación para Puerto Morelos - Anual .....	96
Figura 84. Probabilidad conjunta de vientos sostenidos y dirección de incidencia para Puerto Morelos - Anual.....	96
Figura 85. Puntos críticos de mayor erosión y acreción en Puerto Morelos, Riviera Maya (modificado de Bolongaro, 2014). ....	97
Figura 86. Distribución de manglares y corales e identificación de parches deteriorados .....	100
Figura 87. Densidad poblacional de Puerto Morelos, México.....	103
Figura 88. Arrecife modular en Puerto Morelos, México .....	105
Figura 89. Resultados de la implementación de la fase 1 y 2 en Puerto Morelos, México .....	105
Figura 90. Localización de los sitios elegidos en República Dominicana: Las Terrenas, Bayahibe y Punta Cana (imagen modificada de Google Earth). ....	107
Figura 90. Localización de la celda de análisis y rosas de altura de ola y velocidad de viento para Las Terrenas .....	108
Figura 91. Probabilidad de excedencia de velocidad de viento y altura de ola para Las Terrenas.....	108
Figura 92. Probabilidad conjunta de altura de ola y periodo para Las Terrenas .....	108
Figura 93. Ecosistemas presentes en Las Terrenas, República Dominicana .....	109
Figura 94. Estado de las playas, en rojo se muestran zonas con erosión severa (mayor a 10m) entre 1984 y 2017 en Las Terrenas.....	110
Figura 95. Condiciones actuales en Punta Poppy, Las Terrenas (imagen satelital tomada de Google Earth, fotografías de Rodolfo Silva). ....	111
Figura 96. Definición de una duna acorazada (Knöchelmann, 2018).....	112
Figura 97. Localización de la celda de análisis y rosas de altura de ola y velocidad de viento para Bayahibe.....	112
Figura 98. Probabilidad de excedencia de velocidad de viento y altura de ola para Bayahibe .....	112
Figura 99. Probabilidad conjunta de altura de ola y periodo para Bayahibe .....	113
Figura 100. Ecosistemas presentes en Bayahibe, República Dominicana.....	113
Figura 101. Estado de las playas, en rojo se muestran zonas con erosión severa (mayor a 10m) entre 1984 y 2017 en Bayahibe.....	114

Figura 102. Condiciones actuales en Los Melones, Bayahibe (imagen satelital tomada de Google Earth, fotografías de Rodolfo Silva).	115
Figura 103. Localización de la celda de análisis y rosas de altura de ola y velocidad de viento para Punta Cana	116
Figura 104. Probabilidad de excedencia de velocidad de viento y altura de ola para Punta Cana	116
Figura 105. Probabilidad conjunta de altura de ola y periodo para Punta Cana	117
Figura 106. Ecosistemas presentes en Punta Cana, República Dominicana	117
Figura 107. Estado de las playas, en rojo se muestran zonas con erosión severa (mayor a 10m) entre 1984 y 2017 en Punta Cana	118
Figura 108. Condiciones actuales en El Cortecito, Punta Cana (imagen satelital tomada de Google Earth, fotografías de Rodolfo Silva).	119
Figura 109. Localización de la Ciénega Grande de Santa Marta, Magdalena, Colombia (imagen modificada de Google Earth).	120
Figura 110. Unidades geomorfológicas del delta del río Magdalena (modificado de Bernal, 1996).	121
Figura 111. Rosa de oleaje (izq.) y rosa de vientos (der.) para Ciénega Grande de Santa Marta – Anual	123
Figura 112. Probabilidad de excedencia de alturas de ola significativa (izq.) y de periodos medio de ola (der.) para Ciénega Grande de Santa Marta - Anual	123
Figura 113. Probabilidad conjunta altura de ola significativa y periodo medio de ola para Ciénega Grande de Santa Marta - Anual	123
Figura 114. Probabilidad conjunta altura de ola significativa y dirección de propagación para Ciénega Grande de Santa Marta - Anual	124
Figura 115. Probabilidad conjunta de vientos sostenidos y dirección de incidencia para Ciénega Grande de Santa Marta – Anual	124
Figura 116. Grado de erosión de Ciénega Grande, Colombia. En rojo se presentan las zonas con erosión, en amarillo zonas relativamente estables y en verde zonas con acreción. En análisis considera los cambios entre 2000 y 2017.	126
Figura 117. Obras de protección costera en Ciénega Grande de Santa Marta	126
Figura 118. Densidad poblacional de Ciénega de Santa Marta	128
Figura 119. Condiciones actuales en Kilómetro 19 de la Vía Ciénega-Barranquilla (imagen satelital tomada de Google Earth, fotografías de Valeria Chávez)	129
Figura 120. Localización de Pigeon Point, Tobago y Otaheite bay, Trinidad (imágenes modificadas de Google Earth).	130
Figura 121. Rosa de oleaje (izq.) y rosa de vientos (der.) para Pigeon Point - Anual	132
Figura 122. Probabilidad de excedencia de alturas de ola significativa (izq.) y de periodos medio de ola (der.) para Pigeon Point - Anual	132
Figura 123. Probabilidad conjunta altura de ola significativa y periodo medio de ola para Pigeon Point - Anual	132
Figura 124. Probabilidad conjunta altura de ola significativa y dirección de propagación para Pigeon Point - Anual	133
Figura 125. Probabilidad conjunta de vientos sostenidos y dirección de incidencia para Pigeon Point - Anual	133
Figura 126. Rosa de oleaje (izq.) y rosa de vientos (der.) para Otaheite bay - Anual	133
Figura 127. Probabilidad de excedencia de alturas de ola significativa (izq.) y de periodos medio de ola (der.) para Otaheite bay - Anual	134
Figura 128. Probabilidad conjunta altura de ola significativa y periodo medio de ola para Otaheite bay - Anual	134
Figura 129. Probabilidad conjunta de vientos sostenidos y dirección de incidencia para Otaheite bay - Anual	135
Figura 130. Probabilidad conjunta altura de ola significativa y dirección de propagación para Otaheite bay - Anual	135



Figura 131. Estado de las playas, en rojo se muestran zonas con erosión severa (mayor a 10m) entre 1984 y 2017 .....	136
Figura 132. Uso de suelo en Pigeon Point. En rojo se observan manchones de vegetación perturbada .....	138
Figura 133. Densidad poblacional en Trinidad y Tobago. Se muestran en círculos rojos los sitios de interés: Otaheite bay y Pigeon Point, respectivamente .....	139
Figura 134. Condiciones actuales en Pigeon Point, Tobago (imagen satelital tomada de Google Earth, fotografías de Valeria Chávez).....	140
Figura 135. Condiciones actuales en Otaheite Bay, Trinidad (imagen satelital tomada de Google Earth, fotografías de Grueslayer @Wikipedia, CC BY-SA 4.0). .....	141
Figura 136. Localización de la Isla Andros, Bahamas (imagen modificada de Google Earth). .....	142
Figura 137. Sistema sedimentario de las planicies occidentales de la isla Andros (modificada de Bourrouilh-Le Jan, 2007). .....	143
Figura 138. Rosa de oleaje (izq.) y rosa de vientos (der.) para Isla Andros - Anual .....	144
Figura 139. Probabilidad de excedencia de alturas de ola significativa (izq.) y de periodos medio de ola (der.) para Isla Andros - Anual .....	145
Figura 140. Probabilidad conjunta altura de ola significativa y periodo medio de ola para Isla Andros - Anual.....	145
Figura 141. Probabilidad conjunta altura de ola significativa y dirección de propagación para Isla Andros - Anual.....	146
Figura 142. Probabilidad conjunta de vientos sostenidos y dirección de incidencia para Isla Andros - Anual.....	146
Figura 143. Estado de las playas de Bahamas, se muestra en rojo aquellas zonas con erosión (198 a 2017), en amarillo las zonas estables y en verde aquellas zonas con acreción. ....	147
Figura 144. Condiciones actuales en Small Hope bay, Andros (imagen satelital tomada de Google Earth, fotografías: Casuarina (Walter Erb), estructura (Dogs Garage).....	149

## Lista de Tablas

Tabla 1. Condiciones de los casos ensayados ( $H_{si}$ : Altura de ola significativa incidente, $T_{pi}$ : Periodo pico incidente, $F_b$ : Francobordo) .....	81
Tabla 2. Datos de entrada para la modelación .....	87
Tabla 3. Parámetros estadísticos del reanálisis del oleaje para Puerto Morelos .....	95
Tabla 4. Alternativas seleccionadas para las fases 1 y 2 del proyecto Now Jade.....	104
Tabla 5. Alternativas seleccionadas para la fase 3 del proyecto Now Jade .....	106
Tabla 6. Parámetros estadísticos del reanálisis del oleaje para Las Terrenas.....	109
Tabla 7. Alternativas seleccionadas para Punta Poppy, Las Terrenas .....	111
Tabla 8. Parámetros estadísticos del reanálisis del oleaje para Bayahibe .....	113
Tabla 9. Alternativas seleccionadas para Los Melones, Bayahibe. ....	115
Tabla 10. Parámetros estadísticos del reanálisis del oleaje para Punta Cana .....	117
Tabla 11. Alternativas seleccionadas para El Cortecito, Punta Cana.....	119
Tabla 12. Parámetros estadísticos del reanálisis del oleaje para Ciénega Grande de Santa Marta.....	122
Tabla 13. Alternativas seleccionadas para el Kilómetro 19 de la Vía Ciénega-Barranquilla .....	129
Tabla 14. Parámetros estadísticos del reanálisis del oleaje para Pigeon Point y Otaheite bay .....	131
Tabla 15. Alternativas seleccionadas para Pigeon Point, Tobago.....	140
Tabla 16. Alternativas seleccionadas para Otaheite Bay, Trinidad. ....	141
Tabla 17. Parámetros estadísticos del reanálisis del oleaje para la costa Este de la Isla Andros .....	144
Tabla 18. Alternativas seleccionadas para Small Hope bay, Andros. ....	149

## **I. Presentación**

### **I.1 Antecedentes: Resumen de antecedentes del proyecto.**

La sustentabilidad a largo plazo de las poblaciones costeras depende del funcionamiento de los ecosistemas que ahí se encuentran y de los servicios que ellos proveen. La importancia de dichos servicios para la sociedad se reconoce con más fuerza conforme avanza el conocimiento y esto es evidente dada la gran cantidad de literatura relacionada con el tema que ha sido publicada en décadas recientes, aunque también se ha intensificado la degradación y la desaparición de los ecosistemas que los proveen. En particular, los servicios de mitigación de la erosión y de la inundación son cada vez más relevantes dada la tendencia de crecimiento poblacional en zonas costeras de baja elevación y al aumento de los daños socioeconómicos asociados a la presencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos.

Ante dicho incremento, la implementación de estrategias de protección es una tarea prioritaria y cada vez más urgente. Dentro de las estrategias más prometedoras se cuenta la implementación de proyectos de infraestructura verde costera.

El concepto “infraestructura verde” depende, principalmente, de las condiciones ecológicas y socioeconómicas de cada lugar (Silva *et al.*, 2017). A diferencia de la infraestructura tradicional, la cual toma en cuenta solo factores socioeconómicos y políticos o la restauración meramente ecológica; la infraestructura verde tiene principios multifuncionales. Es decir, tiene como base los conceptos de conectividad, multifuncionalidad, integración y multiescala. En consecuencia, los proyectos de infraestructura verde costera pueden abarcar aspectos tan amplios y contrastantes como: la recuperación del funcionamiento de ecosistemas naturales; la creación de ecosistemas artificiales; las obras de ingeniería que dependen del funcionamiento de los ecosistemas circundantes; las obras de ingeniería tradicional con adaptaciones para disminuir su impacto ambiental y; las actuaciones de corrección de estructuras y de explotaciones que causan daño en el medioambiente y no brindan un beneficio socioeconómico conveniente.

### **I.2 Objetivos del proyecto**

En los últimos años han ocurrido avances significativos en todo el mundo para medir y modelar el cambio costero, en métodos para analizar los beneficios económicos de la Gestión Integral de la Zona Costera, utilizar herramientas financieras para reducir los riesgos climáticos en las zonas costeras, y en el fortalecimiento de las estructuras de gobernanza regionales. En este sentido, el uso de infraestructura verde para la mitigación del riesgo costero es un avance clave que gana atención regionalmente y se ha incorporado a los préstamos del Banco Interamericano de Desarrollo (BID). En respuesta, se planteó el proyecto “Evaluación de la efectividad de la infraestructura verde para la mitigación del riesgo costero” que es una colaboración entre el Banco Interamericano de Desarrollo y la Universidad Nacional Autónoma de México. En este proyecto se tuvo como objetivo contribuir a la consolidación del conocimiento sobre la efectividad de la infraestructura verde para la mitigación del riesgo costero, así como desarrollar herramientas para promover su utilización en América Latina y el Caribe.



### **I.3 Estructura del documento**

En las siguientes secciones se presentan los resultados obtenidos del proyecto. Primero, se encuentra un manual que permite identificar la necesidad y factibilidad del uso de infraestructura verde, seleccionar los tipos de infraestructura pertinentes y provee de directrices sobre su implementación. También, se presentan los resultados de las pruebas físicas y numéricas efectuadas en estructuras comúnmente utilizadas en proyectos de infraestructura verde. Después, se presentan estudios caso en México, República Dominicana, Colombia, Trinidad y Tobago y Bahamas. Finalmente, se hace una reflexión del proyecto “Evaluación de la Infraestructura Verde para la mitigación del riesgo costero.

## **II. Conceptos generales**

### **II.1 La zona costera**

La zona costera es la única región a lo largo de todos los continentes donde interactúan la tierra, la atmósfera, el mar y el agua dulce. Está conformada por una estrecha franja continua que no ocupa grandes superficies, pero representa la zona de transición entre mar y tierra. Existen diversas definiciones de zona costera dependiendo del enfoque con el que se les estudia; las hay geográficas, ecológicas geológicas y administrativas, entre otras (Silva *et al.*, 2018).

Debido a su ubicación, la zona costera es una región heterogénea con intensas interacciones físicas, biológicas y socioeconómicas, donde ocurren intercambios dinámicos de energía y materiales entre los ecosistemas marinos, terrestres y la atmósfera (Moreno-Casasola e Infante Mata, 2010; De Andrés y Barragán, 2016). La zona costera es ocupada por ecosistemas como lagunas costeras, playas, dunas, manglares y humedales. Esta zona tiene una gran fragilidad al ser la región más dinámica y cambiante del planeta.

### **II.2 Principales formaciones y ecosistemas en la zona costera**

La costa está conformada por una gran diversidad de paisajes, resultado de la gran heterogeneidad geomorfológica, climática y ecológica.

La dinámica hidro sedimentaria que ocurre de manera natural en la costa genera procesos de erosión y sedimentación. Estos procesos, junto con la topo batimetría local, ecosistemas marítimo-terrestres e infraestructura, genera una gran variedad de formas litorales.

#### **II.2.1 Formaciones por erosión**

En cuanto a las formas generadas por la erosión se encuentran (Figura 1):

- *Acantilados marinos*. Muros verticales de roca que se erosionan por la acción del oleaje, la abrasión hidráulica y la corrosión inducida por el medio marino. Su forma depende de la resistencia de las rocas que lo componen, es decir, cuando son más

resistentes, los contornos que se gastan se conocen como *salientes*; cuando la roca es de menor dureza se forman *ensenadas y bahías*.

- *Cuevas marinas*. Formadas por la refracción de las olas, ocurren cuando una *saliente* es erosionada por ambos lados en su parte inferior. Si se unen las cuevas en lados opuestos de una *saliente*, se forma un *arco marino*.
- *Chimeneas marinas*. Formadas por el derrumbe de un *arco* o una *cueva marina*, debido a la acción de las olas y del aire que se comprime al interior de la cueva. Cuando caen, la porción de la saliente que está en el lado del mar queda aislada a modo de *columna marina*.
- *Plataforma de abrasión*. Originada a partir de fragmentos de un acantilado, los cuales fueron depositados en la parte frontal del mismo. Cuando el fondo rocoso queda seco con la bajamar, la parte superior de la plataforma queda visible, las depresiones de ésta pueden ser rellenadas, de manera natural, por arena; estas formas costeras son una extensión de las *terrazas marinas*.
- *Terrazas marinas*. Antiguas *plataformas* cortadas por las olas, son el resultado de la degradación de un *acantilado*.

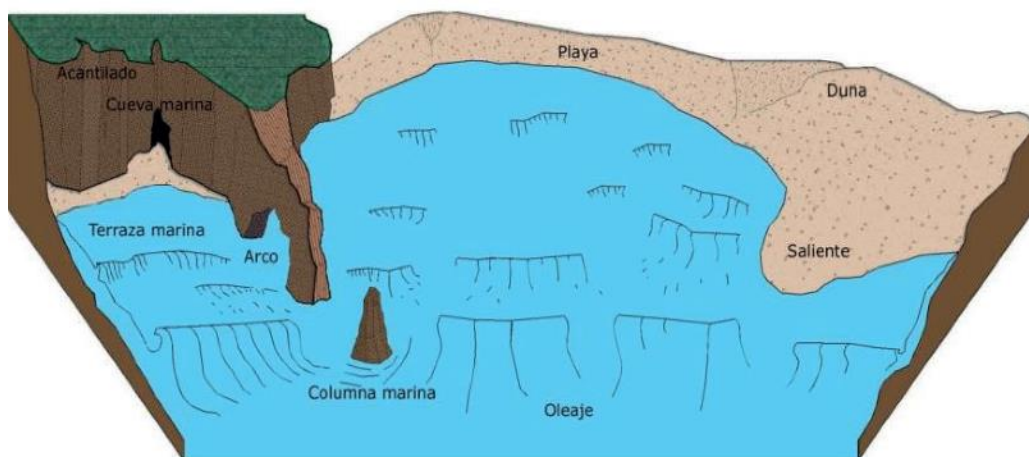


Figura 1. Formaciones costeras asociadas a la erosión costera (tomado de Silva y Mendoza, 2015)

## II.2.2 Formaciones por depositación

Las formas costeras relacionadas con la acumulación de arena son (Figura 2):

- *Playas*. Zonas de depósito o acumulación de sedimento no consolidado, se extiende hacia la tierra desde la línea de bajamar hasta un cambio topográfico significativo como un acantilado, una línea de dunas o vegetación permanente. Debido a que están formadas por materiales resultantes del interperismo, se consideran como el mejor elemento disipador de energía del oleaje (Figura 3).



Figura 2. Formaciones costeras asociadas con la acumulación del sedimento (tomado de Silva y Mendoza, 2015).

Las playas pueden clasificarse según su estado de equilibrio:

- Equilibrio estático. Playas en las cuales el balance neto de sedimentos a través de varios años permanece constante, de tal forma que los ciclos de deposición-erosión están equilibrados.
- Equilibrio metaestable o hiperestático. Playas que, en periodos de tiempo cortos, ya sea por deposición o erosión, cambian de un estado de equilibrio a otro y este nuevo equilibrio permanece estable por periodos de tiempo largos.
- Inestables: Ya sea porque se encuentran en proceso crónico de erosión o acreción.

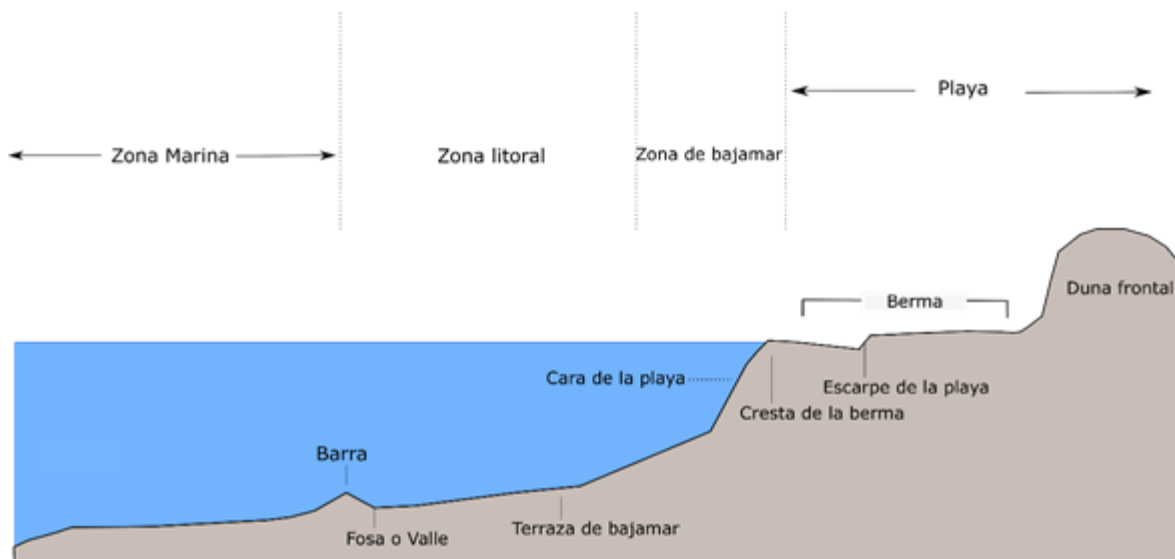


Figura 3. Descripción por zonas de un perfil de playa (tomado de Silva y Mendoza, 2015)

En función al perfil transversal de las playas, pueden clasificarse como sigue (Figura 4):

- Playas acumulativas o disipativa. Tienen pendientes suaves, más o menos continuas con pequeños cambios, se favorece el depósito de sedimento en la zona emergida, de esta manera, la pendiente se adapta al aporte de sedimentos,

eliminando los excesos de este. Por lo tanto, este tipo de perfil está en equilibrio o tiende a él (Figura 4a).

- Playas erosivas o reflejante. Tienen pendientes abruptas, con escarpes entre la berma y la duna, además de una barra sumergida. Se desarrollan a partir de oleaje muy energético y de gran altura, por lo que están conformadas por sedimento más grueso en la zona de lavado que en la rompiente. Estas son características de playas erosivas que se forman en cortos periodos de tiempo (Figura 4b).

Una playa puede considerarse como disipativa o erosiva o en transición entre ambos estados límite.

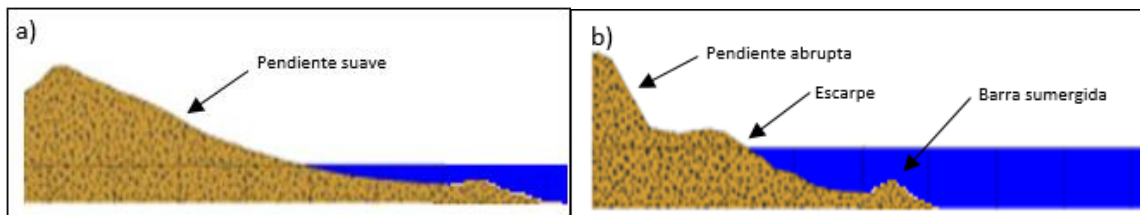


Figura 4. Clasificación de playas en función a su perfil transversal, a) Playa acumulativa y b) Playa erosiva

- *Flecha de arena*. Continuación de una *playa* o *punta* en forma de saliente que se proyecta en un cuerpo de agua. La dirección de su evolución depende de la dirección del transporte litoral. Su forma depende del oleaje local. Su altura, ensanchamiento y estabilización dependen de agentes físicos como mareas, viento y vegetación, además de las fuentes de sedimento.
- *Islas de barrera*. Prolongación de una *flecha*, no siempre se encuentra conectado a tierra firme, se ubican, comúnmente, frente a lagunas costeras. Su extensión delimita las bocas de las lagunas y su contacto con el mar. Un *cordón litoral* o *isla de barrera* es un conjunto de flechas.
- *Tómbolos*. Son un tipo de *flechas de arena* que se conectan con una isla u obstáculo emergido. Se forman por la combinación de fenómenos de refracción y difracción del oleaje, los cuales son generados por el mismo obstáculo.
- *Barras*. Islas largas y angostas, generalmente formadas por arena, que se extienden en dirección paralela a la costa. Es posible que se formen sobre plataformas de pendiente suave, ya que en estas zonas los cambios de la marea son menores, así como la energía del oleaje. Estas formas costeras son disipadoras de energía del oleaje.
- *Bajos*. Acumulaciones de material que se encuentran en la zona exterior de la playa, generalmente están sumergidas y pueden descubrirse ocasionalmente cuando se presenta marea baja.
- *Deltas*. Formadas en las bocas de ríos, por las acumulaciones de los aportes de sedimentos provenientes de estos. Para su formación es necesario que exista un aporte de sedimentos mayor al que es removido y redistribuido por el oleaje y las

corrientes. Su formación también está sujeta a la tectónica y marco geológico del sitio. Un delta está conformado por un canal que se divide en varios canales que transportan agua y sedimentos. Se divide en tres partes principales (Figura 5):

- Plano deltaico. Influido principalmente por el río y sus procesos; formado por canales y sus depósitos. Tiene los elementos de un río con meandros, barras por migración de canales, canales abandonados, diques naturales, planicies de inundación, entre otros.
- Frente deltaico. Porción submareal, afectada principalmente por olas. El sedimento llega por los canales de distribución. Se forman barras en la boca. Las corrientes costeras llevan arena fuera de la boca y la distribuyen a lo largo de la zona exterior del delta.
- Prodelta. Es la porción sumergida y puede extenderse en toda la plataforma superior.

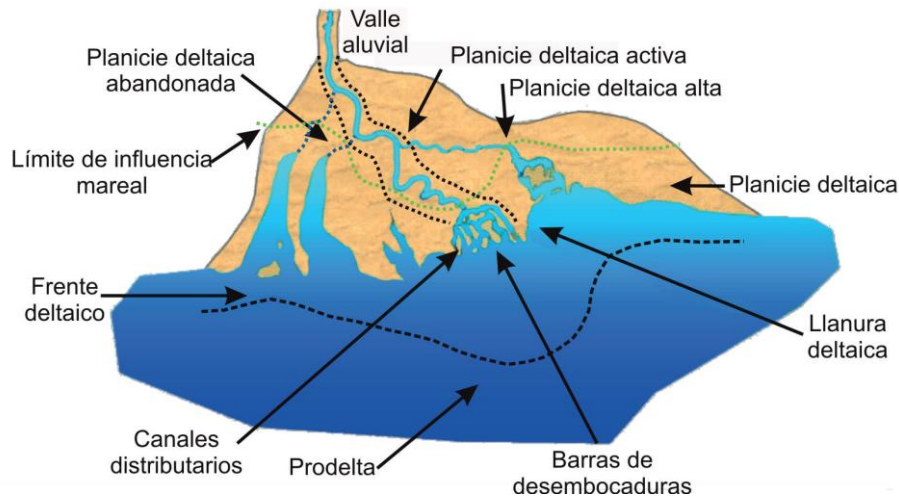


Figura 5. Principales componentes morfológicos y sedimentarios de un delta (tomado de Silva y Mendoza, 2015)

### 1.1.1. Ecosistemas en la zona costera

La heterogeneidad de formas junto con la dinámica costera favorecen el establecimiento de una gran diversidad de paisajes ecosistemas que están interconectados entre sí; y abarca ecosistemas terrestres, como dunas costeras, pastizales y selvas; ecosistemas dulceacuícolas como lagos de agua dulce y desembocaduras de ríos; ecosistemas herbáceos de agua dulce, como selvas inundables y tulares; ecosistemas salobres como manglares y marismas; y ecosistemas marinos como planicies de pastos marinos y arrecifes (Silva *et al.*, 2018). Entre os principales ecosistemas costeros se encuentran.

## Dunas costeras

Acumulaciones de arena proveniente de depósitos suministrada por corrientes oceánicas, como marea y oleaje, o por lagos y ríos. La formación de dunas inicia cuando la arena queda expuesta al aire el tiempo suficiente para secarse y ser movida por el viento, el cual debe tener una velocidad mínima de 4.5 m/s. Una vez que se inició el movimiento, es necesario un obstáculo que disminuya la velocidad del viento y permita que la arena sea depositada. Las plantas son un obstáculo efectivo ya que tienen la capacidad de crecer conforme la arena se acumula, ya que cuentan con estrategias para evitar ser enterradas, como son la formación de tallos y rizomas (Figura 6).

Las dunas costeras tienen ciclos naturales de erosión-restauración, lo que las coloca como barreras protectoras contra la intrusión marina durante tormentas. A medida que las dunas crecen y migran tierra adentro, toman diferentes formas como resultado de la acumulación de arena y su interacción con las plantas (Silva *et al.*, 2017).

De acuerdo a su cubierta vegetal, las dunas se pueden clasificar como sigue:

- *Dunas móviles*. Tienen poca o nula cubierta vegetal, la arena tiene una gran movilidad
- *Dunas semimóviles*. Tienen cubierta vegetal moderada, por lo que el movimiento de arena es menor
- *Dunas estabilizadas o fijas*. Cubiertas por vegetación casi en su totalidad, el movimiento de arena es prácticamente nulo.

Los sistemas de dunas están conformados por un mosaico complejo de dunas con diferente cobertura vegetal, en áreas relativamente pequeñas, lo que genera un incremento en la heterogeneidad ambiental y diversidad biológica (Silva *et al.*, 2017).

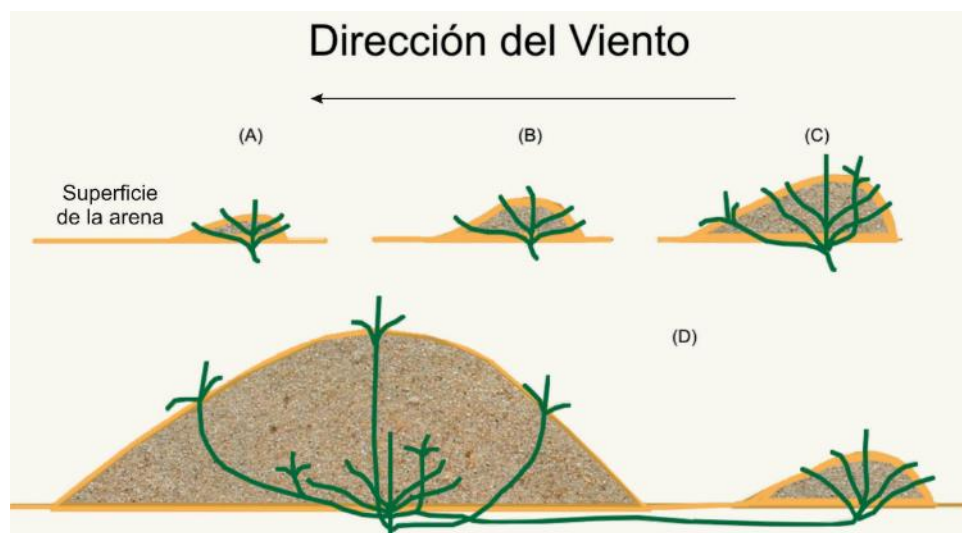




Figura 6. Desarrollo de una duna costera. La arena se acumula alrededor de la planta, cubriéndola por completo. En respuesta, la planta crece y funciona como un obstáculo de mayor tamaño que retiene más arena (tomado de Silva *et al.*, 2018)

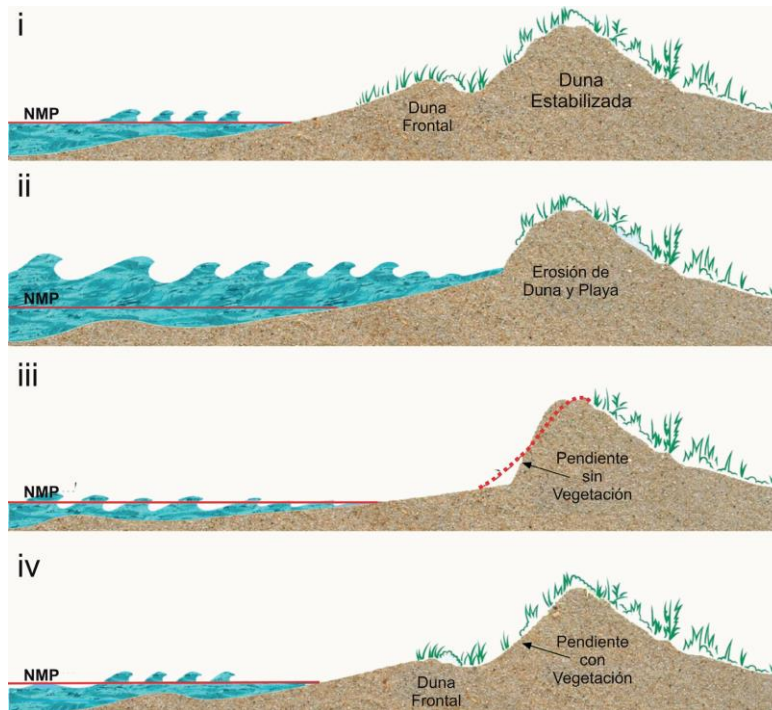


Figura 7. Ciclos de erosión-restauración de dunas costeras. En tiempos de clima tranquilo (i) las olas son moderadas. Rompen en la playa, depositan arena y se forman las dunas. Durante las tormentas (ii) se erosionan las playas y el primer cordón de dunas. Cuando regresa el buen tiempo (iii) las olas nuevamente depositan sedimentos en la playa. Con el tiempo, la vegetación vuelve a cubrir la duna (NMP = Nivel del mar Máximo Promedio) (tomado de Silva *et al.*, 2018)

## Humedales

Como su nombre lo indica, son sitios húmedos cuyo suelo se encuentra saturado de agua, es decir, tienen una superficie de agua sobre la superficie terrestre o a pocos centímetros debajo de la superficie. De acuerdo con la comisión RAMSAR de 1971, los humedales son todas aquellas extensiones de pantanos, marismas, turberas y superficies cubiertas de agua, ya sea de forma temporal o permanente, de forma estancada o corriente, dulces, salobres o saladas. También se incluyen las extensiones de agua marina cuya profundidad no supere los 6 metros (Marín y Hernández, 2013).

La hidrología, es decir la cantidad, la calidad y la estacionalidad de la inundación, es el factor ambiental principal que determina y afecta los humedales (Silva *et al.*, 2017). Existen diferentes tipos de humedales de acuerdo a su localización, régimen de inundación y tipo de vegetación. De manera general se pueden clasificar en (Figura 8).

- *Marinos y estuarinos.* Humedales ubicados en la zona costera. Su entrada de agua es principalmente salada o salobre. La salinidad es un factor más que produce heterogeneidad ambiental.

- *Lacustres*. Humedales situados en zonas represadas como lagos, y a los humedales que se originan a sus orillas.
- *Palustres*. Humedales con entrada de agua dulce, se ubican en los bordes de ríos, lagunas de agua dulce o planicies inundables.



Figura 8. Clasificación general de humedales. a) Humedal marino, Parque Nacional Galápagos. (Foto de Bolívar Erazo); b) humedal lacustre, Montebello, Chiapas, México (foto tomada de Rojas y Vidal, 2008) c) Humedal palustre (foto de SEMARNAT, 2017)

Entre todos estos ecosistemas existe una relación muy importante donde organismos juveniles de peces e invertebrados de diferentes especies pasan su periodo de larva y juvenil en zonas de manglares y pastos marinos. Una vez que llegan a la etapa adulta, migran a los arrecifes en donde se reproducen y liberan sus huevecillos. Pocas horas después las pequeñas larvas harán su viaje a los manglares y pastos en donde crecerán hasta alcanzar el tamaño necesario para poder regresar al arrecife y el ciclo vuelve a repetirse.

## Arrecifes

Comunidades marinas de aguas poco profundas cercanas a la costa dominada por comunidades coralinas y estructuras rocosas con una gran diversidad de especies de algas, invertebrados y peces. Los arrecifes están interconectados con otros ecosistemas ya que sus estructuras tienen el potencial de cambiar la velocidad y orientación de las corrientes marinas, lo que facilita el establecimiento de ecosistemas como manglares y pastos marinos (CONABIO 2012).

Los arrecifes se distribuyen dentro de la franja formada entre el Trópico de Cáncer y el Trópico de Capricornio, generalmente, en el lado oriental de los continentes. Esto se debe a que los grandes sistemas fluviales desembocan en la costa oeste de los continentes, arrastrando sedimento, el cual enturbia las aguas (Spalding *et al.*, 2001).

Se reconocen tres tipos de arrecifes (Figura 9):

- *Coralinos*. En este tipo de arrecife, los encargados de su formación y estructura son los pólipos de coral; estos organismos pertenecen al grupo de los cnidarios, como las medusas y anémonas. Los corales son colonias de animales de hasta miles de individuos llamadas coral. Al conjunto de varias colonias de diferentes especies de coral se les conoce como arrecife coralino. De acuerdo a su origen, configuración y su situación con respecto a tierra firme, se pueden clasificar en (Figura 10):



- *Arrecifes Costeros*: Se encuentran en aguas someras, bordeando la costa.
- *Arrecifes de barrera*: Se encuentran paralelos a la costa, pero alejados de ella por un canal que puede llegar a medir 100 metros de profundidad. Son de mayor tamaño que los costeros.
- *Arrecifes de plataforma*. Tienen forma aplanada y alargada en la parte superior debido a la acción del viento y las corrientes.
- *Atolones*. Anillos de islas de coral, generalmente se encuentran en mar abierto, asociados a conos volcánicos.



Figura 9. Tipos de arrecifes: a) Arrecife coralino en Quintana Roo, México, b) Arrecife rocoso en el Golfo de California, México, c) Arrecife artificial en el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano, México

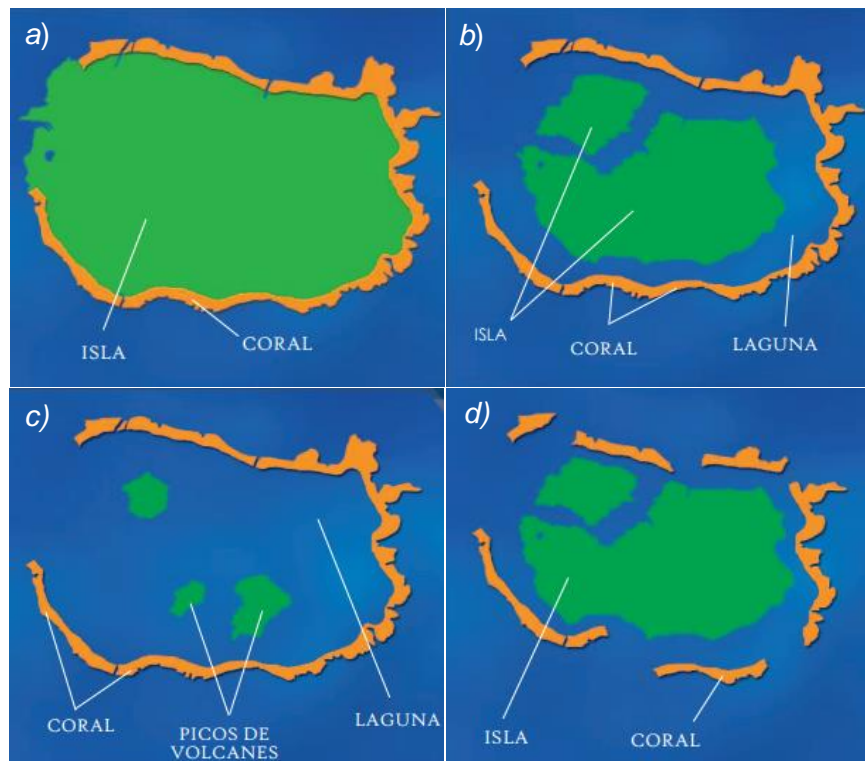


Figura 10. Tipos de arrecifes coralinos de acuerdo origen, configuración y su situación con respecto a tierra firme. a) Arrecifes costeros, b) Arrecifes de barrera, c) Arrecifes de plataforma, d) Atolones (tomada de Ortiz, 2005)

- *Rocosos*. Formados por bloques de roca de diferentes tamaños distribuidos en el fondo oceánico que sirve de sustrato a una gran variedad de algas e invertebrados y de refugio de peces.
- *Arrecifes artificiales*. Están constituidos por bloques de rocas de gran tamaño, barcos hundidos o pilotes de cemento. Estas estructuras sirven de refugio y sustrato de muchos organismos vertebrados e invertebrados. Tienen la función de disminuir la presión sobre los arrecifes naturales, además de ser sitios de refugio y reproducción de peces repobladores de otros arrecifes.

## Pastos marinos

Son ecosistemas dominados por plantas sumergidas bajo el agua marina, los cuales crecen fijándose a diferentes sustratos como lodo, arena, arcilla e incluso sobre rocas. Los pastos marinos generan y consolidan el sustrato disponible para la fijación de especies bentónicas, es decir, organismos que habitan el fondo de los ecosistemas acuáticos; además reducen el movimiento del agua creado por las corrientes y las olas, generando condiciones estables en el interior de las praderas. Las hojas de los pastos reducen el exceso de iluminación, protegiendo el fondo de la insolación y permitiendo el desarrollo de un microambiente en la base de los pastos. Una de sus principales funciones es ser sitio de crianza, refugio y alimentación de muchas especies de peces en etapas juveniles (CONABIO, 2012; Silva *et al.*, 2017).

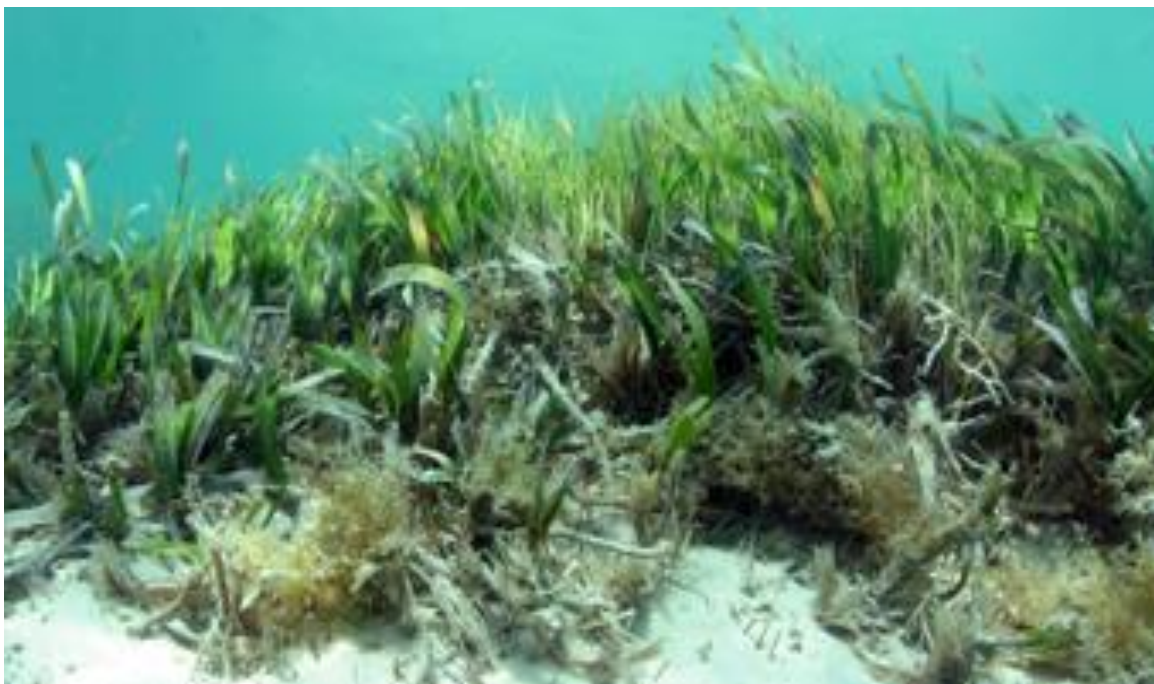


Figura 11. Pradera de pastos marinos en Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos, México (Tomada de CONABIO 2012)

Los pastos marinos se distribuyen en extensos y densos manchones bajo el agua, pueden estar formados por una sola especie o por varias. Se distribuyen en estuarios, marismas y

lagunas costeras, principalmente. Cada especie de pasto se distribuye en función de sus requerimientos y condiciones ambientales como son oleaje, corrientes, sustrato, salinidad, concentración de nutrientes, temperatura y penetración de luz solar (CONABIO, 2012)

El cambio de uso de suelo y la deforestación en las partes altas de las cuencas genera un aporte importante de sedimentos a los ríos que llagan a las lagunas en las partes bajas, incrementando la turbidez y disminuyendo la cantidad de luz incidente, lo que afecta la capacidad fotosintética y productividad de los pastos marinos (Silva *et al.*, 2017).

## Manglares

Son ecosistemas tropicales que están en contacto directo con el mar, por influencia de las mareas, y con el ambiente terrestre. Están compuestos, principalmente, por árboles que pueden llegar a medir hasta 30 metros; viven alrededor de bahías, lagunas costeras, estuarios y playas protegidas del oleaje y pueden abarcar extensiones de miles de hectáreas (Lara-Lara *et al.*, 2008; Silva *et al.*, 2017). Los manglares más diversos y de mayor tamaño se encuentran en sitios inundados por al menos ocho meses y con salinidades entre 10 y 20%. Por su extensión, son zonas estratégicas de crianza, refugio y alimentación de muchas especies de peces e invertebrados (Figura 12).

Su distribución a nivel local depende de la topografía del lugar, los periodos de inundación, la precipitación, las entradas de agua dulce y la temperatura. Mientras que su zonación depende de factores como salinidad, nivel de agua, pH, aporte de sedimentos, niveles adecuados de oxígeno, estrés hidrodinámico, competencia interespecífica y otros de carácter sucesional (Lara-Lara *et al.*, 2008).

Estos ecosistemas tienen un alto valor ecológico y económico, ya que en estos sitios se encuentran especies del ambiente terrestre y del marino, además de contar con otras especies que solo se desarrollan en ese hábitat y gran cantidad de especies comerciales (Domínguez, 2017). Además, aportan grandes cantidades de materia orgánica y son almacenadores de carbono, el cual se acumula tanto en la superficie aérea como en las raíces de profundidades de entre 3 y 6 m, dependiendo de los cambios del nivel del mar. Por otro lado, la hojarasca que aportan los manglares es procesada por microorganismos y consumida por peces, crustáceos y plancton (Silva *et al.*, 2017). Los manglares son ecosistemas muy dinámicos y con procesos ecológicos acelerados; sin embargo, son sumamente sensibles a las perturbaciones.





Figura 12. Manglar en Tecolutla, Veracruz, México

### II.3 Bienes y servicios provistos por los ecosistemas en la zona costera

Los servicios ecosistémicos se definen como: bienes y servicios que las personas obtienen del entorno natural. La diversidad de ecosistemas que presentan las zonas costeras representa un alto valor natural y económico. Debido a los servicios que proveen a la sociedad, se ha calculado que entre el 40% y 77% del valor calculado de los servicios ecosistémicos de todos los ecosistemas se concentran en estas zonas (Martínez *et al.* 2007; Costanza *et al.*, 2014; Flores-Balbuena, 2016). Estos servicios son fundamentales para el bienestar humano; a través de su uso directo y de manera indirecta, mediante servicios de apoyo y reguladores de otros ambientes (UNEP-WCMC, 2011) (Figura 13). Sin embargo, estos servicios se han visto disminuidos debido a la contaminación, la deforestación, al desmedido desarrollo costero, la sobrepesca, los desastres naturales y el cambio climático.

Los servicios que proveen los ecosistemas costeros se pueden clasificar en servicios de soporte, de provisión, de regulación y culturales, como se muestra en la Figura 14 (Rodríguez y Reul, 2011; Marín y Hernández, 2013).



Figura 13. Ejemplos de servicios ecosistémicos de los humedales en la zona costera

	DEFINICIÓN	EJEMPLOS
Servicios de soporte	Necesarios para la producción de todos los demás servicios ecosistémicos	Ciclo de nutrientes, formación de suelo, etc.
Servicios de provisión	Beneficios materiales que las personas obtienen de los ecosistemas	Alimentos, agua, productos bioquímicos, medicinas, fibras, madera y combustible
Servicios de regulación	Beneficios obtenidos de la regulación de los procesos ecosistémicos	Regulación de inundaciones, de la erosión, de enfermedades, entre otros
Servicios culturales	Beneficios inmateriales que las personas obtienen de los ecosistemas	Valores estéticos, recreación y ecoturismo,

Figura 14. Clasificación de servicios ecosistémicos por Evaluación del Milenio y ejemplos en la zona costera

### III. Definición de Infraestructura verde

Se ha calculado que aproximadamente 600 millones de personas, cerca del 10% de la población mundial, viven en zonas costeras que están a menos de 10 metros sobre el nivel del mar y cerca de 2400 millones de personas, aproximadamente 40% de la población mundial, viven a menos de 100 km de la costa (ONU, 2017). La concentración de asentamientos humanos provoca graves y acelerados deterioros en los ecosistemas costeros, los cuales son sumamente dinámicos y frágiles. Los deterioros generados sin diagnóstico y atención oportuna evolucionan hasta convertirse en importantes problemas sociales (Barragán, 2014), los cuales se traducen en pérdida de servicios ecosistémicos fundamentales (Mith-thapala, 2008; Agardy y Alder, 2010).

Por esta razón es de suma importancia tener mayor comprensión de las relaciones existentes entre capital natural y el bienestar humano; y, de esta manera, cambiar la visión tradicional de la conservación de la naturaleza y del desarrollo, como actividades incompatibles.

El concepto “infraestructura verde” no tiene una definición universal, ya que depende, principalmente, de las condiciones ecológicas y socioeconómicas de cada lugar (Silva *et al.*, 2017). Tanto la infraestructura verde como la infraestructura tradicional tienen en común que tratan de resolver un problema que afecta a los intereses humanos. Pero, a diferencia de la infraestructura tradicional, la cual toma en cuenta solo factores socioeconómicos y políticos; la infraestructura verde tiene principios multifuncionales. Es decir, tiene como base los conceptos de conectividad, multifuncionalidad, integración y multiescala (Davies y Laforzezza, 2017). En la zona costera, la infraestructura verde se encuentra estrechamente ligada a actividades de conservación, restauración y protección de sus ecosistemas.

Para que la implementación de infraestructura verde funcione, es necesaria una correcta planificación y gestión ambiental a nivel mundial. Así podrá desarrollarse y brindar resultados benéficos a nivel ambiental, económico y social (Figura 15) (Luque *et al.*, 2018).

Actualmente, el concepto de infraestructura verde abarca aspectos tan amplios y contrastantes como: la recuperación del funcionamiento de ecosistemas naturales; la creación de ecosistemas artificiales; las obras de ingeniería que dependen del funcionamiento de los ecosistemas circundantes; las obras de ingeniería tradicional con adaptaciones para disminuir el impacto ambiental y; las obras de corrección de estructuras que han causado daño en el medioambiente.

Los programas de infraestructura verde son tan variados como los son los problemas que aborda, así como los paisajes y las regiones en los que ocurren. A pesar de esto, la mayoría de los proyectos exitosos tienen en común algunos enfoques de planificación como:

1. Reunir a las partes interesadas.
2. Se basan en un profundo conocimiento de los procesos biofísicos y se acompañan por buenas prácticas.
3. Crean mecanismos para la toma de decisiones.
4. Establecen fuertes mecanismos de gobernanza.
5. Desarrollan una clara misión y visión.

6. Incluyen voluntad y apoyo político, también compromete a la sociedad a lo largo del proceso.

Una vez que una comunidad elige comenzar a planificar y desarrollar proyectos de infraestructura verde, estos pasos pueden ayudar a garantizar el éxito en el desarrollo y la preservación de los ecosistemas naturales (Silva *et al.*, 2017).

Beneficios ambientales	Beneficios económicos	Beneficios sociales
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Eficacia de los recursos naturales</li> <li>✓ Diagnóstico de las variables climáticas</li> <li>✓ Prevención de desastres naturales</li> <li>✓ Gestión de recursos (agua, suelo y territorio)</li> <li>✓ Mayor valor de hábitats naturales</li> <li>✓ Apoyo a la agricultura y silvicultura</li> <li>✓ Líneas de transporte y comunicación considerando los ecosistemas presentes en el medio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Mayor empleo</li> <li>✓ Mayor inversión</li> <li>✓ Aumento en el ecoturismo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Mayor calidad de vida</li> <li>✓ Disminución de enfermedades físicas y psíquicas</li> <li>✓ Mayor educación ambiental</li> </ul>

Figura 15. Principales beneficios de la infraestructura verde (modificado de Luque *et al.*, 2018).

### III.1 Tipos de infraestructura verde

Antes de abordar el concepto de infraestructura verde, resulta importante señalar que la infraestructura verde no necesariamente es sinónimo de soluciones blandas, ni soluciones rígidas son sinónimos de actuaciones grises. Con el objeto de ilustrar lo anterior, a continuación, se presentan algunos ejemplos:

- No siempre el uso de vegetación corresponde a una solución de infraestructura verde. Por ejemplo, en algunas condiciones la fijación con vegetación de dunas puede generar erosión en playas adyacentes (p.e. Sealey, 2011).
- Bajo ciertas circunstancias el uso de soluciones blandas puede inducir mayores problemas que el uso de infraestructura rígida. Frecuentemente el relleno artificial de playas implica un aumento de la turbidez y en las tasas de transporte de sedimentos, particularmente asociado al contenido de material muy fino. Cuando estos rellenos se realizan en las inmediaciones de arrecifes de coral, entre otros, el aumento en la turbidez del agua y efectos de fricción inducen la muerte de los pólipos. En estos casos es más conveniente la construcción de arrecifes artificiales (infraestructura rígida) que puedan servir de refugio para ciertas especies (p.e. las larvas de coral) y así ofrecer las condiciones para el establecimiento de un ecosistema.



Es por ello que el concepto de infraestructura verde que se utiliza en el presente trabajo está orientado al funcionamiento, teniendo como grandes pilares la mimetización y la conectividad de los ecosistemas.

Basado en el esquema de van der Nat *et al.* (2016), se identifican cinco tipos de infraestructura verde de acuerdo con su grado de naturalidad: 1) Basado en ecosistemas; 2) Ecosistemas asistidos; 3) Ingeniería blanda mejorada; 4) Infraestructura rígida mejorada y 5) Desmantelamiento/reubicación de estructuras. En la Figura 16 se encuentra una clasificación propuesta de los tipos de infraestructura verde costera, de acuerdo a su grado de naturalidad (Silva *et al.*, 2017). Es conveniente destacar que es común implementar soluciones híbridas que combinan más de una de este tipo de infraestructuras.

La factibilidad de implementación de un proyecto de infraestructura verde dependerá de las características del sitio (Ruckelshaus *et al.*, 2016) y de los recursos ecosistémicos disponibles, como se abordará en las siguientes secciones. En términos generales, la tendencia de los requerimientos para cada tipo de infraestructura verde es la mostrada en la Figura 17. En ella se observa que, a mayor grado de naturalidad de la solución, el tiempo y el espacio requerido aumenta, y el costo disminuye. Por otro lado, en cuanto a la incertidumbre del resultado de la solución, éste será mayor conforme aumente el grado de naturalidad.



Figura 16. Tipos de infraestructura verde



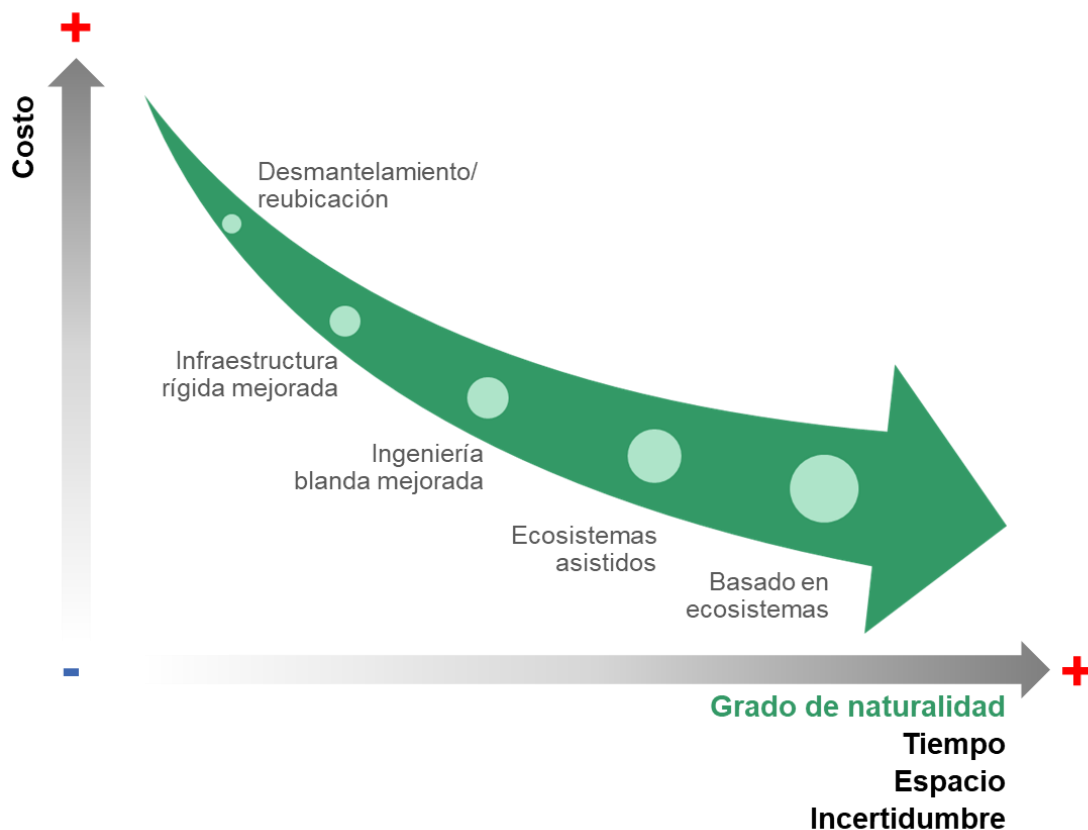


Figura 17. Elementos generales de decisión para la selección del tipo de infraestructura verde

### III.2 Oportunidades en ALC

América Latina y el Caribe (ALC) tienen una gran biodiversidad con muchas oportunidades para la implementación de infraestructura verde. Los 33 países que integran ALC son muy diversos en cuanto a tamaño y nivel de desarrollo económico; con índices de desarrollo humano (HDI) tan variado, como Haití con un HDI de 0,45 hasta Chile con 0,82; sin embargo, todos se consideran como “países en desarrollo” (Silva *et al.*, 2017). Esta región es rica en recursos naturales, además abarca a seis de los diez países con mayor biodiversidad a nivel mundial. A pesar de que estos recursos no están distribuidos de manera uniforme, la riqueza natural y la importancia económica de los ecosistemas y el capital natural de toda ALC son innegables (Mittermeier *et al.*, 1998; PNUMA, 2016).

En esta región se comparten una serie de desafíos comunes entre los que se encuentran el aumento poblacional, necesidad de crecimiento económico y la degradación de ecosistemas, en especial los ecosistemas costeros. En 2010 se calculó que aproximadamente 32.6 millones de personas vivían en zonas costeras, a menos de 1m metros sobre el nivel del mar; y se prevé que este número aumentará hasta llegar a más de 96 millones para el 2100 (Silva *et al.*, 2017). Entre otros problemas comunes que se generan en estos sitios se incluyen la ocupación de áreas en riesgo, por ejemplo, zonas de inundación, erosión y deslizamiento de tierra; falta de planificación urbana costera y la corrupción generalizada. La principal consecuencia del cambio de uso de suelo, mal

planeado, en la zona costera, es la degradación de los ecosistemas costeros, principalmente, la regulación de inundaciones y el control de la erosión. Por otro lado, algunos de los efectos negativos del uso extenso e inadecuado de las zonas costeras, se debe a la implementación de proyectos costeros correctivos, como rellenos y reconstrucción de playas, los cuales son sumamente costosos de mantener (Silva *et al.*, 2016).

Esta creciente presión sobre las zonas costeras de América Latina y el Caribe debe impulsar el mejoramiento del uso y manejo de las costas (Silva *et al.*, 2017). Existen instituciones multilaterales, como el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), los cuales otorgan préstamos y donaciones a países de ALC con el objetivo de proteger sus ecosistemas y hábitats naturales y, de esta manera, mejorar la resiliencia de sus costas para enfrentar fenómenos como el incremento del nivel del mar y tormentas extremas. Además, se está explorando la rentabilidad de la infraestructura verde como parte de las estrategias de protección para los tomadores de decisiones del sector privado, preocupados por la seguridad de sus propiedades físicas (Gordon *et al.*, 2014).

### **III.3 Marcos internacionales**

El reciente interés de integrar uso de los ecosistemas costeros a las soluciones de protección contra riesgos de inundación y erosión ha provocado que, en diferentes países e instituciones internacionales, se desarrollen diversas políticas guía de actuación. En la Figura 18 se mencionan algunas de estas políticas.

<p><b><i>Building with Nature: Países Bajos</i></b></p> <p>Tiene como objetivo reunir conocimientos sobre los ecosistemas y desarrollar lineamientos de diseño para la infraestructura en alineación con los procesos naturales.</p>	<p><b><i>Engineering with Nature: EUA</i></b></p> <p>Tiene como objetivo incorporar características naturales y características basadas en la naturaleza (creadas por diseño humano) en la ingeniería tradicional.</p>
<p><b><i>Living Shorelines: EUA</i></b></p> <p>Tiene como objetivo encontrar soluciones que protejan las áreas costeras de las tormentas y la erosión al tiempo que brindan servicios de los ecosistemas y preservan la conectividad de los ecosistemas.</p>	<p><b><i>Shoreline Management Plans: Reino Unido</i></b></p> <p>Desarrolla estrategias para reducir la amenaza de inundaciones y erosión con posibles beneficios para el medio ambiente, la sociedad y la economía.</p>
<p><b><i>Nature-based solutions: IUCN</i></b></p> <p>Medidas basadas en los ecosistemas para abordar los desafíos de la sociedad mediante la protección, gestión o restauración de ecosistemas y el uso de sus servicios.</p>	<p><b><i>Nature-Based Solutions and Re-Naturing Cities: Unión Europea</i></b></p> <p>Con el objetivo de mejorar la urbanización sostenible, restaurar los ecosistemas degradados, desarrollar la adaptación y mitigación del cambio climático y mejorar la gestión de riesgos y la capacidad de recuperación.</p>
<p><b><i>Ecological Engineering: Varios</i></b></p> <p>Estrategias de adaptación costera que combinan las estructuras de ingeniería y los ecosistemas en consideración a las funciones sociales para una protección costera mayor y más flexible.</p>	<p><b><i>Working with Nature: PIANC</i></b></p> <p>Desarrolla soluciones para la infraestructura de transporte acuático, que son mutuamente beneficiosas para los actores del proyecto y ambientales.</p>

Figura 18. Políticas internacionales para el uso de ecosistemas en la ingeniería costera (IUCN: *The International Union for Conservation of Nature*; PIANC: *Permanent International Association of Navigation Congresses*)

## IV. Alternativas más utilizadas de infraestructura verde

En la implementación de proyectos de infraestructura verde se utilizan técnicas muy variadas que dependen del sitio a ser intervenido, de las causas y magnitud del problema a ser resuelto, así como de los ecosistemas que se encuentran alrededor. Es así que los proyectos de infraestructura verde involucran estrategias tan variadas y contrastantes como la restauración o la creación de ecosistemas artificiales. En la Figura 19 se muestran algunas de las técnicas más utilizadas.

Restauración	Revertir la degradación y restablecimiento de un ecosistema que antes existía
Rehabilitación	Recuperar alguna función o servicio provisto por un ecosistema pero no su condición original
Reintroducción	Introducir organismos desde una fuente externa hacia un sitio donde fueron eliminados
Remediación	Remover contaminantes causando el menor daño posible a través de métodos químicos, físicos o biológicos.
Reclamación	Crear un ecosistema funcional nuevo en un sitio severamente degradado

Figura 19. Definiciones de algunas de las técnicas utilizadas en los proyectos de infraestructura verde

En la Figura 20, se muestran los alcances de las intervenciones más comunes (restauración, rehabilitación, reintroducción y diseño de ecosistemas) en términos de la recuperación de la salud, integridad y sustentabilidad a largo plazo de los ecosistemas costeros como arrecifes, playas, dunas y manglares. Se observa que las actividades enfocadas en la restauración tienen mejores resultados en todos los casos. En contraste, cuando un sitio está severamente degradado, es difícil recuperar la dinámica natural y en los casos en lo que esto no es posible, el sistema debe ser reemplazado. A pesar de ello, se pueden recuperar algunos servicios ecosistémicos y se debe intentar que el ecosistema diseñado sea lo más parecido al ecosistema original.

		Acciones			
		Restauración	Rehabilitación	Reintroducción	Diseño de ecosistemas
		Recuperación de trayectoria histórica del ecosistema	Recuperación parcial del ecosistema	Reforzamiento para que el sistema se auto-regenere	Retorno a un ecosistema productivo pero distinto del original
Recuperación de salud	Ciclos biogeoquímicos	Muy buena	Buena	Muy buena	Baja
	Interacciones bióticas	Muy buena	Media	Buena	Baja
Recuperación de integridad	Composición de especies	Muy buena	Buena	Buena	Baja
	Estructura del ecosistema	Muy buena	Baja	Buena	Media
Sostenibilidad a largo plazo	Capacidad de resistencia a la perturbación	Muy buena	Baja	Muy buena	Baja
	Capacidad de auto-regeneración	Muy buena	Baja	Buena	Baja

Figura 20. Técnicas de recuperación de ecosistemas y alcances de cada una en función de la salud, integridad y sostenibilidad de los ecosistemas (modificado de Martínez *et al.* 2014).

Las intervenciones enfocadas en la restauración tienen como objetivo iniciar o acelerar la recuperación de un ecosistema degradado, enfocándose en el restablecimiento de la salud, integridad y resiliencia del sistema intervenido (Aronson *et al.*, 2016). Estos objetivos hacen que la restauración sea una de las tareas más complejas. Es entendido que la recuperación de un ecosistema a un estado prístino es casi imposible por lo que se suelen definir estados deseables en donde las acciones están dirigidas a lograr que el sistema intervenido recupere su trayectoria histórica. Los estados deseables y trayectorias históricas son definidos con base en sitios de referencia, información histórica, entre otras fuentes (SER, 2004; Moreno-Casasola, 2010).

También, debido a que los recursos económicos son limitados, debe evaluarse la necesidad y factibilidad de cada intervención. En este caso, la factibilidad de una restauración puede ser determinada evaluando algunos factores, por ejemplo, el tipo de perturbación (crónica

o episódica) que dio origen al problema, la capacidad para eliminar las causas de la perturbación, la disponibilidad de elementos (bióticos y abióticos) que faciliten la restauración, entre otros (Figura 21).

En los casos en los que la restauración no es posible o conveniente, otras alternativas como la rehabilitación o el diseño de ecosistemas debe ser considerada.

El éxito de un esfuerzo de restauración, rehabilitación o reemplazo se puede medir de muchas maneras. Sin embargo, la mayoría de las veces se eligen indicadores relacionados con los lineamientos de la restauración ecológica. Éstos han sido aceptados por una buena proporción de la comunidad de expertos en este campo. Los indicadores hacen referencia a tres características de los ecosistemas: integridad, salud y sustentabilidad del sistema intervenido (Figura 22).

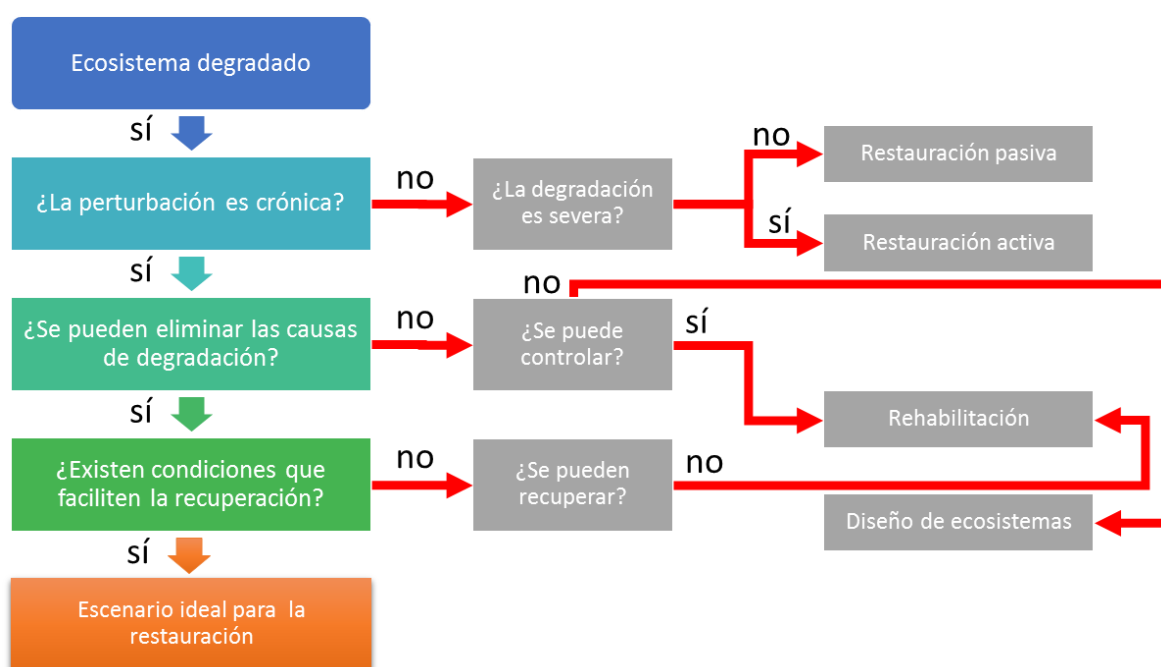


Figura 21. Factores que pueden determinar la factibilidad de una restauración (modificado de Lithgow *et al.*, 2013).

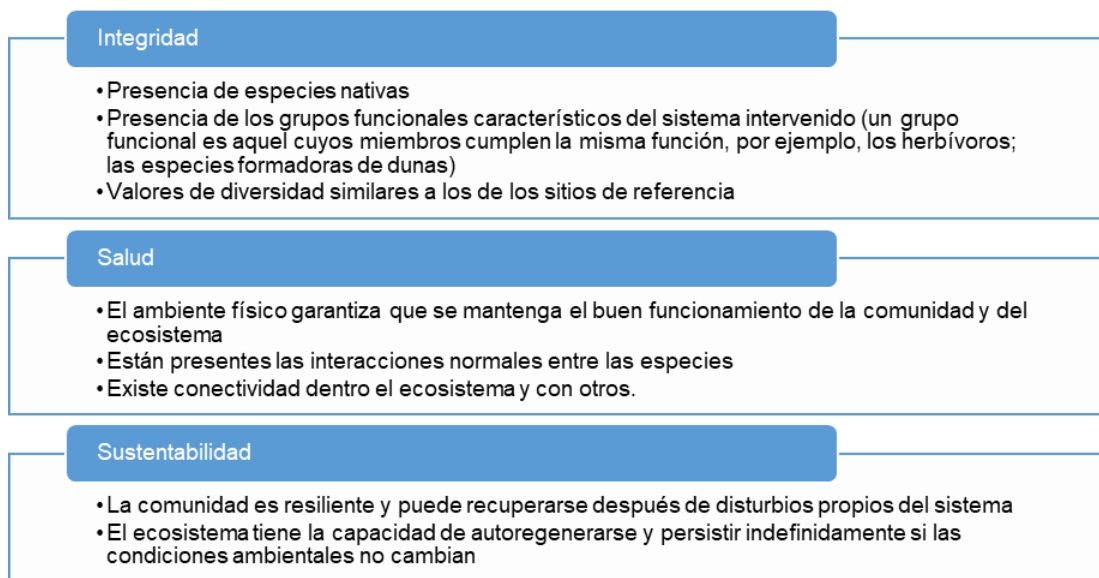


Figura 22. Algunos indicadores que pueden ser utilizados para determinar el éxito de una intervención basada en la restauración

Las técnicas de restauración, rehabilitación, reintroducción y diseño de ecosistemas son aplicadas en todos los ecosistemas, incluyendo los ecosistemas costeros. A continuación, se presentan algunos ejemplos y consideraciones que deben tenerse en cuenta cuando se implementan proyectos en ecosistemas altamente dinámicos

## IV.1 Playas y dunas

Las playas y dunas costeras están estrechamente interconectadas, al grado que en ocasiones simplemente se abordan como un único sistema. Desde el punto de vista funcional, las dunas actúan como reservorio de arena de las playas después de episodios extremos como tormentas. Es así como una playa con dunas tiene una mayor capacidad de recuperación, después de eventos extremos, que una sin dunas (Gómez-Piña *et al.*, 2007; Ley *et al.*, 2007).

Una vez que las dunas han sido degradadas, pueden recuperarse siguiendo diferentes estrategias, dependiendo si la degradación es episódica o crónica. Algunas de las situaciones en las que se realizan actuaciones para la reconstrucción dunar son: brechas en el cordón dunar; desaparición de tramos de cordón de dunas; desaparición total del cordón dunar; construcción de cordones dunares “*de novo*”.

La elección de la estrategia a seguir depende fuertemente del factor que haya causado su degradación, de la capacidad de controlarlo y de las condiciones locales. Con independencia del sitio de la intervención, las dunas comparten ciertas características que están relacionadas con su conexión con el mar. Entre estas características destacan la acumulación de arena por el viento, una alta movilidad de la arena, las inundaciones esporádicas con agua salada, el spray salino, entre otras. La salinidad del sustrato, su alta permeabilidad y el bajo contenido de nutrientes son factores que determinan el tipo de especies que pueden establecerse en estos ambientes (Hesp y Martínez, 2008).

Los pasos para la recuperación de dunas consisten en la identificación de las causas y posibles soluciones. Una vez que estas causas han sido controladas, se inicia la reconstrucción de la topografía de la duna. Cuando los montículos de arena han sido formados, se da inicio a la revegetación con especies locales. Estas especies pueden ser recolectadas con cuidado de sistemas vecinos y reproducidas en invernaderos locales (Figura 23).

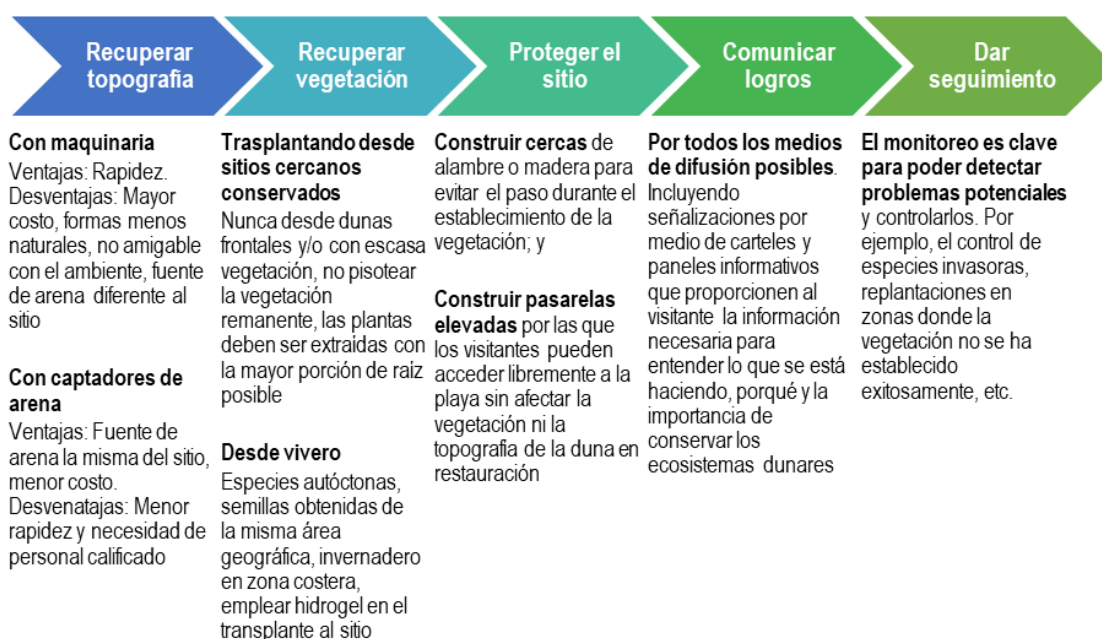


Figura 23. Pasos para la restauración de dunas

Una de las ventajas de la restauración de dunas es que, al ser ecosistemas altamente dinámicos, pueden tenerse resultados en un periodo corto de tiempo (Ley *et al.*, 2007).

En el contexto de la infraestructura verde, las dunas pueden ser recuperadas en dos escenarios. El primero considera que la perturbación puede ser controlada y que se cuenta con suficiente tiempo para actuar. Este escenario permite la simulación de los procesos naturales de acumulación de arena, por ejemplo, con captadores de arena contruidos con materiales locales. Además, se necesita una baja inversión, en relación con los resultados obtenidos. Una desventaja es que los resultados se pueden observar hasta algunos meses después de la instalación de captadores. El tiempo oscila dependiendo de diversos factores, entre ellos, la climatología, la dinámica sedimentaria, la efectividad de la protección, entre otros.

Los captadores de arena son barreras, contruidas de diversos materiales, que interceptan el sedimento transportado por el viento y ocasiona que se deposite en la base de los mismos. Los captadores de arena son muy útiles tanto en la formación de nuevos cordones como para reparar los existentes, por ejemplo, para cerrar brechas.



Los captadores mimetizan la función de la vegetación pionera en la construcción de cordones dunares (Figura 24) y su ubicación suele ser en la posición donde debería estar el cordón embrionario (Ley *et al.*, 2007). La eficiencia de un sistema de captadores en la acumulación de arena depende de la porosidad, altura, distancia entre ellos, así como características del sitio en donde se establecen (Nordstrom, 2003).

En general, los captadores porosos y flexibles son los más utilizados. Los captadores porosos se prefieren porque forman depósitos más estables que los sólidos o continuos (Ranwell y Boar, 1986; Gafals-Soto, 2010). Por su parte, los captadores flexibles producen dunas con una topografía más aerodinámica y estable que los rígidos y las dunas formadas así son colonizadas más fácilmente. En contraste, los captadores rígidos son utilizados cuando se necesita construir depósitos provisionales en la playa seca para evitar la llegada de marejadas (Gafals-Soto y Nordstrom, 2009).

<b>Balance sedimentario</b>	<b>Construcción del cordón dunar</b>
Acumulativa	Siguiendo la tendencia natural se debe reconstruir avanzado hacia el mar.
Estable	Se debe reconstruir en el mismo sitio donde se sitúa el cordón dunar preexistente.
Regresivo	Se debe reconstruir avanzado hacia el interior detrás del primer frente dunar.

Figura 24. Posibilidades de reconstrucción del cordón dunar en relación con el balance sedimentario del sector costero (modificado de Ley *et al.*, 2007).

En contraste, se emplean técnicas basadas en ecosistemas asistidos o de ingeniería suave cuando se necesita proteger elementos en la línea de costa con un alto valor económico, social, cultural (por ejemplo, sitios arqueológicos), e incluso natural (por ejemplo, Áreas Naturales Protegidas) (Figura 45). Estas obras requieren una inversión mucho mayor pero el tiempo de ejecución es menor y con frecuencia se realizan en semanas. En este tipo de intervenciones debe tenerse en cuenta que, para considerarse una obra de infraestructura verde, los impactos ambientales, producidos en las zonas de extracción de arena, deben ser minimizados.

Basada en ecosistemas o Ecosistemas asistidos	Ecosistemas asistidos o Ingeniería blanda
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La topografía se recupera con sistemas de captadores de arena que simulan procesos naturales</li> <li>• La arena que se utiliza proviene del sistema</li> <li>• Se emplea con frecuencia cuando se cuenta con suficiente tiempo para que los captadores de arena funcionen.</li> <li>• Es una acción con resultados a medio plazo, requieren gran espacio aunque poca inversión</li> <li>• No tienen impacto ambiental significativo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se utiliza maquinaria para reconstruir la topografía dunar</li> <li>• Las fuentes de arena puede estar o no en el sistema dunar objeto de la actuación.</li> <li>• Se emplea cuando el objetivo de la reconstrucción dunar es la protección de algún elemento de gran valor económico, social, cultural o incluso natural, situados en primera línea de costa.</li> <li>• Generalmente, son actuaciones realizadas en plazos de tiempos breves (días-semanas), limitadas en el espacio y que requieren una elevada inversión económica.</li> <li>• El impacto ambiental es elevado en aquellas zonas que actúan como fuente de arena y en los emplazamientos de las nuevas dunas.</li> </ul>

Figura 25. Recuperación de dunas en proyectos de infraestructura verde (modificado de Ley *et al.*, 2007).

La revegetación con especies dunares se implementa una vez que la topografía ha sido recuperada. En los casos de infraestructura basada en ecosistemas con enfoque en restauración, se suelen plantar solo algunas especies pioneras y esperar a que las demás especies lleguen desde parches cercanos en mejor estado de conservación.

En proyectos que requieren mayor intervención, la revegetación suele ser más intensiva, plantando con mayor densidad e, idealmente, con un mayor número de especies. En este caso debe procurarse la utilización de más de una especie y/o dejar espacio suficiente entre las plantas para permitir que otras especies propias del sistema puedan colonizar.

En ambos casos, se necesita la protección de las dunas recuperadas. Esto es de especial relevancia porque las presiones ejercidas por actividades de los visitantes (efecto de las pisadas, paseos a caballo y uso de vehículos todoterreno) suelen abrir brechas que van fragmentando los cordones dunares. En especial, el pisoteo es un grave problema porque produce pasillos de deflación que disminuyen la resistencia de la duna. Estos pasillos se forman en lugares donde se abre un camino o brecha y la arena se encuentra compactada. Aquí, el viento encuentra menor resistencia, se encañona y adquiere mayor velocidad, produciendo erosión en los laterales del camino. De esta manera, los pasillos cada vez se hacen más profundos y van fragmentando los cordones.

En respuesta, la recuperación de dunas suele estar acompañada por la construcción de pasarelas, preferentemente elevadas, para conducir a los visitantes hasta la playa sin comprometer la inversión en la obra de recuperación de dunas.

Así mismo, este tipo de intervenciones necesitan algún tipo de monitoreo para detectar momentos en los que podrían necesitar mantenimiento, por ejemplo, la reintroducción de especies.

Algunos problemas durante la revegetación pueden surgir cuando no se tiene el reclutamiento de las especies deseadas, se tienen bajas tasas de supervivencia, se establecen especies no deseadas o exóticas que podrían comprometer el proyecto. Esto es de vital importancia durante los primeros años de las actuaciones.

Además, se suelen hacer extensas campañas de difusión que permiten entregar información a los usuarios y disminuir las posibilidades de vandalismo. Entre los esfuerzos de difusión se encuentran talleres de educación ambiental, señalética, entre otros.

El involucramiento de actores locales durante la revegetación, monitoreo y en las labores de educación ambiental tienen una fuerte influencia en el éxito de este tipo de proyectos.

## **IV.2 Manglares y otros humedales costeros**

Los humedales herbáceos y arbóreos, como manglares, tienen una alta dependencia de los flujos de agua. Los suelos de estos ecosistemas suelen estar sobre sustratos saturados de manera permanente o estar cerca del manto freático. En consecuencia, todas las obras de infraestructura verde en los que se planea utilizar a estos ecosistemas deben iniciar por la recuperación de los flujos de agua que los alimentan (Escalona *et al.*, 2009; Moreno-Casasola, 2010; Landgrave y Moreno, 2012).

La recuperación de los flujos de agua puede hacerse de manera manual, cuando solo se necesita hacer limpieza de maleza, o retiro de basura que impida el flujo de agua. Sin embargo, las acciones más frecuentes suelen incorporar el uso de maquinaria pesada para abrir canales y reconectarlos con los flujos principales.

Entre los beneficios obtenidos de la recuperación de humedales se encuentran el mejoramiento de la calidad de agua, regulación de inundaciones y provisión de recursos alimentarios. Además, la recuperación, da lugar a la formación de empleos locales durante su implementación, mano de obra, y después de la misma, ecoturismo. En estos esfuerzos se deben considerar los aspectos presentados en Figura 26.

### **IV.2.1 Restauración**

Alrededor del mundo existen numerosos proyectos de restauración de humedales, esto se debe a la creciente necesidad de recuperar el valor ecológico y socioeconómico de estos ecosistemas. Cada proyecto de restauración es único y necesita de una planeación detenida para reducir la posibilidad de la aparición de efectos secundarios indeseados (Moreno-Casasola, 2009).

Antes de iniciar la restauración de un ecosistema, se deben identificar las razones por las cuales una intervención es necesaria. Las intervenciones relacionadas con infraestructura verde tienen como objetivo recuperar ciertos servicios que el ecosistema proveía, pero cuya calidad y cantidad disminuyó debido a la degradación del sistema en cuestión.

La decisión de llevar a cabo un proyecto de restauración es de suma importancia, ya que los cambios que se generen deben ser sostenibles a largo plazo. Además, la intervención de ecosistemas que no lo necesitan es considerado como una perturbación. Por lo tanto,

antes de cualquier intervención se debe de cumplir con alguno de los supuestos de la Figura 27.

Después, debe hacerse un diagnóstico adecuado y evaluarse la posibilidad de detener o disminuir los factores de perturbación y estrés del sistema.

Las primeras acciones de restauración deben estar enfocadas en recuperar los flujos naturales del humedal. En medida de lo posible, se deben aplicar principios de infraestructura verde, en lugar de métodos que requieran infraestructura gris.

Además, se debe considerar que los humedales están interconectados con otros ecosistemas a través de, por ejemplo, de flujos de agua y de sedimentos. Es por ello que la restauración de humedales debe tomar en cuenta la relevancia de los hábitats de tierras altas y la interconexión entre ambos.

En la Figura 28 se muestran algunos pasos a seguir en una restauración de humedales. Entre ellos se encuentra el adecuado diagnóstico de los niveles de perturbación, la identificación del origen de la perturbación, las fuentes de agua que recibe el humedal, los hidro periodos, así como los posibles efectos de la intervención (López *et al.*, 2009; Moreno-Casasola, 2009).

<b>Localización del humedal</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Restaurar es más fácil que crear un humedal donde antes no existía por el tipo de sustrato existente. Además, es posible que existan fuentes cercanas de semillas y condiciones hidrológicas apropiadas.</li> </ul>
<b>Evaluación del paisaje</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los humedales tienen mayor posibilidad de ser recuperados y proveen un mayor número de servicios si se encuentran interconectados con otros humedales. paisajes tienen patrones naturales que maximizan el valor y función de hábitats individuales.</li> </ul>
<b>Conocer la hidrología del sitio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se necesitan hacer estudios detallados sobre los flujos de agua permanentes, temporales, superficiales y subterráneos. Esto se debe a que necesitan suelos saturados, por lo menos, parte del año. Estos aspectos son importantes para la productividad del humedal y para que la flora se establezca</li> </ul>
<b>Uso de suelo en el sitio y en la zona de influencia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se debe considerar el uso de suelo actual y planeado para la zona a intervenir y para las zonas de las que depende. En este tipo de intervenciones se suelen comprar tierras adicionales para proveer una zona buffer.</li> </ul>
<b>Conocer la dinámica en lluvias y secas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se deben identificar aquellas zonas que se inundan y cuáles es la dinámica de estas zonas en época de secas</li> </ul>
<b>Caracterización del suelo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La determinación de ciertas características del suelo es indispensable. Por ejemplo, permeabilidad, textura y estratigrafía. Se debe considerar que es poco probable que los suelos muy permeables sean capaces de mantener un humedal a menos que los flujos de entrada sean excesivos..</li> </ul>
<b>Fuentes de semillas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se deben identificar zonas conservadas desde las que se puedan obtener semillas de plantas que se han desarrollado en las mismas condiciones hidrológicas.</li> </ul>
<b>Existencia de material e infraestructura necesaria</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Este tipo de intervenciones suele requerir mover una gran cantidad de material por lo que se debe contar con semillas, plantas y accesos al área. Esta parte es fundamental durante el periodo de modificación de las condiciones de topografía.</li> </ul>
<b>Levantamiento de inventarios florísticos y faunísticos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estos inventarios facilitan la elección de especies a ser introducidas así como la identificación de aquellas que se espera que se establezcan.</li> </ul>

Figura 26. Aspectos a considerar en la recuperación y creación de humedales costeros

<b>La recuperación natural no es posible o será demasiado lenta</b>	Esto se debe a que se han perdido los componentes principales y esenciales del ecosistema como el suelo o modificado el hidropereodo.
<b>Existe una perturbación crónica</b>	El factor de disturbio es persistente. Por ejemplo, descarga de nutrientes, cuerpos de agua contaminados.
<b>Fragmentación del paisaje</b>	La matriz del paisaje puede estar fragmentada aunque el sitio no tenga señales de degradación grave. La fragmentación del paisaje funciona como una barrera entre el sitio a intervenir y las fuentes de flora y fauna. Por lo tanto, la colonización natural puede ser muy lenta o imposible.

Figura 27. Supuestos que deben cumplirse antes de decidir intervenir un manglar. Basado en López *et al.*, 2009.

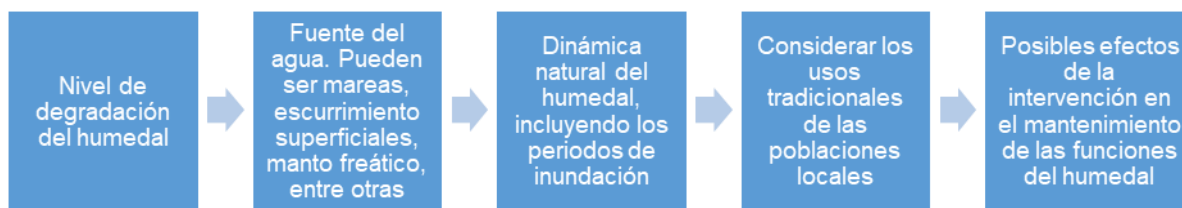


Figura 28. Elementos para considerar durante la restauración de un humedal costero

Aunado a lo antes mencionado, la planificación de restauración de humedales debe incorporar, en la medida de lo posible, el conocimiento de la gestión tradicional de los recursos que contribuyeron a la configuración del paisaje. Debido a la alta dependencia que tienen las comunidades locales de los humedales, es necesaria la incorporación de los conocimientos tradicionales y las prácticas de recolección sostenibles por la población local (RAMSAR, 2018).

A pesar de que se deben considerar un gran número de condiciones antes de intervenir un humedal degradado, los beneficios de su recuperación son muy importantes.

Un humedal restaurado logra mejorar las condiciones sanitarias, el suministro y calidad de agua, los recursos alimentarios e hídricos esenciales. También genera actividades recreativas y de ecoturismo; así como el mejoramiento de los valores paisajísticos, las posibilidades educativas, la conservación del patrimonio cultural (sitios de interés histórico o religioso), entre otros beneficios.

Para realizar una restauración exitosa se debe tener en cuenta los aspectos de la Figura 29.

#### Identificar un sitio donde hayan existido humedales

- Buscar un sitio donde hayan existido humedales o que estén cerca de uno hace más probable que el sustrato sea adecuado, que haya fuentes cercanas de semillas y que existan las condiciones hidrológicas apropiadas.

#### Considerar la posición y conectividad del humedal con respecto al paisaje

- Los paisajes tienen patrones naturales que aumentan el valor y función de hábitats individuales. Los humedales aislados funcionan de manera muy diferente a aquellos vinculados con arroyos o planicies de inundación.

#### Conocer flujos hidrosedimentarios del sitio.

- Esto incluye la determinación de la interacción potencial entre el manto freático y el humedal en cuestión. Se requieren suelos saturados por lo menos parte del año y tomar en cuenta las mareas.

#### Localizar un sitio con inundaciones naturales frecuentes.

- Se debe conocer los comportamientos extremos de sequía y de inundación del sitio.

#### Disponibilidad de espacio para restaurar el humedal

- Asegurar que hay suficiente tierra para asegurar los objetivos.

#### Inspeccionar y caracterizar los suelos con detalle.

- Esto con el fin de determinar su permeabilidad, textura y estratigrafía. Suelos muy permeables no podrán mantener un humedal.

#### Capacidad de recuperar suelos

- Los suelos son muy importantes para la productividad del humedal y para que la flora se establezca.

#### Evaluar la viabilidad de bancos de semillas.

- La evaluación de la disponibilidad de semillas en el sitio y en sitios cercanos ayuda a asegurar que los individuos plantados sean apropiados para las condiciones hidrológicas del sitio.

#### Revisar si el humedal está en el camino de pasos migratorios.

- Para potenciar la presencia de fauna y pesca.

#### Determinar la tenencia de la tierra

- Tomar en cuenta el uso del suelo alrededor del sitio escogido y los futuros planes de desarrollo del suelo.

#### Asegurar que se tiene en existencia el material necesario.

- El material incluye desde las semillas y las plantas hasta la existencia de accesos al sitio. La infraestructura (caminos, energía eléctrica, etc.) es muy importante durante el periodo de modificación de las condiciones de topografía.

#### Evaluar el tipo de labor que se necesita.

- Se debe identificar si hay posibilidad de usar maquinaria, o si el trabajo debe hacerse con base en mano de obra.

Figura 29. Elementos que determinan la factibilidad de una restauración de un humedal costero

## IV.2.2 Rehabilitación

Como se ha mencionado anteriormente, la rehabilitación se enfoca en la recuperación de solo algunos procesos, funciones y servicios de interés. Este tipo de intervenciones se llevan a cabo cuando el sistema está tan degradado que la restauración no es posible. No obstante, una rehabilitación podría dar lugar a una restauración si se logran recuperar los elementos básicos del ecosistema intervenido. La rehabilitación de un humedal se refiere a la recuperación parcial de éste e incluye actividades enfocadas en la rectificación o acondicionamiento de algunos elementos (Rosselli *et al.*, 2008). Entre las principales actividades de rehabilitación de humedales se encuentran la regeneración hídrica y el manejo de la vegetación existente y deseada (Figura 30).





Figura 30. Algunos objetivos de la regeneración hídrica y el manejo de la vegetación, principales actividades en una rehabilitación de humedales

### *Regeneración hídrica*

Se refiere a la construcción de obras hidráulicas para el control de inundaciones. El diseño y manejo de estas obras debe ajustarse con las necesidades hídricas del ecosistema.

- Mejoras en las condiciones de oferta de agua. Durante las actividades desarrolladas en un proyecto de rehabilitación, se pueden generar situaciones de estrés hídrico en los humedales. En consecuencia, se genera la necesidad de analizar alternativas para el suministro de agua, ésta puede provenir de la lluvia o de fuentes subterráneas.
- Recuperación del espejo de agua. Se refiere a la restitución del espejo perdido a causa de las alteraciones del régimen hídrico del humedal, por colmatación natural, dragados, rellenos, drenajes, entre otros. Recuperar el espejo de agua facilita el desarrollo de vegetación sumergida y semi-sumergida que constituyen el hábitat para una gran variedad de organismos.
- Control de arrastre de residuos sólidos. Se refiere a la remoción total de basura. Esto se puede lograr mediante la instalación de mallas o rejillas de retención, trampas de basura, sedimentadores o desarenadores ubicados en los sitios de entrada de los afluentes del humedal.
- Reconfiguración morfológica del vaso. Este aspecto se refiere al conjunto de actividades que se desarrollan para adecuar el humedal para permitir el desarrollo del hábitat adecuado para las especies normales. Esto se puede generar mediante acciones como adecuación de pendientes en la zona litoral, configuración de islas, remoción de rellenos y sedimentos, etc.

### *Manejo de vegetación acuática y semiacuática*

El manejo de vegetación requiere de la consideración de los siguientes aspectos generales:

- Determinación de especies idóneas: evaluación de la diversidad y riqueza de especies; y de las interacciones de la vegetación con la fauna endémica y transitoria.
- Elaboración de un mapa de coberturas vegetales; del perfil transversal y longitudinal de coberturas; de la zonificación actual de la vegetación acuática y semiacuática; y de la zonificación de manejo de la vegetación.
- Definir los objetivos y metas de intervención de las coberturas vegetales y el diseño de los prospectos de intervención, su implementación y evaluación.

#### IV.2.3 Diseño de ecosistemas: Humedales artificiales

Los humedales artificiales son diseñados para mimetizar los procesos y funciones normales en los humedales naturales y de los que se obtienen servicios como la eliminación de contaminantes y protección costera.

Los humedales artificiales ofrecen servicios como protección de la costa, mejoramiento de la calidad ambiental y del valor del paisaje, creación de zonas de amortiguamiento (Antón, 2016; Mendoza y Ramos 2012).

Existen diferentes tipos de humedales artificiales y se pueden clasificar en humedales artificiales de flujo superficial, de flujo subsuperficial, de flujo subsuperficial vertical y de flujo subsuperficial horizontal (Figura 31). La elección de instalar un tipo de humedal depende de los servicios a recuperar y en ocasiones se utiliza una combinación de diferentes tipos de humedales.

Los humedales artificiales más comunes están enfocados en el tratamiento de aguas y están compuestos de sustrato, vegetación y agua a tratar.

- Sustrato: Sirve de soporte a la vegetación y permite la fijación de la biopelícula bacteriana que interviene en la mayoría de los procesos de eliminación de contaminantes.
- Vegetación: Principalmente compuesta por macrófitas emergentes que contribuyen a la oxigenación del sustrato, a la eliminación de nutrientes y al desarrollo de la biopelícula bacteriana.
- Agua a tratar o influente: circula a través del sustrato y la vegetación.

Los mecanismos por los que estos ecosistemas artificiales depuran las aguas residuales se basan en los principios de la Figura 32.

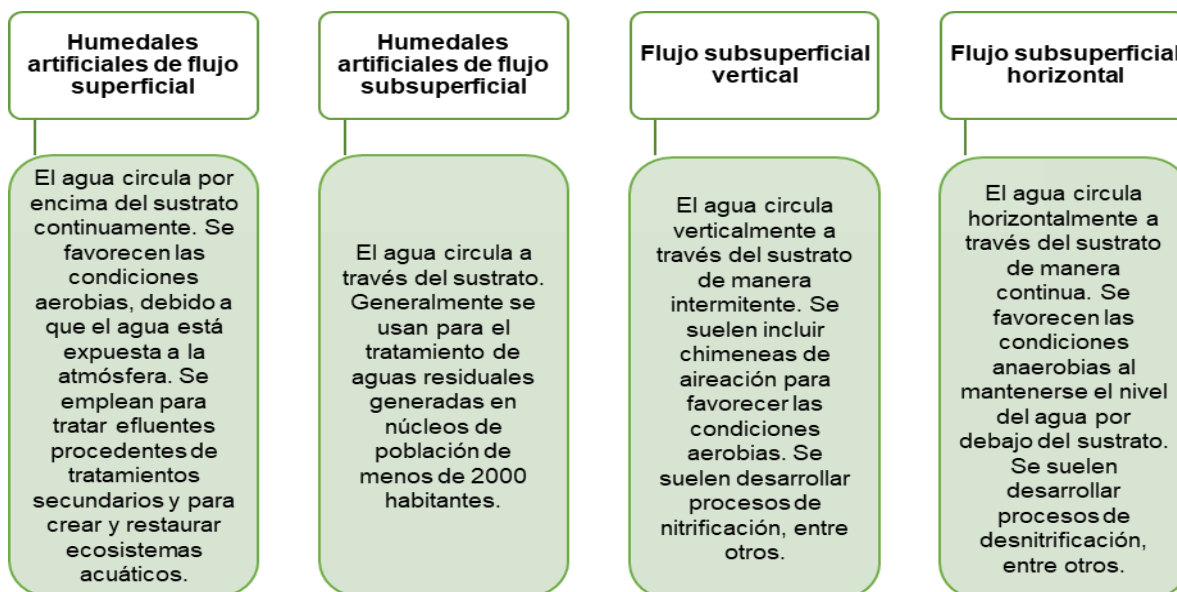


Figura 31. Tipos de humedales artificiales

Eliminación de sólidos en suspensión	Mediante a fenómenos de filtración que tienen lugar entre el sustrato y las raíces.
Eliminación de materia orgánica	Esto se debe a la acción de los microorganismos, bacterias principalmente.
Eliminación de nitrógeno	Esto puede ser por acción directa de las plantas o por procesos de nitrificación-desnitrificación desarrollados por los microorganismos.
Eliminación de fósforo	Esto sucede mediante procesos de adsorción sobre los componentes del sustrato.
Eliminación de patógenos	Esto se logra mediante la adsorción sobre partículas del sustrato, la toxicidad producida por las raíces de las plantas y la acción depredadora de bacteriófagos y protozoos.

Figura 32. Mecanismos por los cuales los humedales artificiales proveen el servicio de purificación de agua

### IV.3 Arrecifes y pastos marinos

Ambos ecosistemas ofrecen una gran variedad de servicios ecosistémicos. Sin embargo, la protección contra la erosión es uno de los servicios más valorados. Este servicio se deriva de la disminución de la pérdida de energía de las olas por efectos de fricción y turbulencia

con las hojas de los pastos y con los corales. Además, estos ecosistemas son fuentes de sedimentos muy importantes

Al mismo tiempo, estos ecosistemas son altamente sensibles a las modificaciones en la columna de agua, por ejemplo, a un incremento en la turbidez derivada de la suspensión de sedimento o incremento en la cantidad de nutrientes. Además, tienen una gran sensibilidad a la introducción de especies, por ejemplo, el pez león.

Los servicios provistos por estos ecosistemas han originado un fuerte interés por mimetizarlos y construir obras de infraestructura enfocada a la protección costera. Antes de cualquier intervención, debe considerarse si estos ecosistemas existían en el sitio a ser intervenido, las causas que originaron la degradación, la capacidad real de detener dichas perturbaciones, la factibilidad de mejorar la salud de estos ecosistemas con la reintroducción de organismos (pastos o corales) así como la posible necesidad de intervenir el área sin incrementar la turbidez del agua e incluso teniendo que fijar el sustrato para evitar que el sedimento suspendido disminuya la cantidad de luz.

#### IV.3.1 Restauración de arrecifes

En últimos años ha crecido el interés por aumentar las oportunidades de los arrecifes para resistir y recuperarse de los impactos, naturales y humanos, incrementando su resiliencia a través de la restauración activa. La restauración incluye diversas técnicas que incorporan a la sociedad y a los manejadores de recursos como parte de los proyectos para incrementar los esfuerzos.

##### Criterios para la restauración

Es importante definir los objetivos del proyecto de restauración, es decir, determinar si los arrecifes a restaurar son de interés para la conservación de la biodiversidad, el turismo, la pesca, la protección contra la erosión costera, la investigación científica o una combinación de intereses. Los objetivos del proyecto ayudarán a determinar los métodos a utilizar.

También es importante definir la escala del proyecto de restauración. Si el área degradada es grande, se debe considerar hacia dónde se quieren dirigir los esfuerzos de restauración en términos de los patrones actuales de distribución y la exposición al efecto potencial negativo de las olas, las fuentes de contaminación y la turbidez.

Una vez que los objetivos y la escala han sido determinados, se necesita evaluar el costo del proyecto, tomando en cuenta el uso más efectivo de los recursos disponibles.

Por ejemplo, la selección de sitios estratégicos de restauración y el incremento de colonias sanas y genéticamente diversas se espera que los efectos de la restauración presenten un efecto multiplicador para la rehabilitación del arrecife a escalas locales y regionales.

También, es necesario definir la tasa del éxito con el objetivo de evaluar si el método seleccionado producirá el costo-beneficio más adecuado para el lugar. Además, es importante que el método seleccionado no cause un daño adicional al arrecife.

El análisis de la viabilidad a largo plazo del programa de restauración es importante, ya que es necesario asegurar alguna medida de éxito al proyecto y que éste continúe por el tiempo necesario para lograr los objetivos planteados.

Los daños y la degradación en los arrecifes de coral no pueden ser restaurados o rehabilitados sin antes entender y atender los procesos básicos responsables de la degradación de estos ecosistemas (Figura 33).

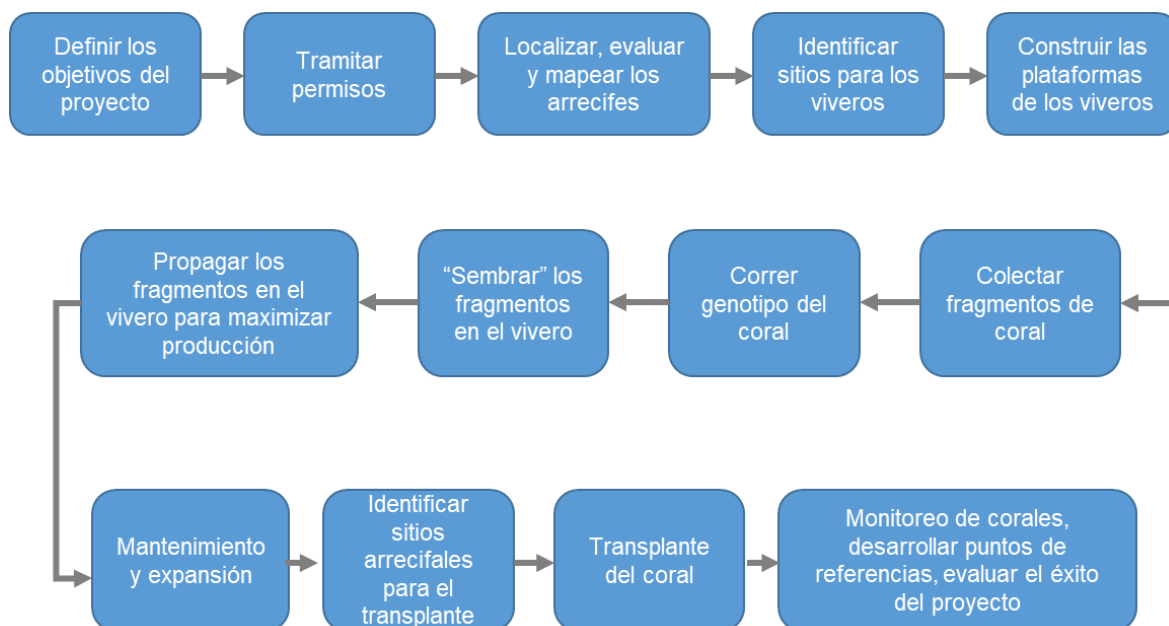


Figura 33. Diagrama de planeación de la propagación de corales (tomado de Lirman y Schopmeyer, 2016).

## Métodos de Restauración

- Estructuras artificiales

Las estructuras artificiales se emplean para frenar la erosión y evitar la sedimentación. Sobre estas estructuras se implantan pequeñas colonias de coral para crear un hábitat atractivo para diferentes especies de invertebrados y peces, y para eventualmente funcionar como un camino submarino.

Los arrecifes artificiales se han usado para restaurar el hábitat, para proveer estructura en áreas dañadas o para aumentar el área total del arrecife. En conjunto con los pastos marinos, proveen a diferentes especies de peces de estructura adicional para su ovoposición y desarrollo, funcionando como refugio. A medida que las estructuras comienzan a colonizarse, pueden generar diversas fuentes de alimento. En estas estructuras es posible obtener una sobrevivencia del 80 % de las colonias trasplantadas.

Es importante señalar que el alcance ecológico de las estructuras artificiales está limitado al lugar en el que se instalaron, ya que moverlas es muy costoso. La participación comunitaria en su conservación es de gran importancia.

- Estabilización de fragmentos

Las especies de coral que se pueden reproducir de manera asexual por medio de fragmentación presentan una ventaja de colonización. Cuando una colonia se fragmenta por marejadas u oleaje de tormentas, se recuperan los fragmentos y se estabilizan fijándolos en huecos y grietas disponibles en los arrecifes donde la especie ya está presente. Esta técnica de estabilización es sencilla, no requiere equipos y se puede aplicar a un gran número de fragmentos con poca inversión. En estas labores pueden emplearse estructuras como tubos de PVC, redes, varillas de hierro o *floating underwater coral array* (FUCA).

Es muy importante escoger los lugares idóneos en los que se van a fijar los corales rescatados para maximizar su sobrevivencia. Debe seleccionarse un sustrato duro y consolidado para que se forme una fijación sólida, evitando áreas de gravilla en las que pueda ocurrir erosión.

Esta técnica de estabilización es sencilla y puede aplicarse a un gran número de fragmentos con poca inversión. La participación de grupos comunitarios es factible ya que el proyecto puede desarrollarse en áreas costeras someras de fácil acceso. El costo de este tipo de proyectos depende del personal disponible.

- Viveros de corales

Los viveros de coral son líneas flotantes que soportan algunas especies de coral. La técnica se ha modificado por la NOAA Restoration Center y se utilizan tubos de PVC para darle mayor rigidez y estabilidad a dichas líneas.

El propósito de los viveros es que los fragmentos crezcan a un tamaño de aproximadamente 50 cm por año para ser trasplantados a los arrecifes de coral que se determine necesario.

La participación de la comunidad es de suma importancia e incluye las tareas de instalación, mantenimientos, limpieza, cultivo, cosecha y trasplante a los arrecifes cercanos.

#### IV.3.2 Restauración de pastos marinos

Las praderas de pastos están desapareciendo de las zonas costeras debido a la deforestación y el cambio de uso de suelo en las partes altas de las cuencas. El aporte de materia orgánica y de sedimento en suspensión propicia que se incremente la turbidez en el agua y disminuya el desarrollo de los pastos. La agricultura y ganadería generan una cantidad excesiva de nutrientes que provoca un crecimiento anormal y muy acelerado de algas resultando en el ahogamiento de los pastos y cambiando la constitución de las praderas. El dragado y relleno de material, la pesca de arrastre y los altos niveles de contaminación destruyen grandes extensiones de praderas.

Antes de iniciar cualquier plan de restauración de praderas de pastos marinos, es muy importante evitar que sigan disminuyendo. Es altamente recomendable mantener sitios de referencia prístinos para el estudio científico a través de acciones como el cierre de áreas



al tránsito de embarcaciones, lo cual también permitirá el éxito de programas de restauración sin riesgos de impacto adicionales.

Antes de emprender cualquier acción de restauración deben determinarse al menos los siguientes parámetros del sitio a ser intervenido: historia de la pradera (composición de especies, causas de pérdida), exposición al aire, olas y corrientes; tipo de sustrato y alta presencia sedimentos orgánicos; tasa de sedimentación, presencia de disturbios por animales; requerimientos de personal y cronogramas con presupuestos.

Las acciones para la restauración de las praderas de pastos marinos resumen en la Figura 34. Los métodos de plantación comprenden: métodos libres de sedimentos, métodos con sedimentos, siembra de semillas y estirpes cultivadas en laboratorio. La implementación de estos métodos depende de factores como la extensión del área en proceso de restauración y su distancia con respecto a praderas donantes, naturaleza del sustrato, dificultades de transporte, costos e impactos.

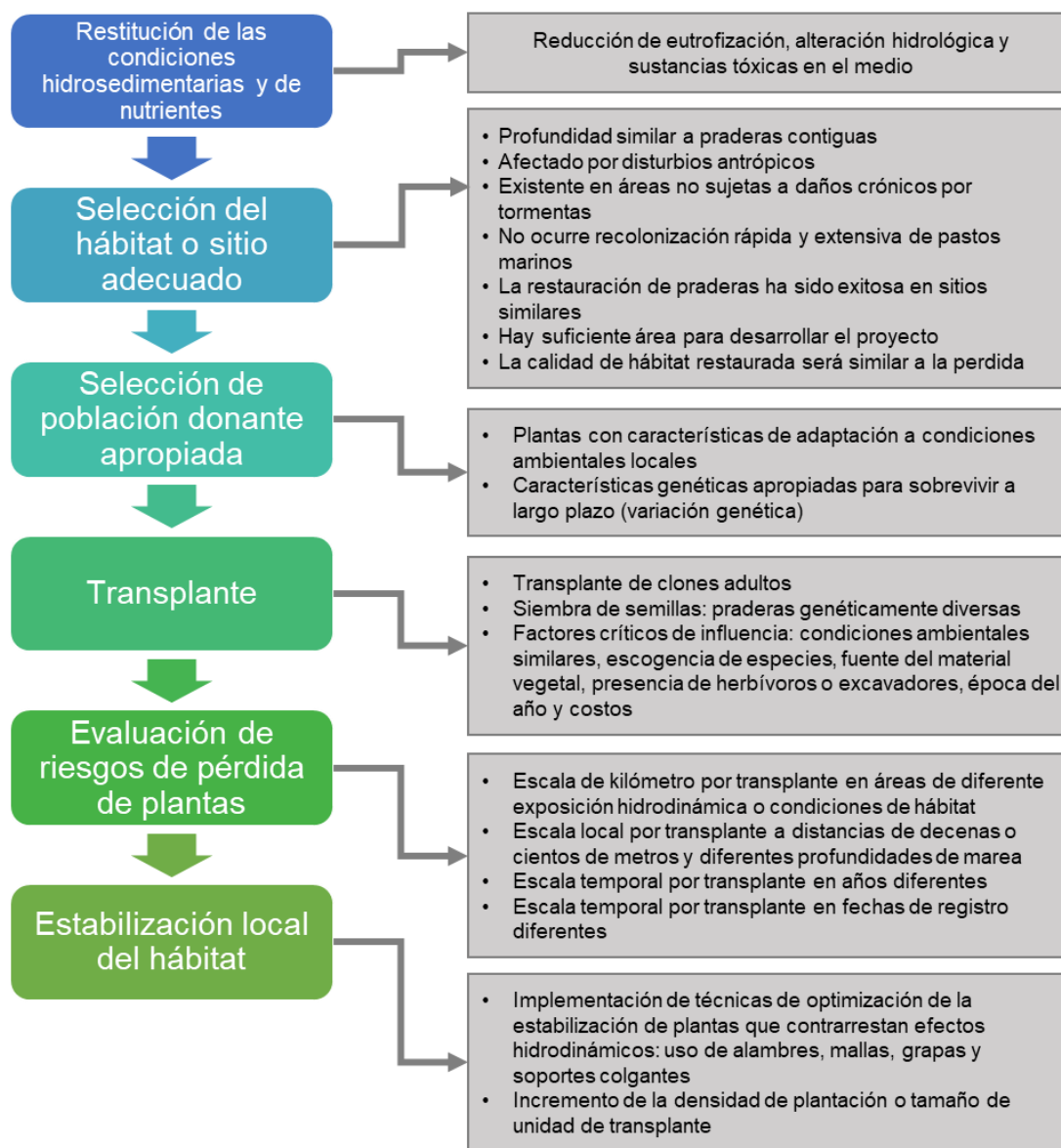


Figura 34. Diagrama conceptual para planeación de la restauración de pastos marinos (modificado de van Katwijk *et al.*, 2009).

## Monitoreo y evaluación

La toma de datos para el monitoreo debe realizarse de manera periódica al menos por cuatro años después del trasplante. Fonseca *et al.* (2002) sugieren un calendario como el siguiente señalando que los trasplantes originales deben monitorearse por 3 años y las plantaciones potenciales de reparación (desde el año 2) por 3 años:

Año 1: días 60, 180, 365.

Año 2 a 4: días 180 y 365.

Los atributos o parámetros de medición son los siguientes:

- Número de ápices

- Supervivencia de unidades trasplantadas
- Densidad del tallo
- Cobertura del área

Es importante tomar registros de video en transectos de 100 m a lo largo de porciones de praderas seleccionadas al azar para documentar de forma visual la progresión de la cobertura a través del tiempo. Del monitoreo dependerá la toma de decisiones para optimizar la eficiencia de los recursos.

Una vez que las praderas están estabilizadas, el monitoreo al menos debe ser de manera bianual.

## Métodos de Restauración

- Métodos libres de sedimento. Las plantas son extraídas con pala, el sedimento es sacudido de los tallos y rizomas, y se mantienen en tanques con agua de mar o jaulas flotantes. Es recomendable usar al menos un retoño apical por unidad de trasplante. Las plantas se colectan y trasplantan el mismo día, por lo cual deben mantenerse en las mismas condiciones de temperatura y salinidad mientras se trasplantan. El trasplante puede ser directo o a través del uso de dispositivos como anillos, varas y clavos.
- Métodos con sedimento:
  - El método de césped (*sod, turf*) consiste en trasplantar una sección de sedimento llena de pasto marino con rizomas intactos y, aunque es el método más fácil, representa la mayor inhibición de la recuperación en la pradera donante.
  - Método de tubo (*plug*) utiliza tubos como dispositivos para extraer las plantas con el sedimento y rizomas intactos. Los bloques son colocados directamente luego de la apertura de un hoyo para recibir el contenido del tubo.
  - La siembra de semillas es un método aplicado en zonas de baja energía donde las semillas pueden establecerse y germinar y prosperar con pocos predadores. Con este método se desarrollan experimentos para facilitar el hundimiento e incrustación de semillas en mallas de material biodegradable para incrementar su densidad en un área.
- Métodos de laboratorio. El desarrollo de estirpes en laboratorio involucra la cría y crecimiento de pastos marinos partiendo de fragmentos de plantas o de la germinación de semillas. Este método funciona cuando se requieren grandes cantidades de unidades en áreas extensas y además puede proveer plantas genéticamente variables y resistentes a enfermedades. Es favorable en cuanto que evita mayor daño, eliminación o reducción de pastos en las praderas donantes, y la reducción de costos en futuros proyectos de restauración.

## IV.4 Reubicación de infraestructura

La reubicación o desmantelamiento de infraestructura es una medida necesaria en casos en los que las condiciones del sistema requieran que se reestablezcan los flujos de materia y de energía para recuperar los balances. Por ejemplo, el desmantelamiento de un espigón para recuperar el transporte de sedimentos en la costa. En la mayoría de estos casos, se encuentran comprometidas la seguridad de las construcciones, actividades económicas e

incluso vidas humanas. En los casos en los que la reubicación de infraestructura puede realizarse apartando la infraestructura de la línea de costa, ubicándola tierra adentro, o elevando el nivel de construcción de la infraestructura. El nivel mínimo que debe considerar el desplante de cualquier tipo de infraestructura se muestra en la Figura 35.

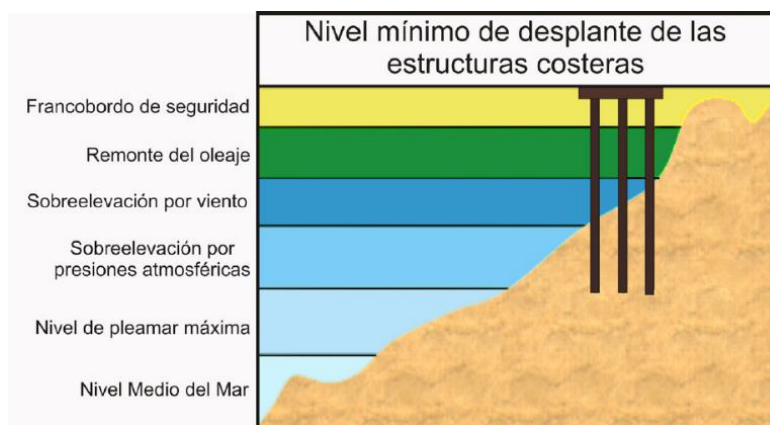


Figura 35. Nivel mínimo de desplante de estructuras en la costa (tomada de Silva *et al.*, 2018)

#### IV.5 Ejemplos caso de uso de infraestructura verde

A continuación, se muestran algunos ejemplos de uso de infraestructura verde. Se abordan los problemas que dieron origen a la intervención, las soluciones empleadas, así como los servicios ecosistémicos que fueron recuperados (Figura 36 a Figura 41).

En los ejemplos se observa que los problemas enfrentados con infraestructura verde están estrechamente relacionados con un manejo deficiente o inadecuado de actividades desarrolladas en la zona costera. Por ejemplo, la degradación del humedal, en el caso de Ciénega del Fuerte, se debió a la conversión de los humedales en potreros. En cambio, la degradación de las dunas en Brasil se debió a su aplanamiento intencional para facilitar el acceso a la playa.

Además del cambio de uso de suelo, en la zona costera son comunes los errores en el diseño de infraestructura de protección. Por ejemplo, en los casos de Puerto Morelos y de Playa Dorada destaca que antes de la implementación de los proyectos de infraestructura verde, ya se había invertido en infraestructura de protección que agravó los problemas de erosión. También, destaca que las soluciones enfocadas en la implementación de infraestructura verde suelen estar acompañadas por las comunidades locales involucradas tanto en la implementación como en el monitoreo de estos proyectos.

## Tipo de infraestructura verde

Infraestructura basada en ecosistemas

## Lugar

Playa Casino, Río Grande del Sur, Brasil

## Problema y solución

- Las dunas costeras fueron removidas intencionalmente porque las comunidades consideraba que obstruían la vista (servicio hedónico provisto por la playa) y el acceso a la playa. Dicha intervención incrementó la provisión de servicios culturales como el servicio hedónico de la playa. Sin embargo, afectó servicios de regulación como el control de inundaciones.
- El proyecto de recuperación contó con la colaboración entre organizaciones no gubernamentales y el gobierno local.
- El proyecto consistió en la recuperación de 12 km de dunas. Las dunas fueron formadas con retenedores de arena contruidos con ramas secas. Después, las dunas fueron fijadas con vegetación, se usaron especies locales reproducidas en un invernadero. Se construyeron pasarelas para facilitar el acceso a la playa y evitar el deterioro por pisoteo. El proyecto fue acompañado por un programa de monitoreo desde un inicio

Duna totalmente destruida para 1980s



Incremento del riesgo de inundación, pérdida de la biodiversidad e intrusión de agua salada al acuífero



Acuerdo de restauración de dunas (NEMA)



Fanja urbana de la Playa Cassino antes de la restauración de la duna (1996)



Camino a lo largo de la duna, para acceso peatonal a la playa (2011)

## Servicios ecosistémicos recuperados

Se recuperaron servicios de soporte (hábitat), de regulación (control de inundaciones y de la arena que invadía caminos cercanos) y culturales (hedónicos).

Figura 36. Uso de infraestructura verde: basada en ecosistemas (ejemplo 1)



Tipo de infraestructura verde	
Infraestructura basada en ecosistemas	
Lugar	
Área Natural Protegida de Ciénega Grande, Veracruz, México	
Problema y solución	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Los humedales arbóreos (manglares y selvas inundables) fueron sustituidos por zonas de pastoreo. Incrementó el servicio de provisión de alimentos. Sin embargo, disminuyó el servicio de regulación de inundaciones. Las poblaciones locales así como la zona turística se vio seriamente afectada.</li> <li>La intervención estuvo enfocada en la restauración del humedal con énfasis en la recuperación de servicios hídricos. Para ello, se excluyó el ganado y se hizo un intensivo control de especies invasoras. Después se realizó un programa de reforestación con especies locales y se promovió un grupo de ecoturismo con las comunidades locales</li> </ul>	
<p>Ganadería y ocurrencia de huracanes</p> <p>↓</p> <p>Pérdida de cobertura forestal</p> <p>↓</p> <p>Escorrentías e inundaciones fluviales exacerbadas</p>	 <p>Área cubierta con pastos, incluyendo <i>Leersia</i> spp.</p> <p>Misma área reforestada con árboles jóvenes <i>P. aquatic.</i></p>
Servicios ecosistémicos recuperados	
Se recuperaron servicios de soporte (hábitat), de regulación (control de inundaciones) y culturales (ecoturismo).	

Figura 37. Uso de infraestructura verde: basada en ecosistemas (ejemplo 2)



## Tipo de infraestructura verde

Infraestructura basada en ecosistemas asistidos

## Lugar

Puerto Morelos, Quintana Roo, México

## Problema y solución

- Erosión masiva de una playa altamente turística. Estos problemas se agravaron después del paso de un huracán (Dean, 2007). Después de que el huracán golpeó, las playas no pudieron recuperarse naturalmente porque el flujo de sedimentos se encuentra parcialmente interrumpido por estructuras de protección costera mal diseñadas.
- La playa fue asistida a través de la construcción de un arrecife artificial. El objetivo fue disminuir la energía del oleaje y permitir la acumulación de arena en la playa. El diseño fue determinado a través de modelos numéricos y pruebas en laboratorio. La obra fue construida con materiales que no causan daño al medioambiente. Esto permitió la colonización por especies provenientes del Sistema Arrecifal Mesoamericano (350-1600 m).

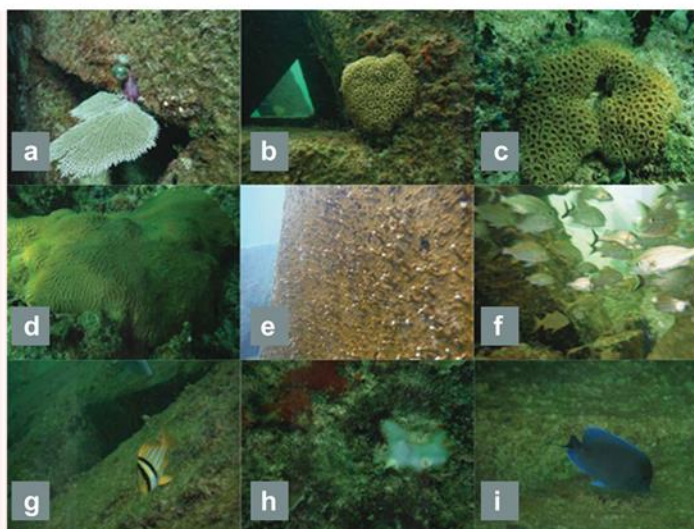
✗ Falta de desarrollo costero

✗ Infraestructura turística con mala planeación

✗ Degradación ambiental y pérdida de servicios ecosistémicos

✗ Playa erosionada

Arrecife artificial: (a) Abanico de mar, (b) y (c) Zoanthid incrustante blanco, (d) Coral cerebro, (e) pólipos y, (f), (g), (h) y (i) hábitat establecido en el arrecife artificial



## Servicios ecosistémicos recuperados

Se recuperaron servicios de soporte (hábitat), de regulación (control de erosión) y culturales (turismo).

Figura 38. Uso de infraestructura verde: basada en ecosistemas asistidos

## Tipo de infraestructura verde

Infraestructura blanda mejorada con el uso de ecosistemas

## Lugar

Puerto de Veracruz, Veracruz, México

## Problema y solución

- Las obras de ampliación de este puerto (1995) se desarrollaron sobre un sistema de dunas que previamente estaba cubierto por vegetación nativa. Al eliminarse la vegetación y aplanar la zona, se removió la arena creando una duna artificial, paralela a la línea de costa, que medía 20 m de altura y 2 km de largo. Esta duna carecía de vegetación por lo que entró en movimiento y la arena empezó a invadir casas y caminos.
- Fijación de la duna con especies de plantas nativas de los sistemas dunares de la zona

Llegada de arena a la ciudad por transporte eólico



Creación de una duna artificial, plantación de pinos australianos



Urbanización y expansión de la infraestructura portuaria



Invasión en el bosque y destrucción de la duna



Foto: Trey Ratcliff, CC 2.0

Acumulación de arena

Duna creada, cubierta posteriormente por vegetación nativa

## Servicios ecosistémicos recuperados

Se recuperaron servicios de soporte (hábitat de algunas especies nativas), de regulación (control de movimiento de arena).

Figura 39. Uso de infraestructura verde: basada en infraestructura blanda

## Tipo de infraestructura verde

Infraestructura rígida mejorada con el uso de ecosistemas

## Lugar

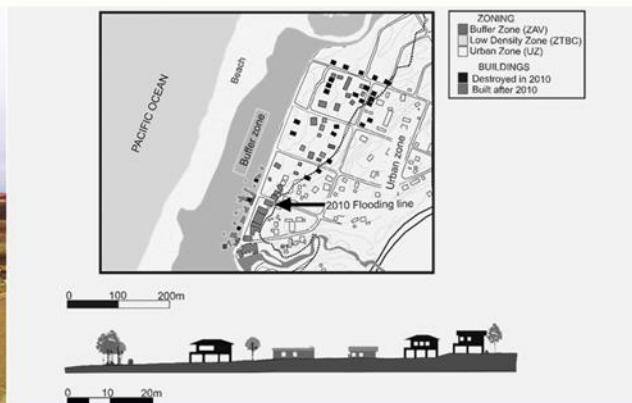
Región Maule, Chile

## Problema y solución

- Localidad con alta vulnerabilidad a inundaciones y marejadas por la ubicación tan próxima de las propiedades a la zona marina. En esta zona, el tsunami de 2010 causó 531 muertes (Fritz et al., 2011), 370 mil casas dañadas así como una considerable erosión costera.
- La tragedia originó un cambio en las políticas locales. Se implementó un plan de zonificación para disminuir la vulnerabilidad de la población y se generó un corredor verde entre las dunas y la población. También, se hicieron modificaciones en los códigos de construcción para promover estructuras con mayor resistencia a inundaciones.



El tsunami de 2010 devastó gran cantidad de pueblos costeros en la zona sur-cetro de Chile y en la región de Maule



Plan de zonificación en Pelluhue County: construcción restringida en algunas zonas e implementación de políticas de uso de infraestructura verde

## Servicios ecosistémicos recuperados

Se recuperaron servicios de soporte (hábitat de algunas especies nativas), de regulación (control de inundaciones).

Figura 40. Uso de infraestructura verde: infraestructura rígida mejorada con el uso de ecosistemas



## Tipo de infraestructura verde

Desmantelamiento y reubicación de infraestructura

## Lugar

Playa Dorada, Puerto Plata, República Dominicana

## Problema y solución

- Es una playa con alto valor turístico que ha experimentado erosión severa en los últimos décadas. Los motivos de la erosión son muy variados e incluyen desde la disminución del aporte sedimentario por el represamiento de los ríos cercanos hasta la construcción de obras de protección costera (muros, rompeolas y revestimientos) que empeoraron la erosión.
- Se reubicó la infraestructura sobre la playa, se removieron dos rompeolas para recuperar la dinámica sedimentaria, se hizo un relleno artificial y se construyó una duna frontal.

Construcción de muros, rompeolas y revestimientos costeros



Canalización del sedimento fuera del Sistema



En 2007, relleno de playa y retiro de los rompeolas y de los revestimientos

(A) Estructuras retiradas, (B) Estado inicial, (C) Playa rehabilitada



## Servicios ecosistémicos recuperados

Se recuperaron servicios de regulación (control de erosión), culturales (recreación).

Figura 41. Uso de infraestructura verde: desmantelamiento y reubicación de infraestructura

## IV.6 Modelo para la selección de alternativas

Para la selección de alternativas de infraestructura verde a implementar en un sitio degradado, puede seguirse el modelo de decisión de la Figura 42. En él, se observa que la selección depende de las causas de la degradación del sistema y los recursos ecosistémicos, económicos, espacio y tiempo disponibles. Una vez identificado el tipo de infraestructura verde viable para cada caso, se debe seleccionar la alternativa de actuación (Figura 43). En la mayoría de los casos, una alternativa híbrida, combinación de dos o más alternativas, resulta la solución más conveniente.

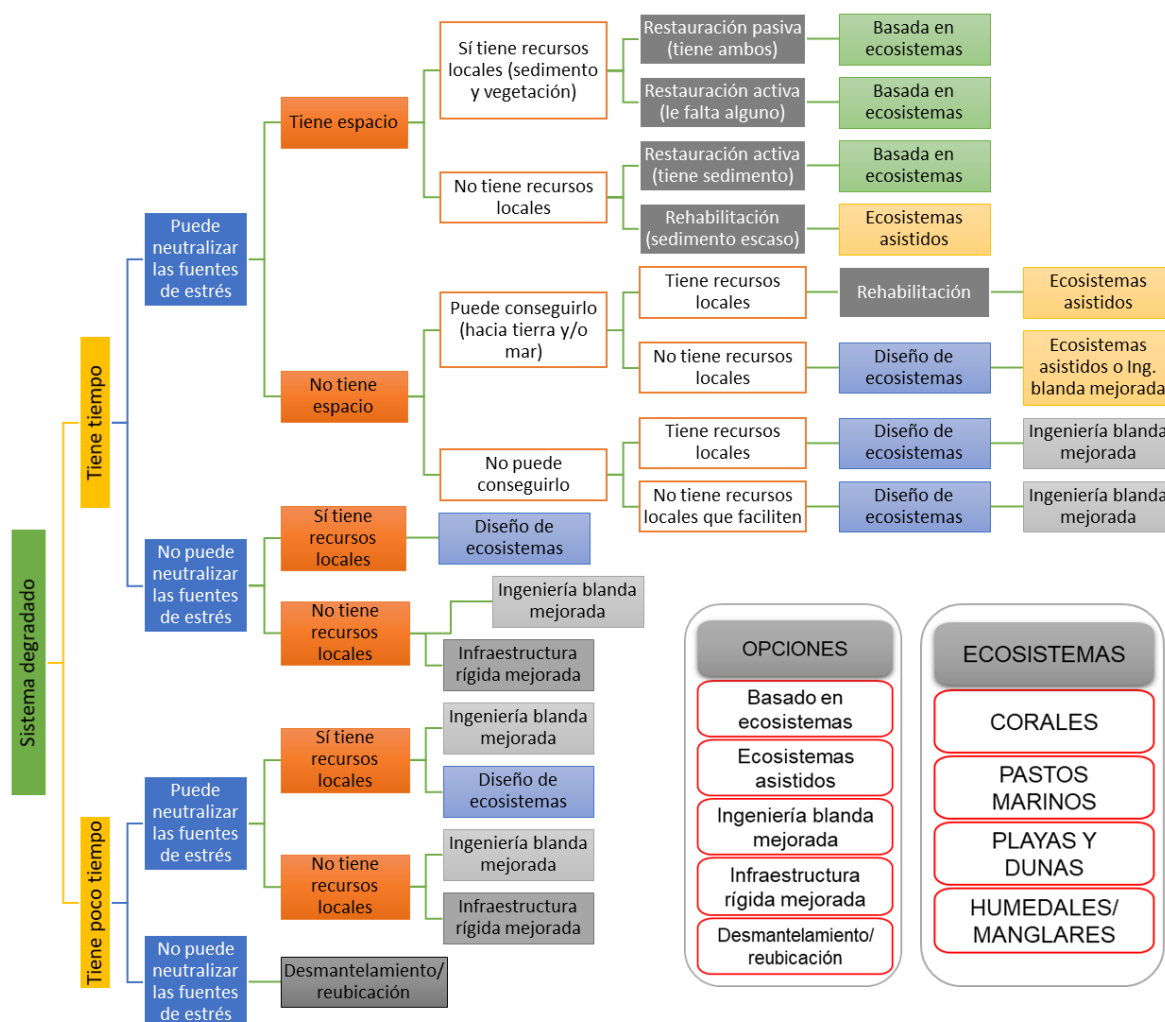


Figura 42. Selección de alternativas de infraestructura verde

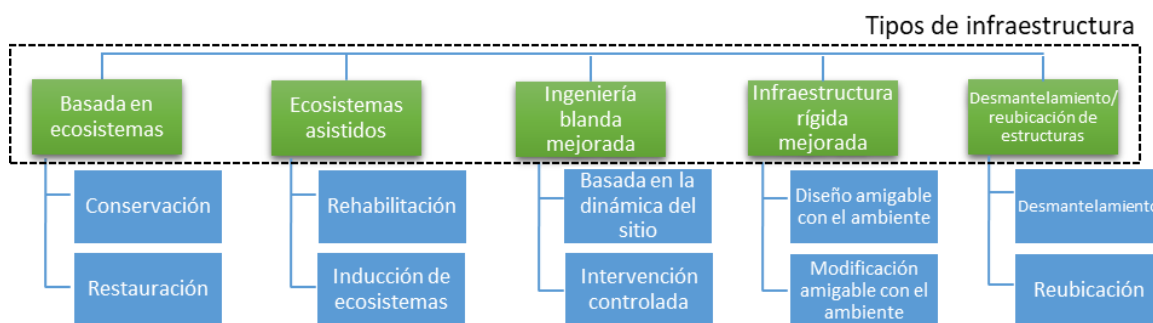


Figura 43. Alternativas de actuación en función del tipo de infraestructura verde

De acuerdo a la Figura 42 y Figura 43, dependiendo de la urgencia o riesgo asociado, las actuaciones pueden estar divididas en tres fases: a) contención del riesgo, b) estabilización de las condiciones de los balances de flujo de masa y energía y, c) recuperación o restauración de los servicios ecosistémicos.

En función del grado de conocimiento de los procesos y recursos disponibles las actuaciones pueden diseñarse e implementarse con una expectativa de duración determinada de la actuación. Así, por ejemplo, en los casos que no se cuenta con una base de datos importante es conveniente iniciar con actuaciones orientadas a la contención del problema, simultáneamente se debe de detonar un programa de monitoreo que permita ir construyendo actuaciones orientadas a la estabilización del sistema que recuperen el balance de masa y energía. De acuerdo a los resultados del monitoreo, éste se puede ajustar o simplemente extender para generar el conocimiento que permita afrontar soluciones de más largo plazo. En resumen, tanto el monitoreo como las actuaciones son un conjunto de acciones que permite la adaptación de socioeconómica y ambiental.



## V. Factores determinantes para éxito de un proyecto de infraestructura verde costera

A partir de experiencias documentadas, como las descritas en la sección anterior, es posible identificar aquellos factores que permitieron alcanzar el éxito de los proyectos. Los factores incluyen elementos de técnicos en la planeación, diseño e implementación, pero también aspectos sociales. Estos factores forman parte de un ciclo que debe estar en continua evaluación para el seguimiento de los proyectos. En la Figura 44 se enlistan los ocho factores identificados.

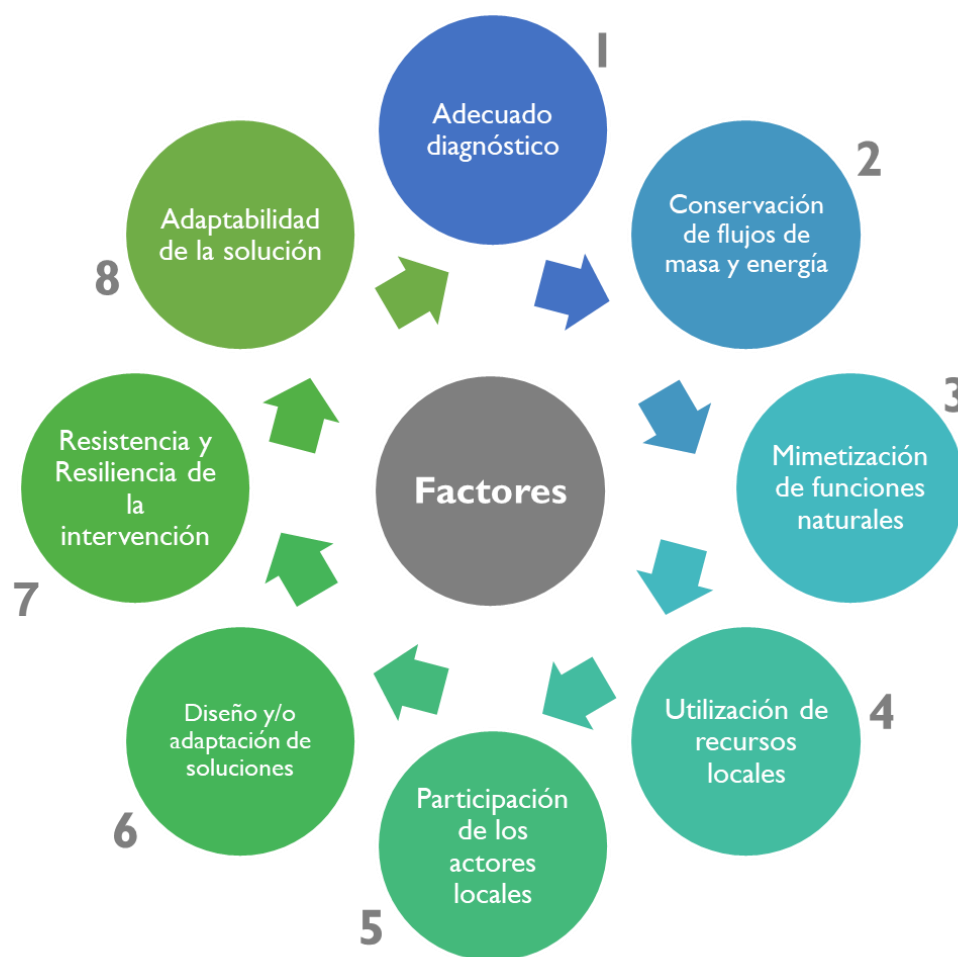


Figura 44. Factores determinantes para éxito de un proyecto de infraestructura verde

1. Adecuado diagnóstico: El diseño de la solución dependerá del origen del problema que sea necesario resolver. Un correcto diagnóstico permite una selección apropiada y es el elemento principal que condicionará el éxito o fracaso de un proyecto de protección costera.
2. Conservación de flujos de masa y energía: Es común en proyectos con soluciones que emplean infraestructura rígida encontrar que, con el paso del tiempo, el problema que

buscaba solucionarse fue únicamente transferido a otro punto dentro de la misma celda litoral. Evitar esto es de suma importancia para considerar que un proyecto ha sido exitoso.

3. **Mimetización de funciones naturales:** La capacidad de una solución para mimetizar un funcionamiento natural con la finalidad de proveer un servicio ecosistémico, es una medida del grado de naturalidad de la actuación. Un proyecto de infraestructura verde, busca que, en la mayor medida posible, la solución contribuya a crear/reestablecer/restaurar algún servicio ecosistémico.

4. **Utilización de recursos locales:** La ejecución de la solución puede involucrar recursos locales, tanto materiales como humanos. Esto permite reducir costos del proyecto, crear una fuente de empleo para los locales, y promover la participación y aceptación del mismo.

5. **Participación de los actores locales:** Involucrar a las comunidades locales en el proyecto, es un elemento importante para su éxito. Desde el diagnóstico del problema, la selección de la solución, la ejecución de la actuación y el monitoreo de los resultados, la participación de los tomadores de decisiones y actores clave es recomendable.

6. **Diseño y/o adaptación de soluciones:** Tomar en cuenta experiencias previas para la selección de una solución, permite utilizar el conocimiento ya generado para mejorar el diseño del proyecto. Sin embargo, es importante considerar que si la medida se está tomando como referencia es aplicable al problema que esté buscando resolver y, aún más importante, adaptar de manera acertada la solución a las características únicas de cada caso.

7. **Resistencia y Resiliencia de la intervención:** La capacidad del sistema intervenido, para responder a periodos de largas de calma y a la ocurrencia de eventos extremos, es una medida de la resiliencia del proyecto.

8. **Adaptabilidad de la solución:** La flexibilidad o adaptabilidad del proyecto se refiere a la posibilidad que presenta la solución de irse modificando con el paso del tiempo, para adaptarse y ser más eficiente. Esto puede incluir el desarrollo de proyectos en diferentes fases acopladas, donde se elija una solución a corto plazo para dar una respuesta inmediata, seguida de soluciones a mediano y largo plazo, que garanticen la resiliencia del proyecto.

## **V.1 Adecuado diagnóstico en un proyecto de infraestructura verde costera**

La cantidad de información disponible para la realización del diagnóstico de los problemas que se presentan en la zona costera es un factor clave para el correcto diseño de la solución. Un diagnóstico costero ideal se basa en datos de suficiente calidad y cantidad. Desafortunadamente, este no es siempre el caso y las decisiones deben tomarse con premura y con la información y el conocimiento disponibles en el momento (Silva *et al.*, 2019). El diagnóstico debe realizarse tomando en cuenta tres diferentes componentes del problema: física, ecológica y social.

### V.1.1 Componente física

Tiene en cuenta la importancia de los efectos de los climas de oleaje y viento, las corrientes cercanas a la costa, los gradientes de temperatura y salinidad, las fuentes y salidas de sedimento, el transporte de sedimentos y los cambios geomorfológicos, y los efectos de los cambios en el nivel relativo del mar (Capobianco y Stive, 2000). Esta componente requiere monitoreo continuo tanto de los parámetros, como de las fuerzas externas que los controlan.

### V.1.2 Componente ecológica

Las relaciones entre los ecosistemas y el medio físico son complejas debido a que las causas y efectos de las interacciones son bidireccionales: los ecosistemas se ven afectados por las características físicas del medio, pero también ellos modifican al medio físico. Por ello, la recopilación de datos específicos del sitio sobre las variaciones temporales y espaciales de los ecosistemas, durante la fase de diagnóstico, ayudará a comprender mejor y anticipar el papel de los ecosistemas en la dinámica costera.

### V.1.3 Componente social

Los cambios en las condiciones y actividades humanas inducen cambios en los ecosistemas, lo cual tendrá consecuencias en su bienestar. La participación de la comunidad en los proyectos de protección costera es determinante. En las etapas de planeación, monitoreo y toma de decisiones, deben involucrarse a pobladores, tomadores de decisiones y empresarios, para promover sinergias positivas.

### V.1.4 Información requerida para la realización de un diagnóstico

Con el objetivo de organizar la información disponible referente a las tres componentes del problema, y priorizar aquella que deba ser generada, puede agruparse en distintos grupos de información (Figura 45). Una vez clasificada la información disponible, debe determinarse la categoría de relevancia a la que pertenece: mínima indispensable, aceptable e ideal. Ejemplos de información por grupo y categoría se presentan en la Figura 46. A partir de esta clasificación, y del tipo del nivel de urgencia que se tenga en cada caso específico, deberán seleccionarse las actividades a promover para recopilar la información faltante. En casos de emergencia, la información utilizada para el diagnóstico y el diseño de la actuación emergente deberá ser la que se encuentre ya disponible. Esto permitirá contener el problema. Posteriormente, se deberá realizar el monitoreo de la actuación implementada y decidir si es necesario la implementación de futuras fases del proyecto. Estas futuras fases deberán tener como objetivo estabilizar el sistema, y posteriormente brindar resiliencia al mismo. Para estos casos, niveles aceptables e ideales de información, respectivamente, serán necesarios (Figura 47). En caso de que el problema no sea una emergencia, y se trate de una oportunidad de actuación, es deseable iniciar el diagnóstico con niveles aceptables e ideales de información.



Figura 45. Grupos de información y categorías de relevancia (modificado de Silva *et al.*, 2019).

Categoría	Grupo de información					
	Ecología	Geomorfología	Geología	Clima marítimo	Socioeconomía	Legislación
Mínima indispensable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de ecosistema costero</li> <li>• Distribución y extensión espacial de diferentes tipos de ecosistemas</li> <li>• Características del ecosistema</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Principales geoformas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Origen y principales características geológicas del sitio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formador principal de la costa</li> <li>• Oleaje, mareas y regímenes de corrientes.</li> <li>• Regímenes de viento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Datos poblacionales</li> <li>• Principales actividades económicas</li> <li>• Valor histórico o cultural de la zona.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zona marítima federal terrestre</li> <li>• Áreas naturales protegidas</li> </ul>
Aceptable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grado de conservación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Características del sedimento</li> <li>• Balance sedimentario</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Características de la mecánica del sedimento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrientes inducidas por el oleaje, de marea, transversales y longitudinales</li> <li>• Esfuerzo cortante en el fondo</li> <li>• Temperatura del aire, humedad, presión atmosférica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tasa de crecimiento poblacional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medidas de protección</li> <li>• Planificación territorial local</li> </ul>
Ideal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flujos en los ecosistemas (por ejemplo, cantidad y calidad de aguas subterráneas y superficiales; calidad de sustrato / sedimento)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evolución morfológica local</li> <li>• Previsión de respuesta costera a acciones proyectadas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis de la fuerza y resistencia de los sedimentos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluación del riesgo hidro-meteorológico</li> <li>• Predicción de consecuencias de eventos extremos y extraordinarios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Registros históricos de enfermedades vectoriales en la población.</li> <li>• Causas de mortalidad de flora, fauna y humanos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Normatividad federal, estatal y local para uso ecológico, de suelo y actividad específica.</li> </ul>
Componente ecológica		Componente física			Componente social	

Figura 46. Ejemplos de información por grupo y categoría (modificado de Silva *et al.*, 2019).

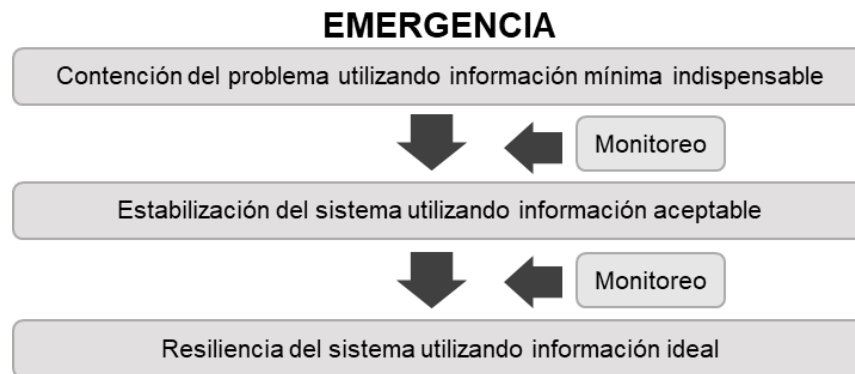


Figura 47. Esquema de actuación en casos de emergencia

### V.1.5 Preguntas para resolver durante el diagnóstico

Una vez recopilada la información adecuada, el diagnóstico deberá permitir identificar la perturbación y sus causas. Una vez que las causas sean determinadas correctamente, se podrán evaluar la factibilidad de la implementación de algún tipo de infraestructura verde. Este proceso se encuentra esquematizado en la Figura 48.

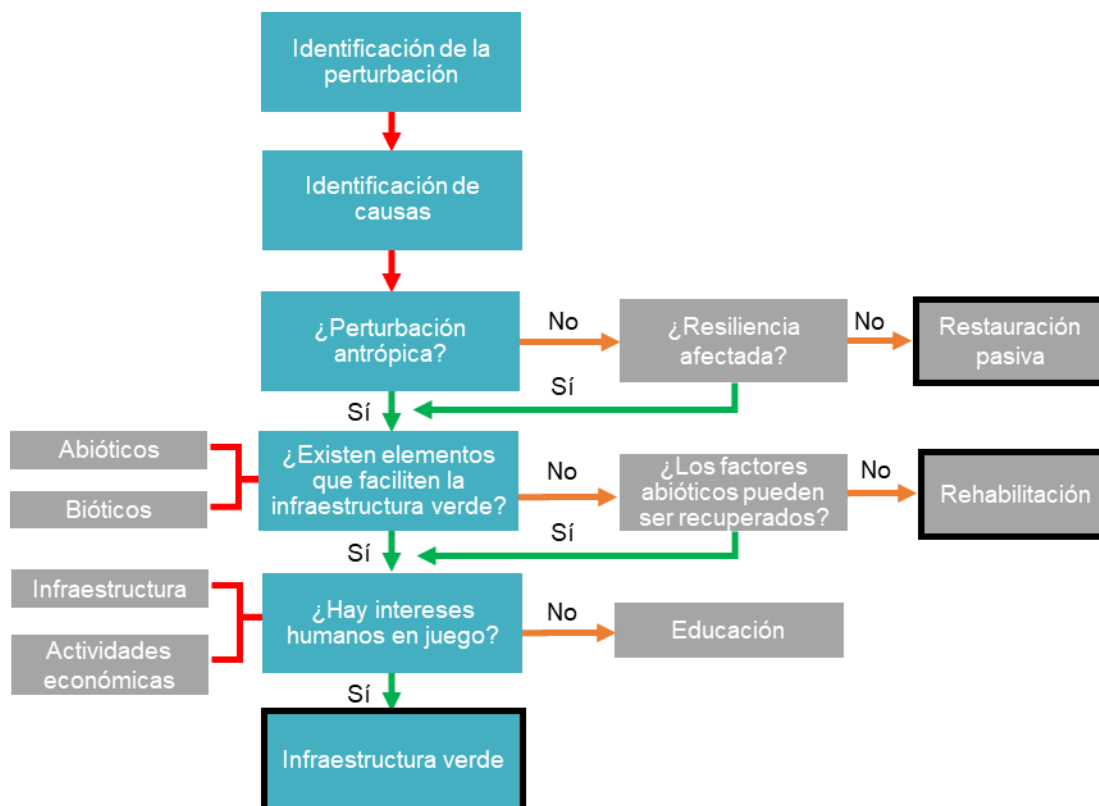


Figura 48. Preguntas a resolver durante el diagnóstico

## V.2 Resiliencia y resistencia de un sistema costero

La resiliencia se refiere a la capacidad de un sistema para asimilar los impactos y perturbaciones sin perder sus propiedades fundamentales, teniendo la capacidad de regenerarse después de ser alterado (Walker, 2002; INECC, 2007). La resistencia y la resiliencia permiten a los ecosistemas cierto grado de estabilidad. Sin embargo, cuando la extensión, magnitud y recurrencia de las alteraciones se intensifican, la resistencia y capacidad de resiliencia de los ecosistemas se vuelve insuficiente. Cuando la resistencia se rompe, el ecosistema cambia drásticamente hacia otro estado. La resiliencia tiende a “sanar” los daños derivados de alguna perturbación, pero, igual que la resistencia, tiene una capacidad limitada.

En la Figura 49 se observa que un ecosistema muestra resiliencia cuando es capaz de soportar modificaciones en el ambiente derivadas de perturbaciones. Una vez que las perturbaciones son de tal grado que llevan a su degradación, los ecosistemas no pueden recuperarse hasta que reciben la intervención. Por ejemplo, un proyecto de infraestructura verde basada en ecosistemas usando técnicas de restauración estimulan al sistema hacia su trayectoria histórica. Además, la infraestructura verde puede contribuir a incrementar los niveles de resistencia y resiliencia de los sistemas costeros mejorando su preparación para escenarios de alta incertidumbre y mantener la provisión de servicios ecosistémicos clave (Quiroz, 2018).

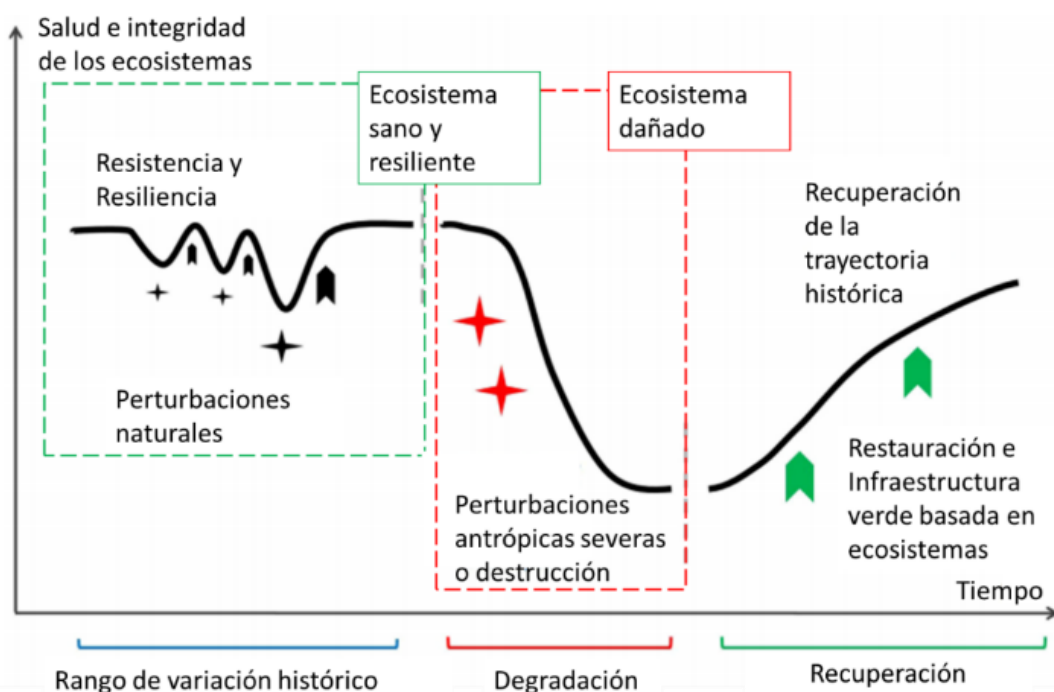


Figura 49. Relación entre el grado de naturalidad y la provisión de servicios ecosistémicos



### V.3 Mimetización de funciones naturales

Las poblaciones costeras tienen una alta dependencias de los servicios provistos por los ecosistemas que ahí se encuentran (Bell y Lovelock, 2013). Sin embargo, la provisión de dichos servicios se ha visto seriamente afectada por el deterioro de ecosistemas como arrecifes, praderas de pastos, playas, dunas y manglares. En este sentido, la infraestructura verde costera es considerada como una estrategia que favorece la sustentabilidad a largo plazo de las poblaciones costeras porque promueve la recuperación de servicios ecosistémicos clave.

De manera similar a la infraestructura tradicional, el objetivo de la infraestructura verde es la solución de un problema, por ejemplo, la erosión costera. Sin embargo, la infraestructura verde es multifuncional. Uno de los principales objetivos de este tipo de infraestructura es la recuperación de servicios ecosistémicos y brindar el nivel de riesgo aceptable por la sociedad. Esta recuperación se puede lograr a través de la restauración de ecosistemas degradados o bien por la implementación de infraestructura tradicional que sea capaz de mimetizar o de fortalecer a un ecosistema específico como los arrecifes artificiales. La capacidad de recuperar servicios incrementa con el grado de naturalidad de las intervenciones (Figura 50).

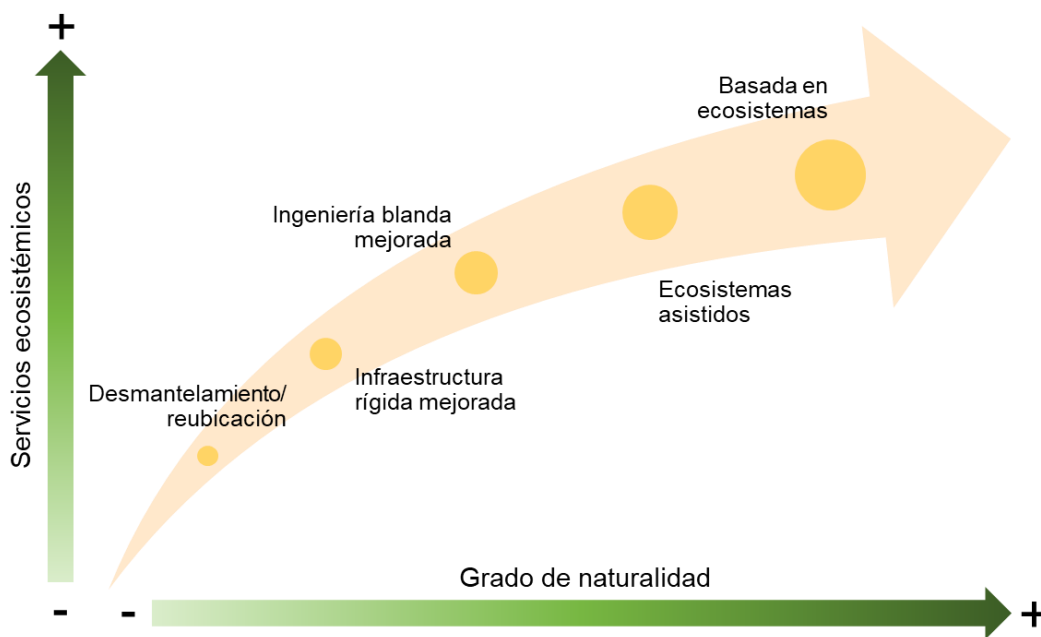


Figura 50. Relación entre el grado de naturalidad y la provisión de servicios ecosistémicos

## V.4 Conservación de flujos de materia y energía

La zona costera es un sistema abierto formado por materia, energía y procesos que están interconectados de diversas maneras entre sí y con los ecosistemas que los rodean (Figura 51). Además, este sistema es altamente dinámico porque posee una serie de gradientes o ecotonos (zonas de transición entre dos ambientes) que se encuentran ligados por los flujos antes mencionados. El agua es la principal responsable de los flujos de materia y energía en su dirección tierra-mar y la atmósfera en el caso inverso (García-Hoyos *et al.*, 2010; Ortiz *et al.*, 2010).

La mayor parte de la energía que necesitan los componentes biológicos de los ecosistemas se obtiene del sol en forma de luz, la cual es transformada mediante la fotosíntesis en energía química y es transportada a todos los eslabones de la cadena trófica, retornando al medio a través de los descomponedores. De esta manera se produce un flujo abierto de materia y energía (Sáez *et al.*, 2014).

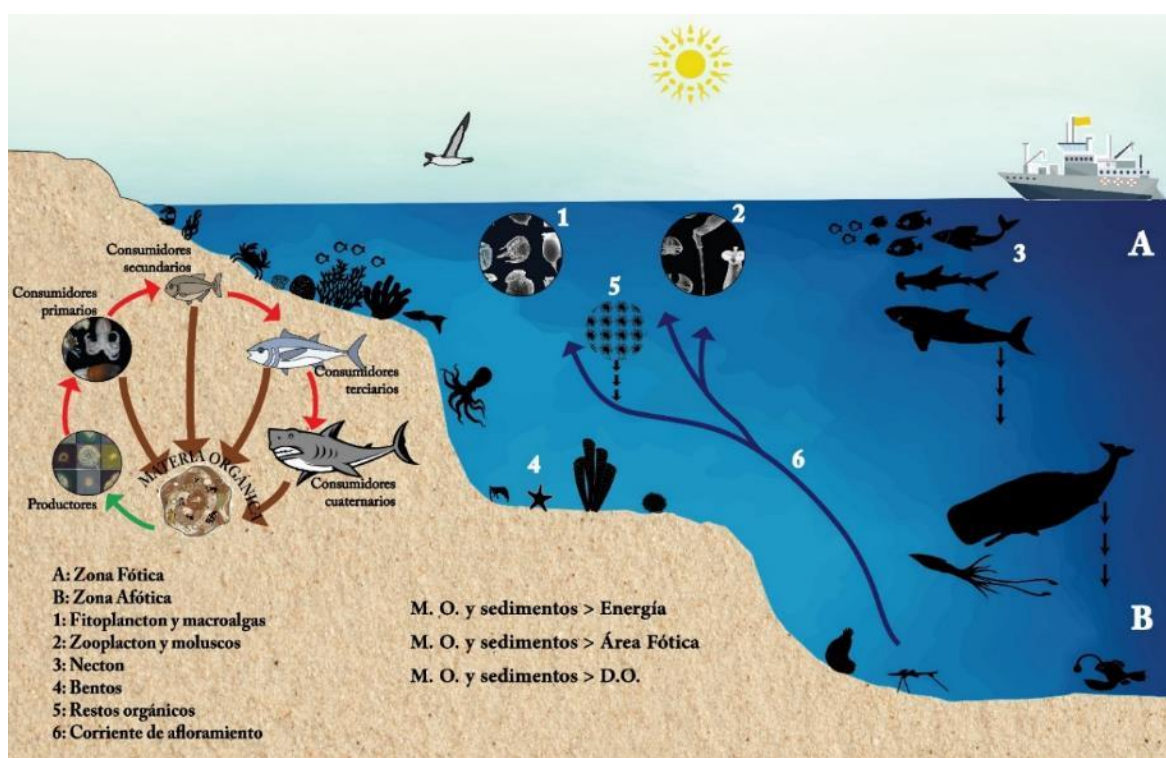


Figura 51. Conectividad en la zona fótica

Los proyectos desarrollados bajo un enfoque de infraestructura verde deberían permitir la recuperación total o parcial de los flujos de materia y energía.

En los casos donde la recuperación total no es factible, a menudo es posible realizar la construcción de estructuras o la implementación de acciones que mimeticen algunas

funciones del ecosistema en cuestión. En ambos casos, tratar de garantizar la conectividad dentro y entre ecosistemas es clave para incrementar las posibilidades de éxito de la intervención.

En el caso de los elementos abióticos, la conservación de flujos hidro sedimentarios permite conservar al sistema en su estado de equilibrio dinámico y la permanencia de los elementos bióticos. Por ejemplo, la dinámica del oleaje resulta en el transporte de sedimentos hacia tierra que alimenta las playas de arena. Cuando el oleaje producidas por tormentas erosionan una playa, la arena es rápidamente arrastrada en grandes cantidades por el oleaje y se deposita en las zonas cercanas a la costa. La arena es devuelta a la playa durante un período de meses a años en condiciones climáticas moderadas. Esto se conoce como el ciclo de erosión y acreción.

Al construir una estructura en la costa, que interrumpa o cambie los ciclos naturales de erosión y acreción del sistema, se pueden presentar alteraciones indeseables (Figura 52). Es por ello que el diseño de soluciones de protección costera con infraestructura verde debe incluir la integración de la interconectividad de los flujos de materia y energía. Los diseñadores de este tipo de infraestructura deben procurar garantizar que todas las entradas y salidas de materia y energía no impacten negativamente al sistema. Tres ejemplos de efectos no deseados de infraestructura tradicional se presentan en la Figura 53.

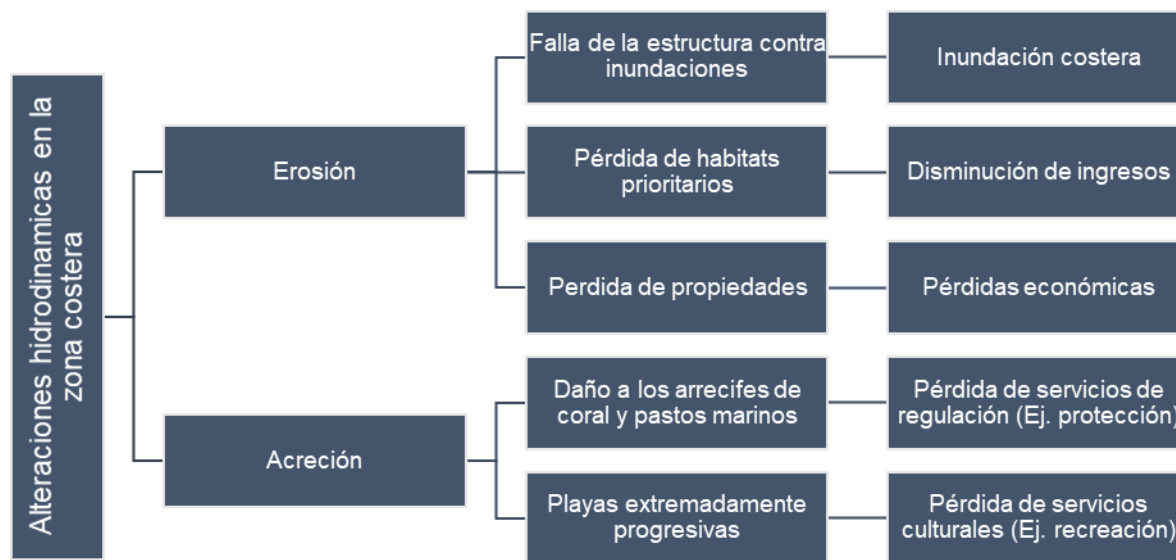
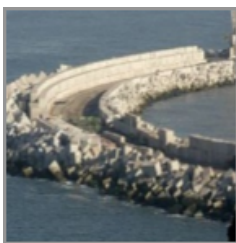


Figura 52. Alteraciones hidrodinámicas en la zona costera



### Rompeolas

- Induce socavación en los cimientos de la estructura.
- Causa erosión.
- Requiere mantenimiento regular.
- Normalmente es requerida más de una estructura.



### Escolleras

- Causa el transporte de los sedimentos mar adentro.
- Socavación en playas erosionadas.
- No promueve la estabilidad de las playas.
- Debe construirse a lo largo de toda la costa o se erosionará la parte no protegida.



### Rompeolas verticales

- Son estructuras de grandes longitudes, difíciles de construir.
- La estructura es vulnerable a la energía del oleaje.

Figura 53. Ejemplos de efectos no deseados producidos por estructuras costeras tradicionales

## V.5 Utilización de recursos locales

Si se toman en cuenta los beneficios asociados, los proyectos de infraestructura verde suelen ser menos costosos que los proyectos de infraestructura tradicional. Esto se debe, entre otras cosas, a la posibilidad de utilizar recursos locales que pueden ser materiales (sedimento, troncos, plantas) o humanos (expertos, jardineros voluntarios, constructores, mano de obra en general, entre otros) y a una serie de servicios ecosistémicos que son generados.

Los recursos materiales incluyen la obtención de sedimento de zonas cercanas que puede ser transportado o atrapado en el sitio intervenido por medios naturales o artificiales. Por ejemplo, la recuperación de dunas necesita de arena que, en caso de que esté disponible en el sistema, puede ser atrapada con retenedores contruidos con materiales locales como troncos y ramas.

Una vez que los montículos de arena son contruidos, se necesita inducir la vegetación natural del sistema. La selección de especies debe hacerse considerando la vegetación de sitios de referencia y complementada con la consulta local.

Las semillas y propágulos de las especies elegidas pueden ser recolectadas de sistemas cercanos y reproducidos en viveros comunitarios. Las actividades relacionadas con la revegetación también podrían ser apoyadas por habitantes de zonas cercanas, escuelas, programas de voluntarios, entre otros.

La utilización de especies locales es de gran relevancia porque evita impactos asociados a la introducción de especies invasoras e incrementa las posibilidades de éxito de la intervención.

En el primer caso, la introducción de especies es una de las preocupaciones globales por los impactos que tienen sobre los ecosistemas en los cuales son introducidas. El control y erradicación de estas especies están entre los objetivos principales de costosas intervenciones alrededor del mundo (Castillo y Moreno-Casasola, 1996). Entre los efectos que tienen estas especies están la limitación de la cantidad de luz, alteración de las propiedades químicas del suelo y la hidrología de los lugares en que son introducidas. En las dunas del mundo se pueden encontrar diversos ejemplos de introducción de especies para fijar, así como los costos esfuerzos por removerlas (Lithgow *et al.*, 2013).

Por otro lado, el uso de plantas locales incrementa el éxito de acciones de revegetación porque las plantas adaptadas a las condiciones de la zona tienen mayores tasas de supervivencia. Es así como los costos del proyecto disminuyen de manera importante.

Los proyectos de infraestructura verde tienen diversos beneficios desde el punto de vista social, entre ellos, fuentes de empleo durante las fases de construcción, reproducción de especies y monitoreo de los proyectos. El empleo de los beneficiados por un proyecto en su construcción, puede incrementar las posibilidades de éxito. Esto se debe a que los beneficiados desarrollan un sentido de pertenencia y están más interesados en vigilar las intervenciones, así como a combatir actividades desfavorables como el vandalismo.

En los ejemplos de la sección IV.5, los pobladores fueron involucrados antes de la construcción de los proyectos. Los niveles de involucramiento varían de un proyecto a otro, pero se puede encontrar la participación en actividades como la recolección de especies de plantas para su reproducción en viveros, el establecimiento de viveros y la posterior revegetación (Casos: Brasil y Ciénega del Fuerte). También, destacan las campañas de sensibilización y educación ambiental que incluyeron desde escuelas hasta turistas. Estas actividades favorecen el éxito de las intervenciones porque los usuarios informados son más propensos a seguir las reglas establecidas. Por ejemplo, caminar por las pasarelas o por los caminos delimitados para evitar el pisoteo de las zonas revegetadas.

Finalmente, un proyecto de infraestructura verde puede convertirse en una oportunidad para fomentar diferentes procesos sociales como los mencionados a continuación (modificados de Carballo-Cobas, 2018):

- Fomentar una ética ambiental, pública y racional respecto a los problemas costeros.
- Formar recursos locales con interés en comprender la interacción de la sociedad con el entorno y que participen en la búsqueda de posibles soluciones a los problemas que afectan a la zona costera.
- Generar información incluyendo los saberes tradicionales y a los expertos locales.

- Divulgar la información obtenida sobre la problemática e incluir a los diferentes actores en la toma de decisiones relacionadas con la gestión costera.
- Coadyuvar en el desarrollo de capacidades para la divulgación de la información obtenida, facilitando la prevención y solución de los problemas costeros.
- Fomentar el compromiso y sentido de corresponsabilidad con respecto a los procesos que determinan la salud de la zona costera.

## PRINCIPIOS PARA LA UTILIZACIÓN DE RECURSOS LOCALES



Considerar el medio ambiente en su totalidad, pues el mismo incluye aspectos naturales y los creados por el hombre (económicos, sociales y culturales).



Estudiar el medio ambiente a partir de un enfoque interdisciplinario, aprovechando el contenido específico de cada disciplina, de modo que se adquiriera una perspectiva global y equilibrada.



Analizar la educación ambiental como un proceso continuo y permanente que comienza por los primeros años de vida, y continúa por todos los niveles de enseñanzas formales e informales, y nos debe acompañar en la vida cotidiana.



Examinar las principales cuestiones ambientales desde el punto de vista local, regional e internacional.



Establecer una relación entre la sensibilización por el medio ambiente, la adquisición de conocimientos, las aptitudes y actitudes para resolver problemas y la clarificación de los valores.

Figura 54. Principios recomendados para la utilización de recursos locales (modificado de Carballo-Cobas, 2018).



## V.6 Participación de los actores locales

La participación de actores locales en todas las fases de los proyectos de infraestructura verde (diseño, implementación y monitoreo), es un factor clave para el éxito de los mismos.

Dentro de los actores locales, que participan en las diferentes fases de un proyecto, se encuentran:

- Comunidades locales
- Expertos en las diferentes disciplinas que se involucran en el proyecto
- Tomadores de decisiones:
  - Empresarios
  - Gobierno
- Organizaciones no gubernamentales (ONGs)

Los expertos locales deben estar involucrados en la elección de la solución. Esto incluye la definición de objetivos y metas, la realización de las actividades de investigación y análisis para el diagnóstico, la identificación de áreas prioritarias, el diseño y el monitoreo. Es por ello que en un proyecto de infraestructura verde es necesario realizar campañas de disseminación y consultas con las comunidades locales y con tomadores de decisiones (Colls *et al.*, 2009)

De vital importancia es la participación de las comunidades locales durante la implementación del proyecto y el monitoreo. Al mantener sinergias positivas, estos grupos podrán participar en la ejecución de distintas actividades y, en algunas ocasiones, en el financiamiento de estas.

Algunos logros esperados después de cualquier tipo de campaña de concientización que involucre a los actores locales se enlistan en la Figura 55.

LOGROS ESPERADOS EN CAMPAÑAS CON ACTORES LOCALES



Incremento del nivel de conocimientos conceptuales en la población beneficiaria



Empoderamiento de la comunidad para el abordaje de las situaciones ambientales en su entorno



Generación de espacios de encuentro comunitario



Fortalecimiento de los lazos de amistad y solidaridad sin distinción de sexo, raza, edad, nivel socioeconómico o nivel académico



Promoción de la participación ciudadana en el mejoramiento de su calidad de vida



Diseño participativo de proyectos como los relativos a la solución del deterioro de los ecosistemas locales e implementación de infraestructura verde



Mejoramiento de las competencias para el trabajo en equipo



Mejoramiento de las competencias grupales para la transferencia de las experiencias a otras comunidades

Figura 55. Logros esperados para cualquier tipo de campaña, concientización o técnica implementada por los actores locales (modificado de Carrero de Blanco y García, 2008).

## V.7 Monitoreo

El monitoreo constante de las obras de infraestructura verde es un elemento vital porque permite evaluar el éxito del proyecto, así como identificar posibles complicaciones e intervenir en las mismas. El éxito de un programa de monitoreo está estrechamente ligado a que sea diseñado, presupuestado e implementado previamente al inicio del proyecto. Además, siempre que sea posible, debe comprender algún grado de participación de la comunidad.

Uno de los principales retos relacionados con las actividades de monitoreo es la transferencia efectiva de la información generada a los tomadores de decisiones e incorporar sus aportaciones en el proyecto. Para ello, se deben llevar a cabo talleres con expertos y tomadores de decisiones, donde los parámetros preliminares se establezcan de acuerdo con su importancia e interés. Existen varias metodologías para el trabajo participativo, como la matriz de impacto y esfuerzos (Kneebone *et al.*, 2017), técnicas de optimización (Rustagi, 2014) o análisis multivariado (Bartholomew *et al.*, 2008).

El monitoreo puede dividirse en dos tipos: académico y participativo.

El monitoreo del tipo académico asegura estándares de calidad muy altos porque es ejecutado por un equipo de expertos. El segundo caso, monitoreo participativo, permite la inclusión de personas con diferentes grados de preparación y sin entrenamiento científico que, normalmente, son capacitados por grupos de expertos que también los acompaña durante las primeras fases. A largo plazo, este tipo de monitoreo tiene beneficios como el apropiamiento de los proyectos, incrementando las posibilidades de éxito. También, se pueden mezclar y complementar ambos tipos de monitoreo.

El monitoreo permitirá evaluar el desempeño del proyecto, incluyendo tanto la evaluación del estado de la estructura en intervalos de tiempo fijos (o después de eventos extremos), así como el éxito del proyecto en términos de los efectos esperados (por ejemplo, la provisión del servicio de protección costera) (Figura 56).

Entre los elementos evaluados durante el monitoreo, se encuentran parámetros físicos, ecológicos y socioeconómicos que deben ser medidos en el sitio, además del correspondiente análisis de gabinete y de laboratorio. Las variables que deben monitorearse corresponden, en términos generales, a la información recabada durante el diagnóstico (Figura 46). Por ejemplo, en la Figura 57 se encuentra una lista de variables físicas y ecológicas que se pueden monitorear en proyectos de restauración de playas y de pastos marinos (una solución Basada en Ecosistemas, Figura 16) para evaluar su desempeño (de acuerdo con Baldera *et al.*, 2018).

La frecuencia e intensidad del monitoreo puede variar dependiendo de la complejidad y urgencia de la obra implementada. Es importante destacar que se deben diseñar e implementar protocolos específicos para cada caso porque la frecuencia, intensidad y tipo de monitoreo deben ser suficientes para comprender la dinámica y el carácter estructural de los elementos biofísicos, hacer predicciones de su comportamiento en condiciones normales y durante eventos extremos, así como determinar el impacto de los proyectos en la sociedad. Entre las consideraciones que se deben tener en el diseño y ejecución de un

programa de monitoreo, se encuentran la disponibilidad de recursos a largo plazo, cantidad y calidad de datos, periodo a ser monitoreado, entre otros (Figura 58).

El monitoreo debe integrarse como un elemento clave que permita la toma de las mejores decisiones posibles y que genere proyectos con niveles de riesgo adecuados al equilibrio que se debe de dar entre los intereses humanos y la conservación los procesos naturales de los ecosistemas.

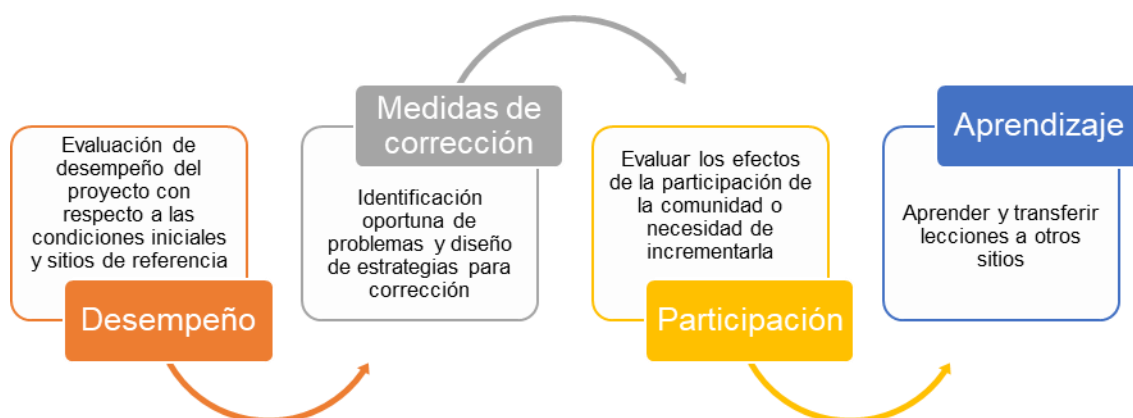


Figura 56. Objetivos de los programas de monitoreo en proyectos de infraestructura verde

Ejemplo de variables a medir	
Extensión y condición del hábitat	• Incremento en la extensión y condición de la restauración, creación y preservación de cada tipo de hábitat.
Conectividad del hábitat	• Proximidad del proyecto de restauración con otros hábitats naturales protegidos.
Composición de las especies	• Utilización del hábitat restaurado por especies (o diversidad de especies) identificadas en la narrativa del proyecto.
Abundancia y recuperación de especies	• Incremento en la abundancia de las especies objetivo.
Conectividad del paisaje costero	• Conexiones físicas, químicas y biológicas de entrada y salida de cuerpo de agua.
Progreso en la restauración normativa de flujos (de agua dulce)	• De acuerdo a cada proyecto, recolección en cuencas o estuarios individuales.
Transporte de sedimentos	• Elevación del hábitat costero; Cambios en la línea de costa.
Descarga de nutrientes	• Reducción en la descarga de nutrientes en la cuenca o subcuencas

Figura 57. Variables de monitoreo para proyectos de restauración de playas y pastos marinos, según Baldera *et al.* 2018

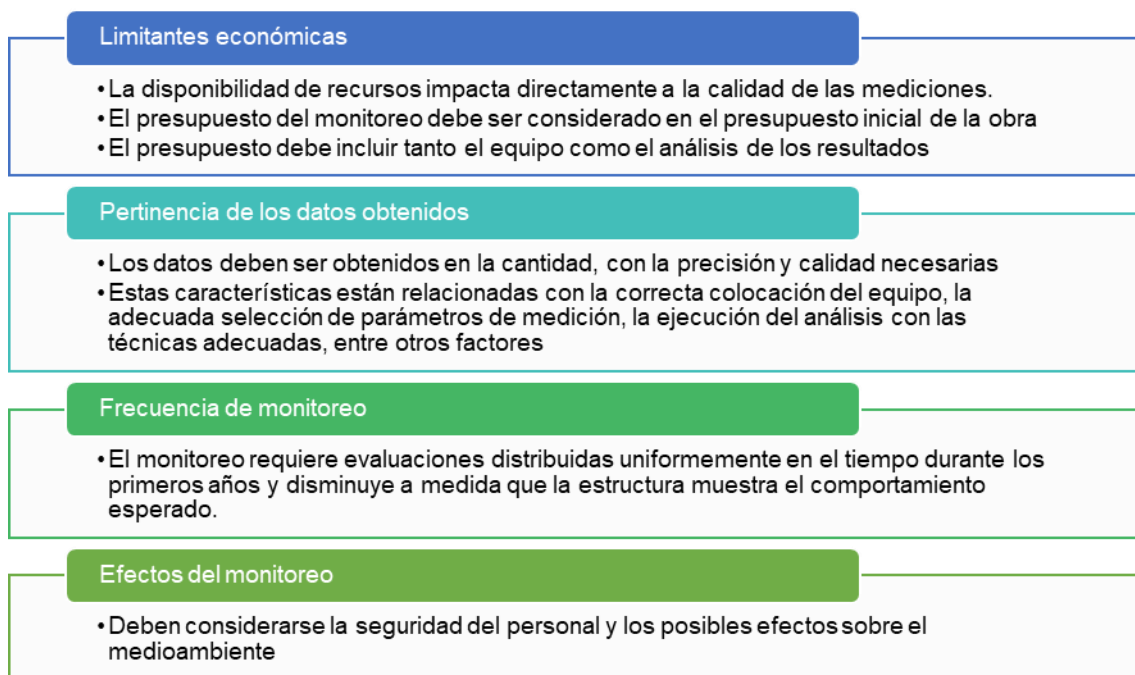


Figura 58. Elementos a considerar durante la planeación y ejecución de los planes de monitoreo

## **VI. Evaluación de la efectividad de infraestructura verde: pruebas físicas y numéricas**

### **VI.1 Pruebas físicas**

Los arrecifes de coral del mundo son considerados los ecosistemas marinos biológicamente más diversos y económicamente valiosos del mundo. Además, muchas playas en las áreas de arrecifes de coral son importantes porque respaldan actividades económicas y sociales asociadas con el turismo. Sin embargo, el aprovechamiento no sustentable de estas zonas induce una mayor presión antrópica sobre las regiones costeras de muchos países, lo que lleva a una degradación progresiva de los ecosistemas costeros.

La protección costera debe mitigar la vulnerabilidad a la erosión e inundaciones, así como restaurar y proteger los ecosistemas. Para proteger las playas de arena en las áreas de arrecifes de coral, las estructuras homogéneas de baja cresta (HLCS) hechas de rocas grandes o elementos de concretos prefabricados son una opción, en lugar de las estructuras convencionales de baja cresta (LCS) sin núcleo. La protección natural que brinda un arrecife de coral puede ser mimetizada con un HLCS, el cual es una infraestructura verde multipropósito (ecosistema asistido o infraestructura rígida mejorada con el uso de ecosistemas) (ver Silva *et al.*, 2017).

Como rompeolas, un HLCS protege la costa como un LCS convencional, pero con un impacto ambiental reducido (construcción limpia, reutilizable, fácil desmantelamiento, etc.). Los elementos del HLCS ofrecen una estructura estable y altamente porosa que puede soportar oleaje de tormentas extremas, lo que facilita la restauración del ecosistema marino y proporciona zona de sombra y luz dentro de la estructura, favoreciendo la biodiversidad local. Además, las HLCS favorecen la conectividad de los ecosistemas (Figura 59). La Figura 60 ilustra posibles adaptaciones basadas en la naturaleza que puede incluir diques HLCS, funcionando como una solución para mitigar la erosión costera, considerando la estética del paisaje y la recuperación de los arrecifes de coral. Dentro de sus funciones destacan:

- Mayor disipación de energía del oleaje, menor transmisión y protección de playas.
- Mayor control de las corrientes litorales y la evolución de playas.
- Facilitan la colonización coralina pasiva.
- Atraen y sostienen gran variedad de peces y otras especies marinas.
- Crean nuevas zonas de atracción turística sostenible.
- Son una nueva infraestructura verde para recuperar arrecifes de coral.
- No modifican la turbidez del agua.
- En lugares donde los aportes sedimentarios son escasos evitan rellenos artificiales que dejan afectados otros ecosistemas.

Las adaptaciones basadas en la naturaleza no deben disminuir la estabilidad del dique o su capacidad para ofrecer protección costera. Es decir, los diques ecológicos deben tener en cuenta los conflictos entre el valor ecológico y la seguridad del dique. Por ello, analizar la estabilidad estructural y la efectividad de protección de diques que puedan ser mejorados



ecológicamente, es de suma importancia para garantizar el éxito de la solución. En el Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se realizó la evaluación de una nueva alternativa de infraestructura verde: **Protección de playas en zonas de coral utilizando una estructura homogénea de baja cota.**



Figura 59. Conectividad entre ecosistemas costeros (Tomada de <https://www.usc.edu.au/research-and-innovation/animal-and-marine-ecology/marine-and-coastal-ecology>)

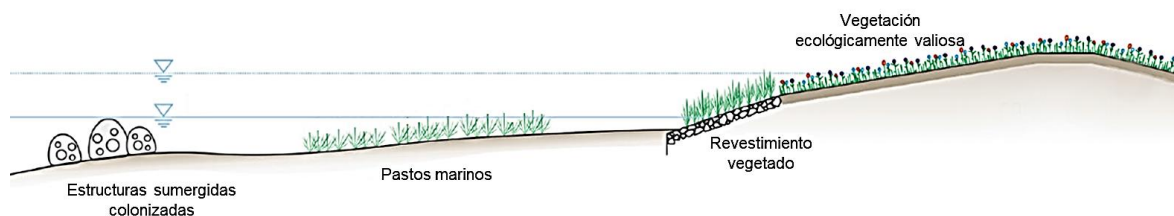


Figura 60. Sistema con presencia de dique, mejorado ecológicamente (modificado de Schoones *et al.*, 2019).

A continuación, se presentan los resultados de ensayos de laboratorio con una tipología particular, sin embargo, es importante señalar que bajo las hipótesis establecidas en el presente estudio bien se pudo analizar la efectividad de otras tipologías, incluyendo el uso de la roca natural. Aspectos clave para determinar si estos elementos pueden constituirse como una solución verde son la posibilidad de mimetizar funciones de un arrecife natural, p.e. la de albergar hábitats y disipar energía.

### VI.1.1 Hipótesis

La efectividad de un HLCS de prefabricados para protección costera, puede definirse en un modelo a escala de laboratorio en función de la estabilidad hidráulica, el coeficiente de transmisión (relación entre la altura de ola transmitida y la incidente,  $C_t = H_{st}/H_{si}$ ), el

coeficiente de reflexión (relación entre la altura de ola reflejada y la incidente,  $C_r=H_{sr}/H_{si}$ ), y el coeficiente de disipación  $C_d$  ( $C_r^2+C_t^2+C_d^2=1$ ).

### VI.1.2 Características del prefabricado de concreto (Cubípodo)

El Cubípodo es un elemento prefabricado hecho de concreto utilizado para la construcción de rompeolas y revestimientos (Figura 61). Es un elemento masivo que soporta la acción de las olas debido principalmente a la gravedad y la fricción lateral. Gracias a la forma en que está diseñado, el nivel de estabilidad hidráulica de Cubipod es extremadamente alto, con coeficientes similares a los elementos delgados y voluminosos. Algunas de las ventajas más destacadas incluyen su costo de producción más económico y su estructura más resistente, además del hecho de que los procesos de fabricación, almacenamiento y colocación son mucho más fáciles. Otras ventajas incluyen una alta fricción con la capa inferior; la porosidad de la armadura permanece constante a lo largo de la vida útil de la estructura, las armaduras de los Cubípodos tienen un comportamiento flexible en la acción de los frentes de ola y los asentamientos y no tienen limitación de tamaño o profundidad (<http://www.cubipod.com>).



Figura 61. Cubípodos para la construcción de diques en talud (<http://www.ohlinnovacion.com>)

La propuesta de los ensayos desarrollados en el Instituto de Ingeniería, contempla la construcción de una estructura homogénea de baja cota (HLCS) conformada por Cubípodos (Figura 62).

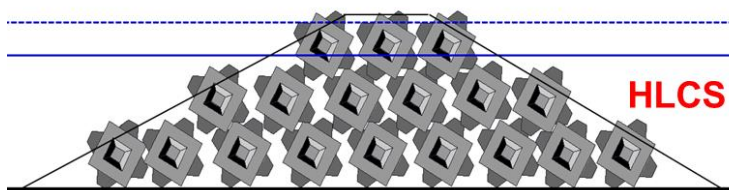


Figura 62. Cubípodos para la construcción de una HLCS

### VI.1.3 Escala de los Cubípodos

Para las pruebas físicas, se contó con dos modelos de Cubípodos a escala cuyas características se presentan en la Figura 63. El factor de escala de similitud hidráulica se determinó bajo el criterio de Froude, considerando una L real de 150 m.

Característica	CUBÍPODO 1	CUBÍPODO 2
L (cm) del modelo	4.00	3.50
D <sub>n50</sub> (cm)	4.35	3.80
Volume (ml)	82.51	55.00
Mass (g)	188.13	125.63
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.28	2.28
Factor de escala geométrica	37.5	42.86

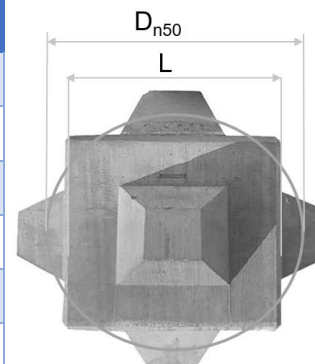


Figura 63. Características de los Cubípodos a escala

### VI.1.4 Estructuras empleadas

Las pruebas físicas se realizaron para 3 diferentes estructuras conformadas por Cubípodos, como se muestra en la Figura 64. La estructura A contó con una sola capa conformada por 2 líneas de Cubípodos; la estructura B, con 5 capas de 11, 9, 7, 5 y 3 líneas de Cubípodos; y la C, con 3 capas de 9, 6 y 3 líneas de Cubípodos.



Figura 64. Estructuras empleadas en las pruebas físicas

### VI.1.5 Características del canal de oleaje y arreglo experimental

El canal de oleaje tiene 22 m de largo, 0.60 m de alto, 0.40 m de ancho, con paredes de vidrio templado y una estructura de acero inoxidable. El sistema de generación de oleaje consiste en una pala de tipo pistón de acero inoxidable montada debajo de un transmisor de accionamiento eléctrico, el cual se encuentra suspendido de una estructura ajustada a las paredes del canal (Figura 65). En la parte final del canal, fue colocada una estructura disipadora de grava de río para disminuir la reflexión del oleaje y poder estar así bajo un estado de ondas progresivas.



Figura 65. Canal de oleaje (izq.) y pala generadora de oleaje (der.)

El arreglo experimental empleado se presenta en la Figura 66. Para determinar la variación de la superficie libre del agua se utilizaron sensores de nivel piezorresistivos, los presentan el identificador “WG”. Para los ensayos realizados se emplearon 8 sensores a lo largo del canal, estando el primer sensor ubicada a 6.58 m de la pala generadora de oleaje. Las estructuras ensayadas se colocaron a 12 m de la pala generadora de oleaje, y en cada caso, la profundidad del agua en el canal se modificó para cumplir con los niveles de francobordo seleccionado para los diferentes casos ensayados (detallados en la siguiente sección).

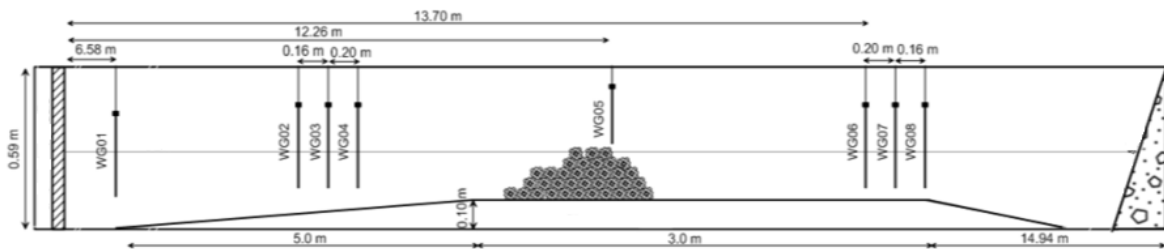


Figura 66. Arreglo experimental

#### VI.1.6 Condiciones de los casos ensayados

Las tres estructuras (A, B y C), bajo las dos diferentes escalas de Cubípodos, fueron expuestas a tres trenes de oleaje irregular, de 20 minutos cada uno, bajo un espectro Jonswap ( $\gamma=3.3$ ). En total, se realizaron 54 ensayos, en la Tabla 1 se presentan las condiciones seleccionadas para cada uno de ellos.

Tabla 1. Condiciones de los casos ensayados ( $H_{si}$ : Altura de ola significativa incidente,  $T_{pi}$ : Periodo pico incidente, Fb: Francobordo)

Ensayo	Escala	$H_{si}$ (cm)	$T_{pi}$ (s)	Fb (cm)
A01	1/37.5	1.85	1.28	0
A02		1.89	1.28	-1
A03		1.92	1.28	-2
A04		3.72	1.71	0
A05		4.17	1.71	-2
A06		3.92	1.48	-5
A07		4.40	2.06	0
A08		5.53	1.94	-2
A09		6.26	1.94	-5
A10	1/42.8	2.92	1.26	-1
A11		2.97	1.26	-2
A12		2.90	1.26	-4
A13		4.10	1.58	-1
A14		4.25	1.56	-4
A15		4.00	1.56	-6
A16		5.03	2.09	-1
A17		6.83	2.09	-4
A18		7.38	2.09	-6
B01	1/37.5	4.47	1.17	2
B02		4.44	1.17	1
B03		4.86	1.28	0
B04		8.54	1.48	2
B05		8.67	1.48	0
B06		8.32	1.48	-3
B07		9.31	1.76	2
B08		9.53	1.76	0
B09		9.81	1.76	-3
B10	1/42.8	4.46	1.27	4
B11		4.95	1.27	3
B12		4.88	1.27	1
B13		9.81	1.63	4
B14		9.91	1.71	1
B15		10.25	1.71	-1
B16		10.38	1.91	4
B17		10.34	1.91	1
B18		11.56	1.91	-1

Continúa Tabla 1. Condiciones de los casos ensayados (H<sub>si</sub>: Altura de ola significativa incidente, T<sub>pi</sub>: Periodo pico incidente, Fb: Francobordo)

Ensayo	Escala	H <sub>si</sub> (cm)	T <sub>pi</sub> (s)	Fb (cm)
C01	1/37.5	4.69	1.28	2
C02		4.62	1.28	1
C03		4.35	1.28	0
C04		6.58	1.71	2
C05		6.55	1.71	0
C06		6.87	1.48	-3
C07		6.57	2.06	2
C08		7.25	1.78	0
C09		8.51	1.81	-3
C10	1/42.8	4.72	1.26	3
C11		4.76	1.26	2
C12		4.70	1.26	1
C13		7.21	1.62	3
C14		7.50	1.62	1
C15		7.70	1.62	-3
C16		7.30	2.09	3
C17		7.55	2.19	1
C18		9.47	2.09	-3

## VI.1.7 Resultados

En las siguientes figuras se encuentran las gráficas de los coeficientes de disipación, transmisión y reflexión, para los todos los ensayos realizados, por tipo de estructuras.

Para la estructura tipo A:

- La energía del oleaje reflejado ( $C_R^2$ ) aumenta con  $R_o/H_{si}$ , de 8% a 18%.
- La energía del oleaje transmitida ( $C_T^2$ ) decrece linealmente con  $R_o/H_{si}$  y  $R_o/L$ .
- $C_T^2 > C_d^2$  para  $R_c/L < -2$  y  $R_o/H_{is} < -0.75$ , por lo tanto, la energía transmitida es mayor que la disipada.
- La energía disipada ( $C_d^2$ ) aumenta cuando  $R_o/H_{si}$  y  $R_o/L$  decrece y la rotura de olas es más intensa.
- La reflexión ( $C_R^2$ ) decrece si el francobordo decrece.

Para la estructura tipo B:

- La energía del oleaje reflejada ( $C_R^2$ ) aumenta de 8% a 16% (un poco más lento que en el caso de la estructura A).
- La energía transmitida ( $C_T^2$ ) decrece linealmente con  $R_o/H_{si}$  and  $R_o/L$ .
- La energía disipada ( $C_d^2$ ) aumenta cuando  $R_o/H_{si}$  y  $R_o/L$  decrece



- La reflexión ( $C_d^2$ ) varía entre 40% y 65% para  $-1.5 < R_d/L < +1.5$ .

Para la estructura tipo C:

- Se encontró un comportamiento similar a la estructura A en relación con la variación del francobordo
- Es más disipativa que la estructura B
- Se encontraron coeficientes de reflexión similares a los casos anteriores.
- La energía transmitida ( $C_T^2$ ) varía de 20 a 55%

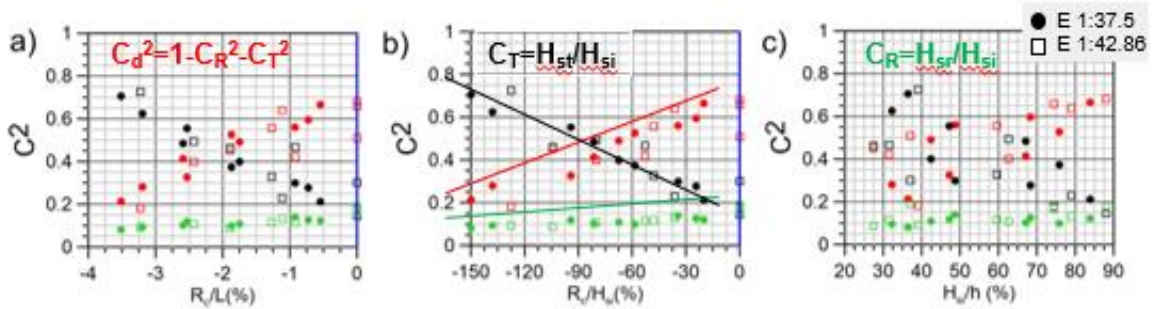


Figura 67. Resultados estructuras tipo A

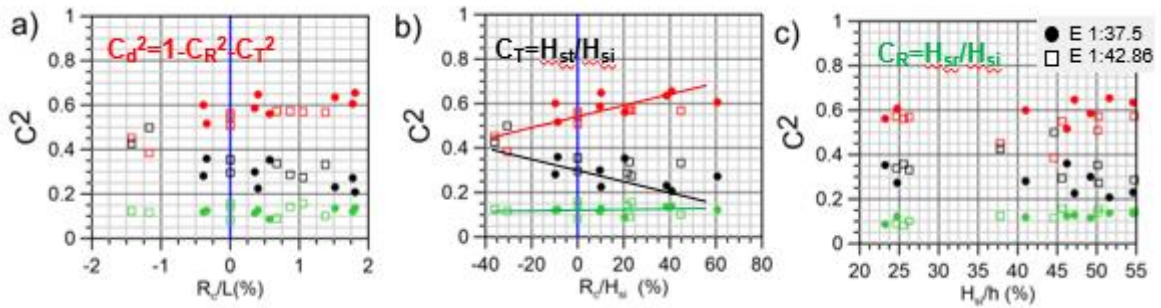


Figura 68. Resultados estructuras tipo B

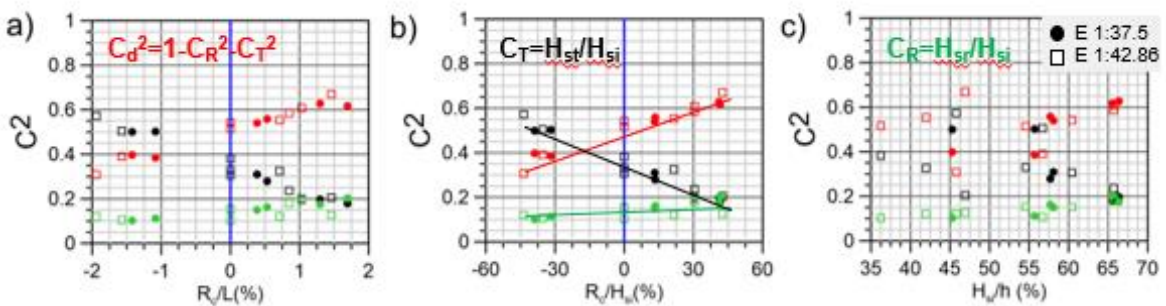


Figura 69. Resultados estructuras tipo B

Los resultados permiten determinar que es recomendable para el diseño, que el ancho de la cresta sea por lo menos de 3 unidades de Cubípodos para una mayor eficiencia, y que el pie de la estructura debe tener al menos 3 unidades de Cubípodos.

Se determinó de manera empírica, que para una HLCS de Cubípodos:

- La transmisión aumenta con los francobordos más bajos.
- Existe un umbral a partir del cual la transmisión de energía excede la energía.
- La transmisión de energía de onda disminuye linealmente con  $R_o/H_{si}$  y  $R_o/L$ .
- El coeficiente de reflexión aumenta ligeramente con el francobordo de la cresta.
- El comportamiento hidrodinámico (reflexión, disipación y transmisión) es semejante al de un arrecife natural.

### VI.3 Pruebas numéricas

Para el caso de Puerto Morelos, México (Figura 70), se seleccionó la zona costera ubicada frente al hotel Now Jade, el cual previamente ya ha sido intervenido por infraestructura verde en dos fases anteriores (arrecife artificial, Figura 71) para mitigar el riesgo de erosión al cual se enfrentan desde el año 2007 tras el paso del huracán Dean (Silva *et al.*, 2016b). En este sitio, las pruebas numéricas se han seleccionado para la tercera fase de un proyecto que se encuentra en curso: restauración de una duna con relleno artificial (Figura 72). En esta sección se presentan los resultados de las pruebas numéricas. Los detalles de la selección e implementación de alternativas para las diferentes fases del proyecto se presentan en la sección IV. Estudios de Caso.



Figura 70. Localización de Puerto Morelos, Quintana Roo, México (imagen modificada de Google Earth).

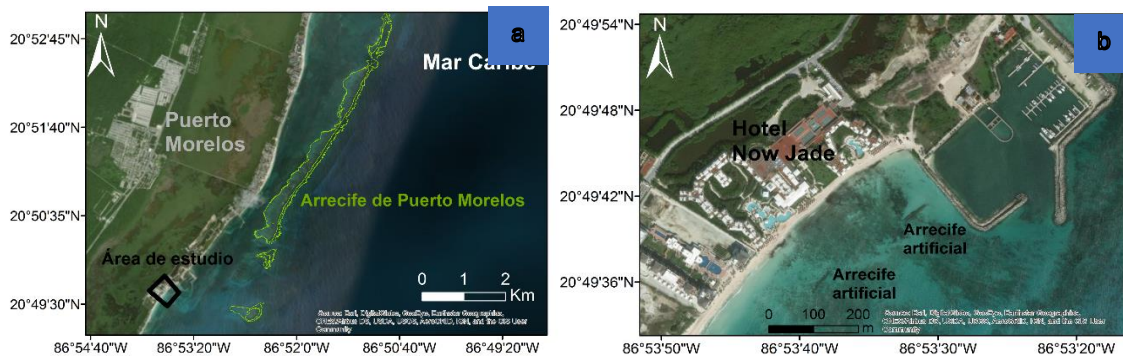


Figura 71. a) Sitio de estudio en Puerto Morelos, México, b) Zona costera frente al hotel Now Jade.



Figura 72. Configuración modificada para la tercera etapa del proyecto

La modelación numérica consistió en la aplicación de tres modelos numéricos, utilizados de forma complementaria para definir las corrientes y evolución morfológica asociada a los diferentes escenarios de simulación seleccionados.

1. El modelo numérico WAPO: se utilizó para propagar las condiciones de oleaje conocidas de la base de datos a una profundidad superior a 45 m (distancia aproximada de 40 km de la línea de costa) hasta las proximidades de la costa.
2. El modelo numérico COCO: introduciendo como datos de entrada los resultados del modelo numérico WAPO, permitió estimar las corrientes asociadas al oleaje para los distintos escenarios.
3. El modelo numérico XBeach: se utilizó para la caracterización morfodinámica, obteniendo una aproximación de la evolución del terreno y desplazamiento de la costa que tendría lugar para las distintas condiciones de oleaje.

Se utilizaron dos mallas: una malla general, que abarca el sistema ambiental al que pertenece el proyecto, y una malla de detalle en la región que ocupa el predio. Además, se realizó la modificación de las mallas, añadiendo la configuración de la máquina de arena, la duna y el relleno de playa (Figura 73).



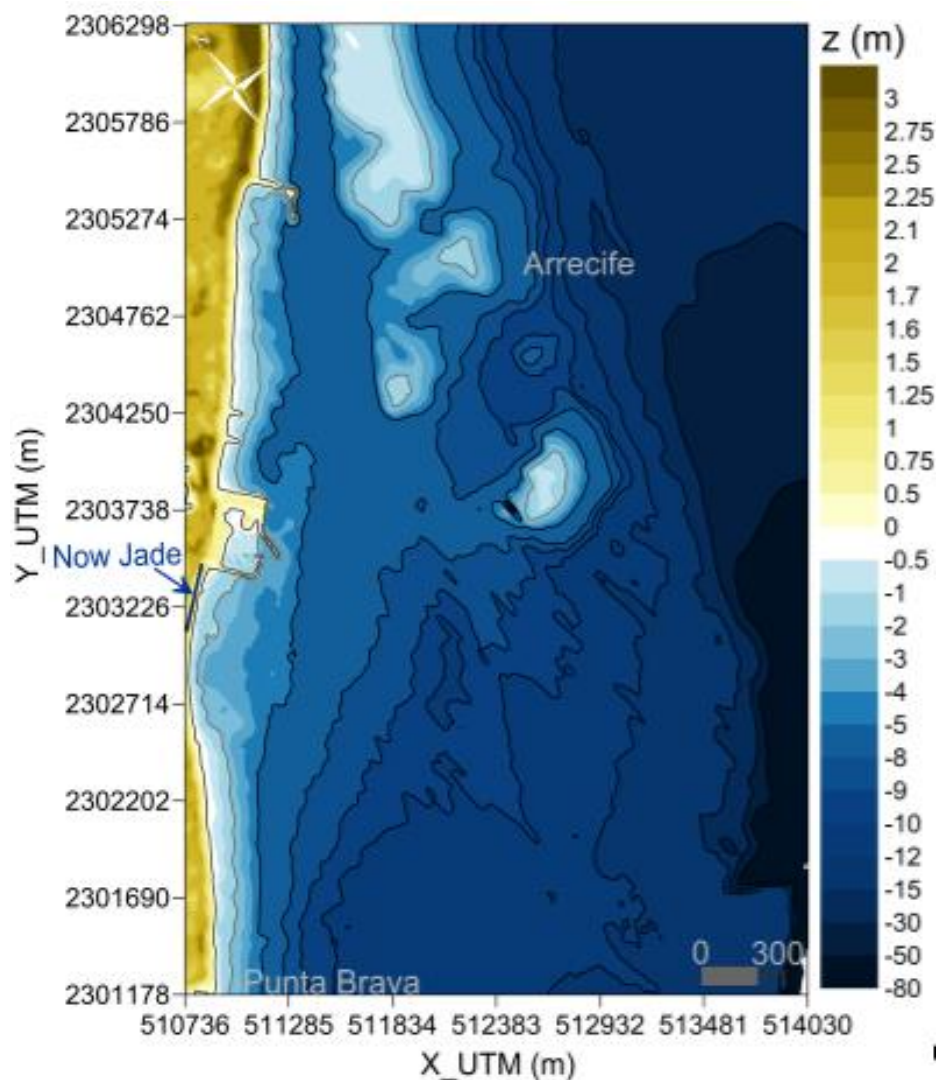


Figura 73. Malla de modelación con la configuración modificada

La caracterización del clima marítimo de la zona permitió la selección de los datos utilizados para la modelación hidrodinámica, los cuales se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 2. Datos de entrada para la modelación

Escenario de simulación	Hs (m)	Tp (s)	Dirección
Régimen medio o calma	1	8	E
			ESE
Tormentas	2	8	ENE (Norte)
			E
		7	ESE (Surada)
			SE (Surada)
Huracanes	4	10	E

Los resultados de circulación de corrientes de oleaje obtenidos de la modelación numérica, mostraron un patrón idéntico de circulación en todas las regiones de detalle analizadas excepto en la ocupada por el predio donde las corrientes de oleaje varían ligeramente por la diferente configuración del fondo dada por el relleno de la máquina de arena. Es decir, los principales cambios morfológicos se producirán en la región ocupada por el predio.

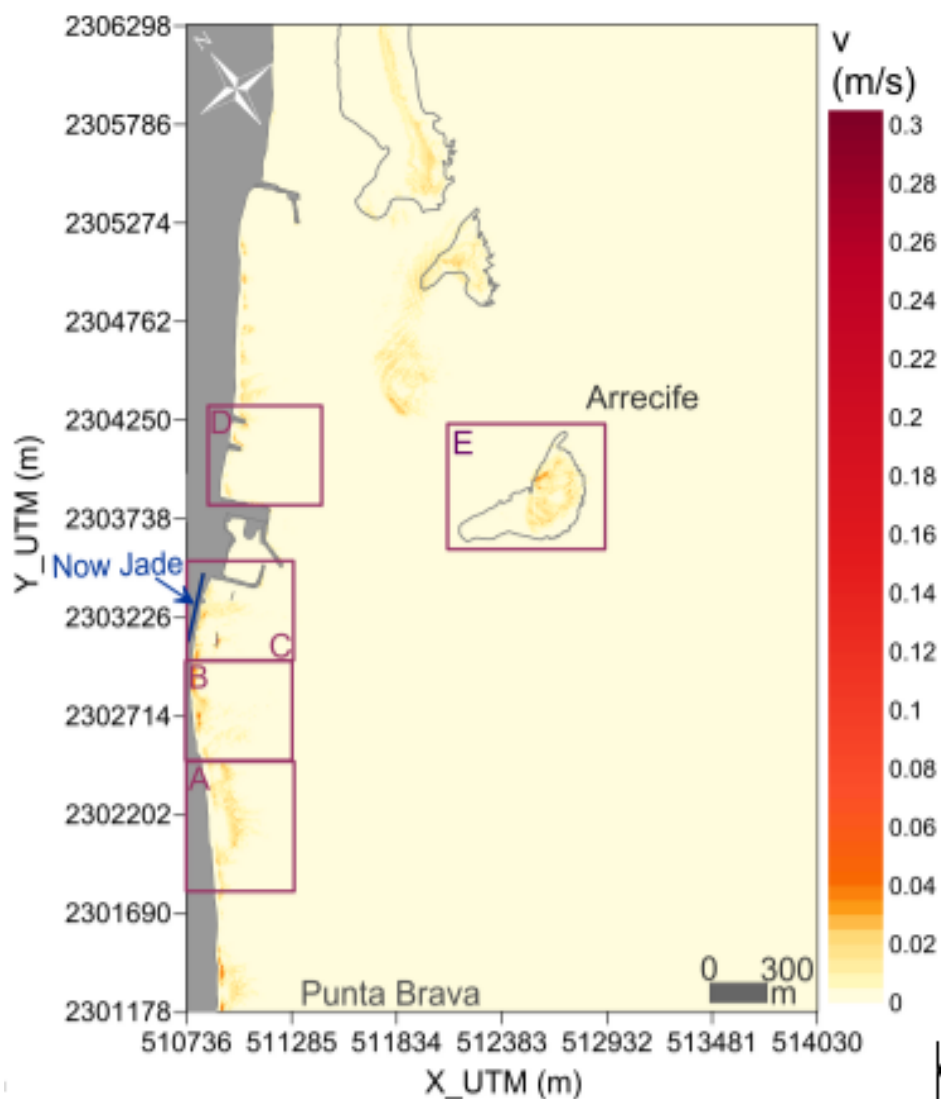


Figura 74. Velocidades de corrientes de oleaje para la configuración del proyecto, condición de régimen medio



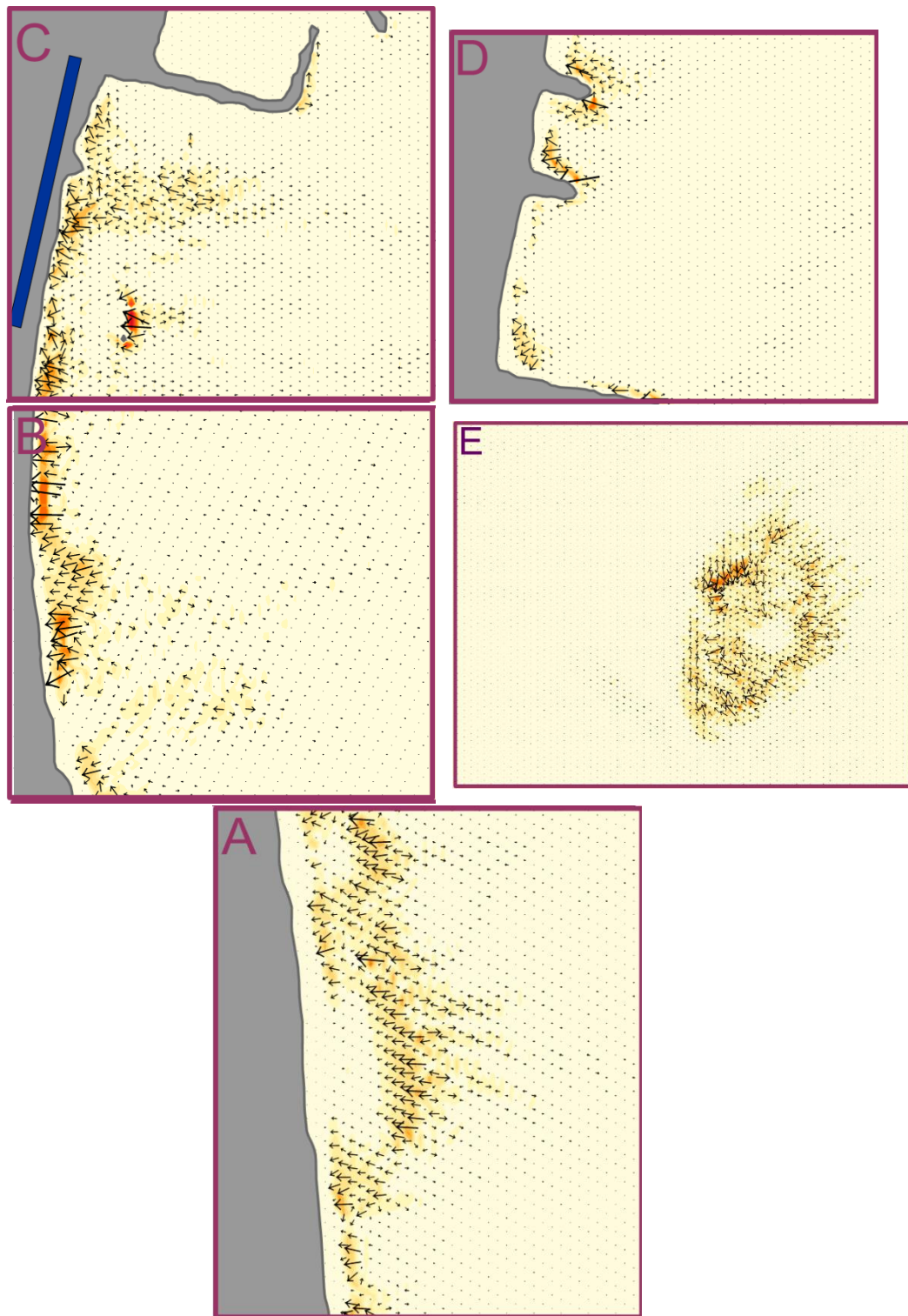


Figura 75. Velocidades de corrientes de oleaje para la configuración del proyecto, condición de régimen medio. Detalles A a E.

La variación morfológica mostró que los efectos en todos los escenarios se dan únicamente en la playa objetivo, distribuyendo la arena tal como se espera sin causar afectaciones fuera de este sitio (Figura 76y Figura 77).

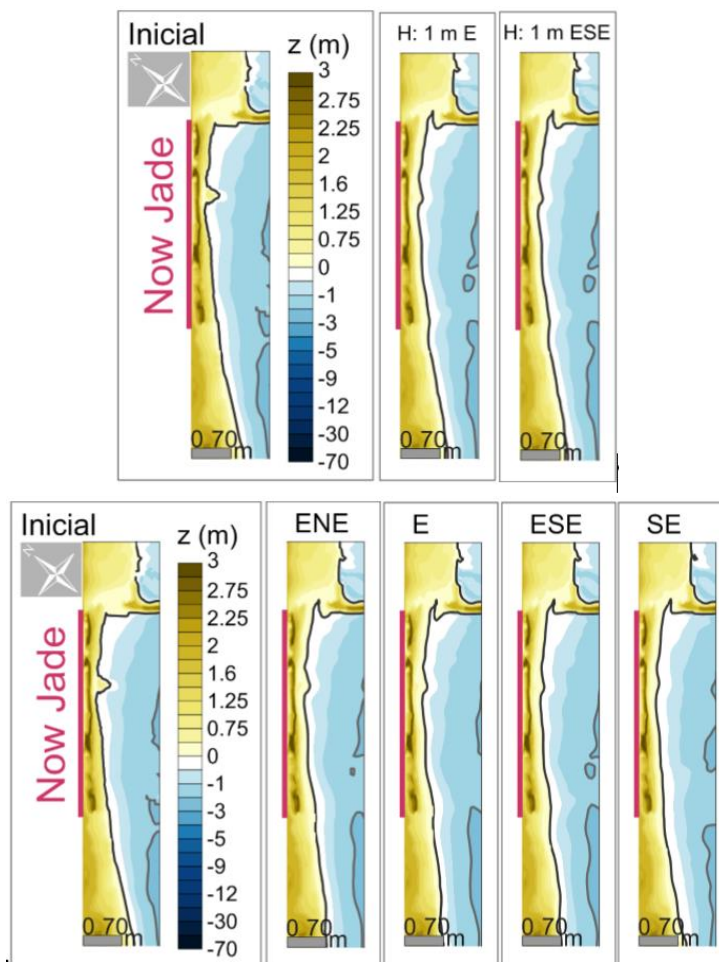


Figura 76. Respuesta morfológica para las distintas condiciones de oleaje simuladas para la configuración del proyecto

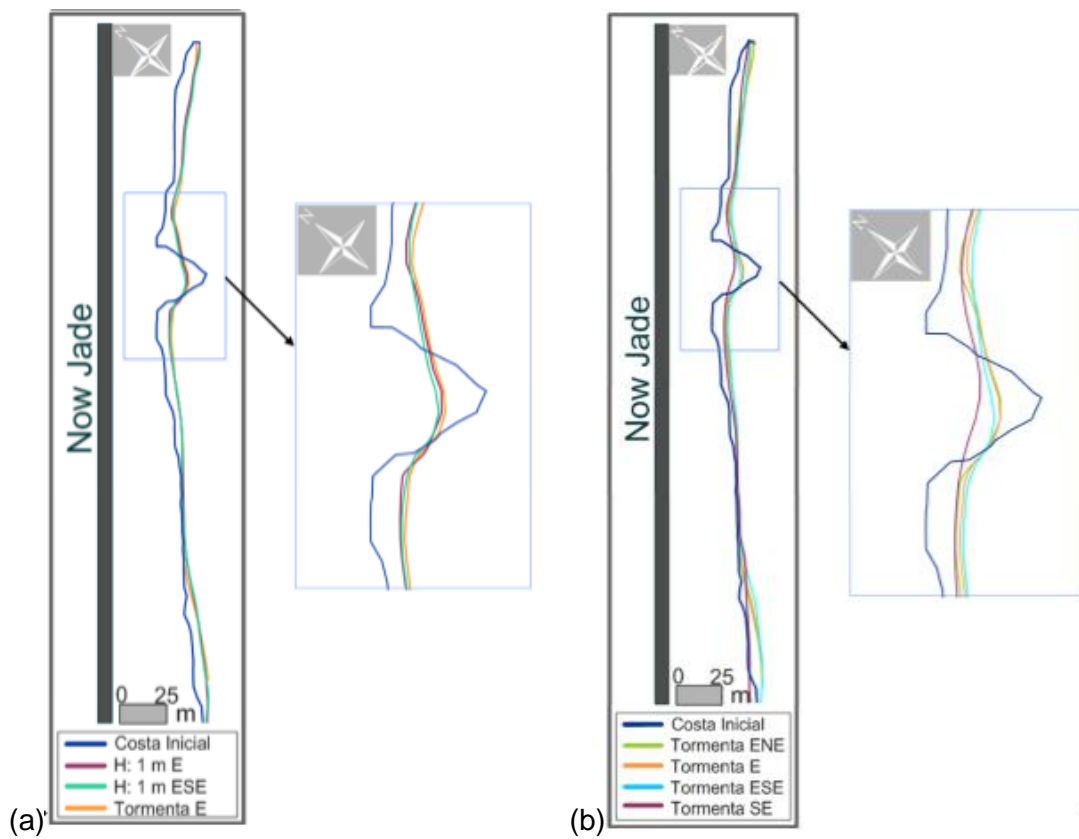


Figura 77. Cambio de la línea de costa, comparación de escenarios: (a) Calma vs Tormenta E; (b) Tormentas

Se espera que tanto las condiciones de oleaje en calma como de tormenta produzcan la redistribución del sedimento de la “máquina de arena” longitudinalmente a la costa, de acuerdo con la concentración de energía del oleaje y circulación de corriente

El movimiento de sedimentos favorecerá las secciones de playa que históricamente han sido diagnosticadas por su estado crítico, al producir el aumento del ancho de playa por la llegada de sedimento de la “máquina de arena” a las mismas.

La magnitud de cambio de la morfología de la playa estará determinada principalmente por la dirección de oleaje; SE, ESE, E y ENE en este orden de afectación de mayor a menor grado en caso de acreción, la playa tendría un estado más favorable al disponer de un mayor volumen de sedimento, por lo que no se tomaría ninguna medida. Por otro lado, la redistribución del material de la “máquina de arena” producirá ganancia de playa temporal, que permitirá el uso de la arena para la conformación de la duna. Pero en caso de erosión, se extraerá sedimento del mismo sitio de préstamo señalado y se recuperaría el estado de la playa mediante la reconstrucción del relleno de la “máquina de arena”. En este caso se esperaría que el mantenimiento de la “máquina de arena” sea mensual y continuo entre tanto se alcanza una estabilidad en la playa. Los modelos demuestran que la propuesta no afectará los arrecifes de Puerto Morelos y no desfavorecerá playas colindantes, que se encuentran dentro del sistema ambiental.

## VII. Estudios de caso

En esta sección la aplicación de los métodos de selección de infraestructura verde costera, abordados en las secciones anteriores, en seis países del Caribe: México, República Dominicana, Colombia, Trinidad y Tobago y Las Bahamas. La selección de los sitios involucró la consulta con expertos y tomadores de decisiones de los países estudiados a través de talleres donde el papel facilitador del BID fue preponderante. Por lo tanto, reflejan las preocupaciones e intereses locales.

El diagnóstico y propuesta de infraestructura verde de cada sitio requirió de la consulta y análisis de bases globales, imágenes satelitales e información documental disponible en la red. De esta manera, elementos clave como el clima marítimo fueron determinados a través del re-análisis de los datos del modelo WAVEWATCHIII de la NOAA. De manera similar, la vegetación fue clasificada a partir de imágenes LANDSAT y Google Earth con el uso de software gratuito. Posteriormente, dicha clasificación fue complementada con bases globales sobre ecosistemas clave como manglares, pastos y corales. En contraste, la identificación de riesgos y amenazas se hizo a través del análisis de literatura (arbitrada y gris) así como la consulta a expertos de cada país. Por su parte, la caracterización socioeconómica se basó en bases globales complementada con datos locales sobre población y vivienda en los casos en los que esta información estuvo disponible.

Cabe señalar que la accesibilidad de la información es un punto clave en los métodos propuestos en este documento y que las posibles limitaciones son subsanadas con la consulta de expertos y con un monitoreo intensivo. Este último es un punto clave para todos los casos, especialmente para aquellos donde el nivel de información es bajo.

## VII.1 México

**Lugar:** Puerto Morelos

**Ubicación:** Puerto Morelos se encuentra en el municipio de Benito Juárez en el estado de Quintana Roo, único estado mexicano con litoral en el mar Caribe. Destaca por su cercanía a la zona turística denominada como Cancún (36 km al sur) y al sistema arrecifal mesoamericano (SAM). El frente costero de Puerto Morelos abarca alrededor de 40 km de playa, entre Punta Nizuc y Punta Maroma.



Figura 78. Localización de Puerto Morelos, Quintana Roo, México (imagen modificada de Google Earth).

## VII.1.1 Caracterización física

### Geología y geomorfología

Puerto Morelos se ubica en la Riviera Maya, Quintana Roo, en la Península de Yucatán, dentro de la formación geológica de Carrillo Puerto (Figura 79). La Zona Costera de la Península de Yucatán, se caracteriza por presentar un relieve muy escaso y por la ausencia de ríos superficiales, debido a sus suelos constituidos principalmente por piedra caliza. El poblado de Puerto Morelos tiene una altura promedio de 3 a 5 msnm.

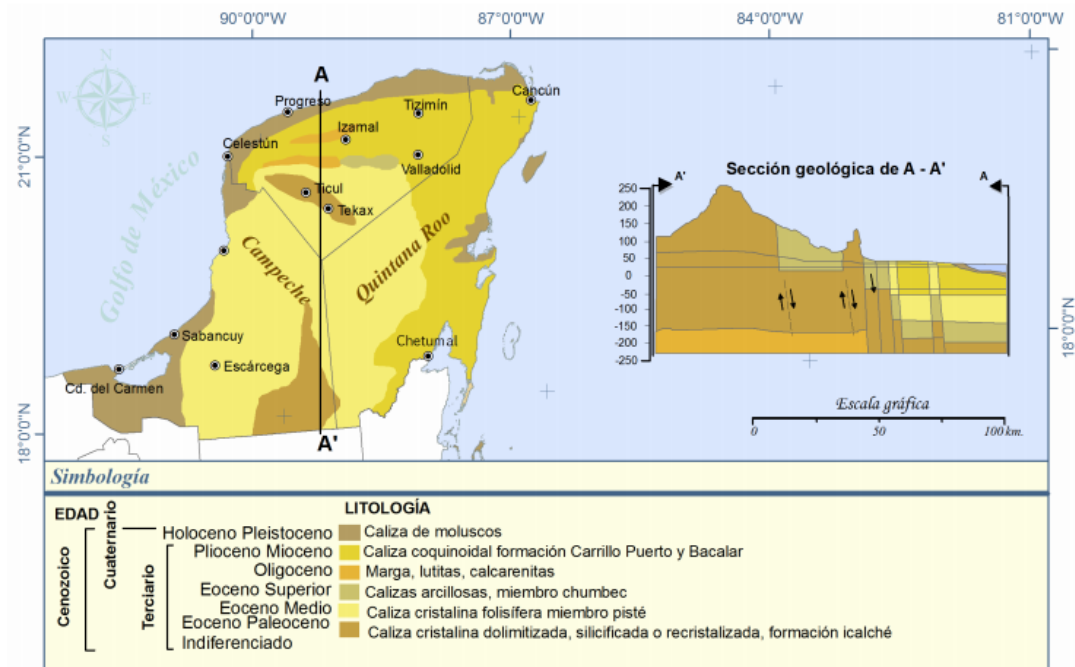


Figura 79. Clasificación geológica de la Península de Yucatán (Durán & Méndez, 2010)

Al norte de Puerto Morelos, en la parte superior de la planicie costera se identifican calizas de coral. Al sur, bajo la planicie de paleodunas, las calcarenitas reposan sobre unas micritas no estratificadas y calcarenitas que pasan sobre la misma corteza subáerea. En la zona de playa que corresponde a Puerto Morelos y su periferia, el material sedimentario está constituido por calizas coquinoideas formadas en ambiente somero de playa (fragmentos de conchas y moluscos, y corales mal clasificados (Ruiz et al., 2010).

Las playas de Puerto Morelos se encuentran protegidas por el sistema arrecifal mesoamericano, que forma parte del Gran Cinturón de Arrecifes del Atlántico Occidental. Esta barrera arrecifal alcanza la superficie y es claramente visible a no más de un kilómetro de la costa. Las playas muestran una tendencia a moderar o disipar la energía de las olas que llegan del noreste. Presentan anchos de playa y zonas de rompientes que aminoran los efectos de las olas (Ruiz et al., 2013).



## Clima marítimo

Para la caracterización del clima marítimo de la zona, se utilizaron los datos de reanálisis del modelo WAVEWATCHIII de la NOAA para la malla del Atlántico NW (NOOA, 2018), en la celda longitud 86.83°W latitud 20.83°N, la cual se ubica frente a las costas de Puerto Morelos, a una profundidad de 20 m sobre el nivel medio del mar. Los datos incluyen valores de febrero de 2005 a septiembre de 2018. La Tabla 3 muestra algunos parámetros estadísticos calculados con estos datos, de donde se tiene que la altura de ola media es de 2.66 m y el periodo de ola medio de 8.40 s.

Tabla 3. Parámetros estadísticos del reanálisis del oleaje para Puerto Morelos

Altura de ola (m)		Periodo (s)	
$H_{m\acute{a}x}$	8.200	$T_{m\acute{a}x}$	12.20
$\bar{H}$	1.013	$\bar{T}$	6.94
$H_{rms}$	1.115		
$H_{1/2}$	1.337	$T_{1/2}$	7.35
$H_s$	1.488	$T_s$	7.50
$H_{1/10}$	1.934	$T_{1/10}$	7.77
$H_{1/100}$	3.233	$T_{1/100}$	8.96

El resultado del análisis estadístico arroja las siguientes características:

- La dirección predominante de incidencia del oleaje es SE, presentándose en mayor porcentaje olas menores a 1.5 m de altura. Para el caso del viento, la dirección predominante es E, con velocidades de menores a 6 m/s (Figura 80).
- El 50 % de probabilidad de excedencia se tiene en alturas de ola menores a 1.30 m. La velocidad del viento con más de 50 % de probabilidad de excedencia es de 5 m/s (Figura 113).
- El rango de periodos que se tienen es entre 4 y 16 s, teniendo mayor probabilidad la presencia de olas con periodos entre 8 y 12 s, con alturas menores a 1.5 m (Figura 114).

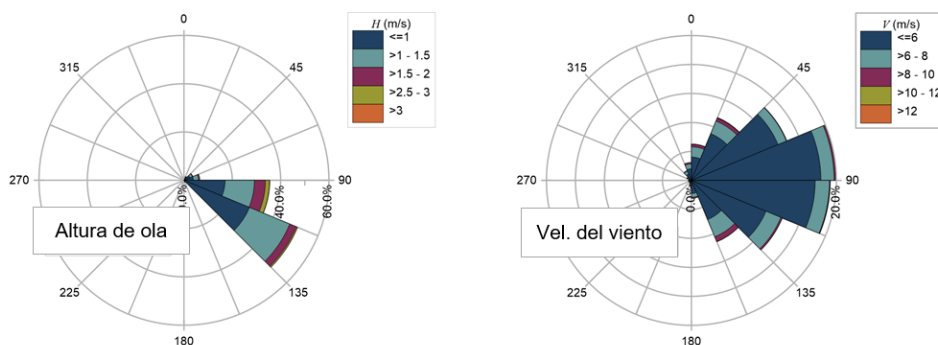


Figura 80. Rosa de oleaje (izq.) y rosa de vientos (der.) para Puerto Morelos - Anual

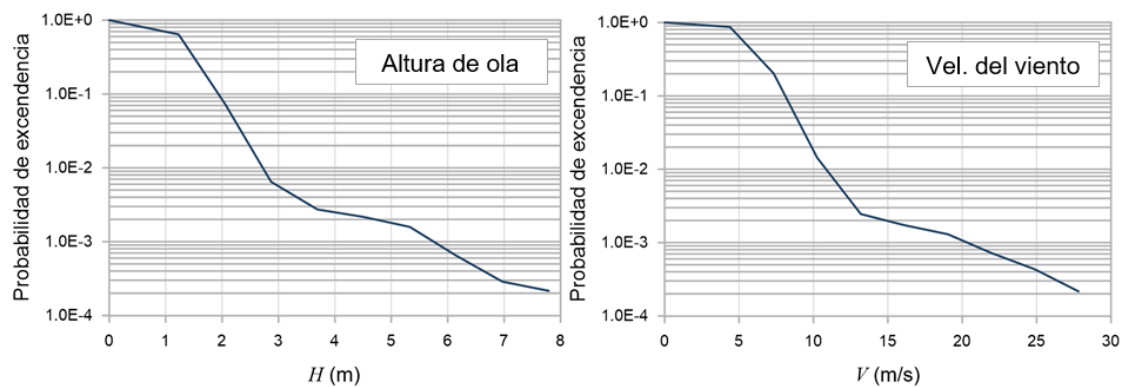


Figura 81. Probabilidad de excedencia de alturas de ola significativa (izq.) y de periodos medio de ola (der.) para Puerto Morelos - Anual

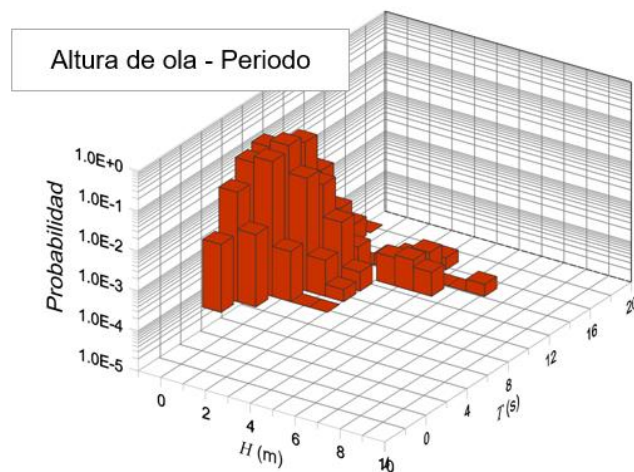


Figura 82. Probabilidad conjunta altura de ola significativa y periodo medio de ola para Puerto Morelos – Anual

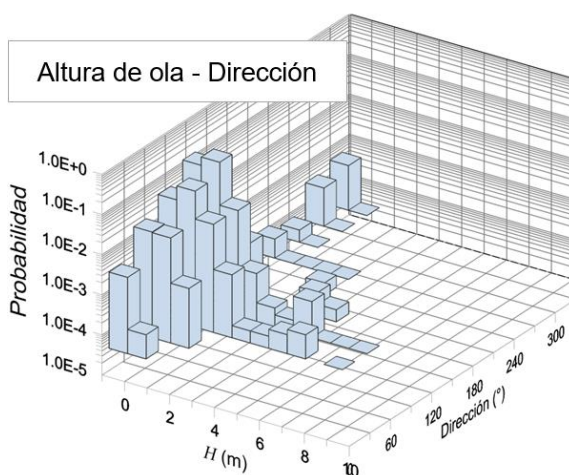


Figura 83. Probabilidad conjunta altura de ola significativa y dirección de propagación para Puerto Morelos - Anual

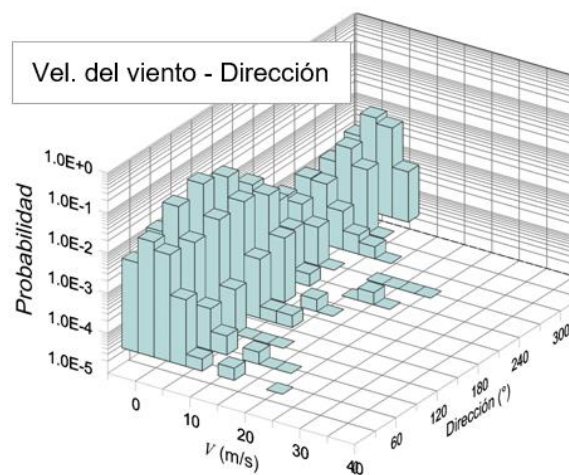


Figura 84. Probabilidad conjunta de vientos sostenidos y dirección de incidencia para Puerto Morelos - Anual

## Riesgos identificados

De acuerdo con Bolongaro (2014), Puerto Morelos presenta cuatro puntos críticos de erosión y tres de acreción (Figura 85). El potencial de inundación por marea de tormenta abarca desde el nivel del mar hasta los 7 metros, pero se no reporta ningún establecimiento vulnerable a la inundación por marea de tormenta, ya que, a la fecha, no existe ninguna zona urbana o turística dentro del área potencial de inundación. En la zona de estudio de la Riviera Maya no existen cauces superficiales, pero sí se presentan inundaciones por lluvias extremas debido a la morfología plana y baja del terreno.

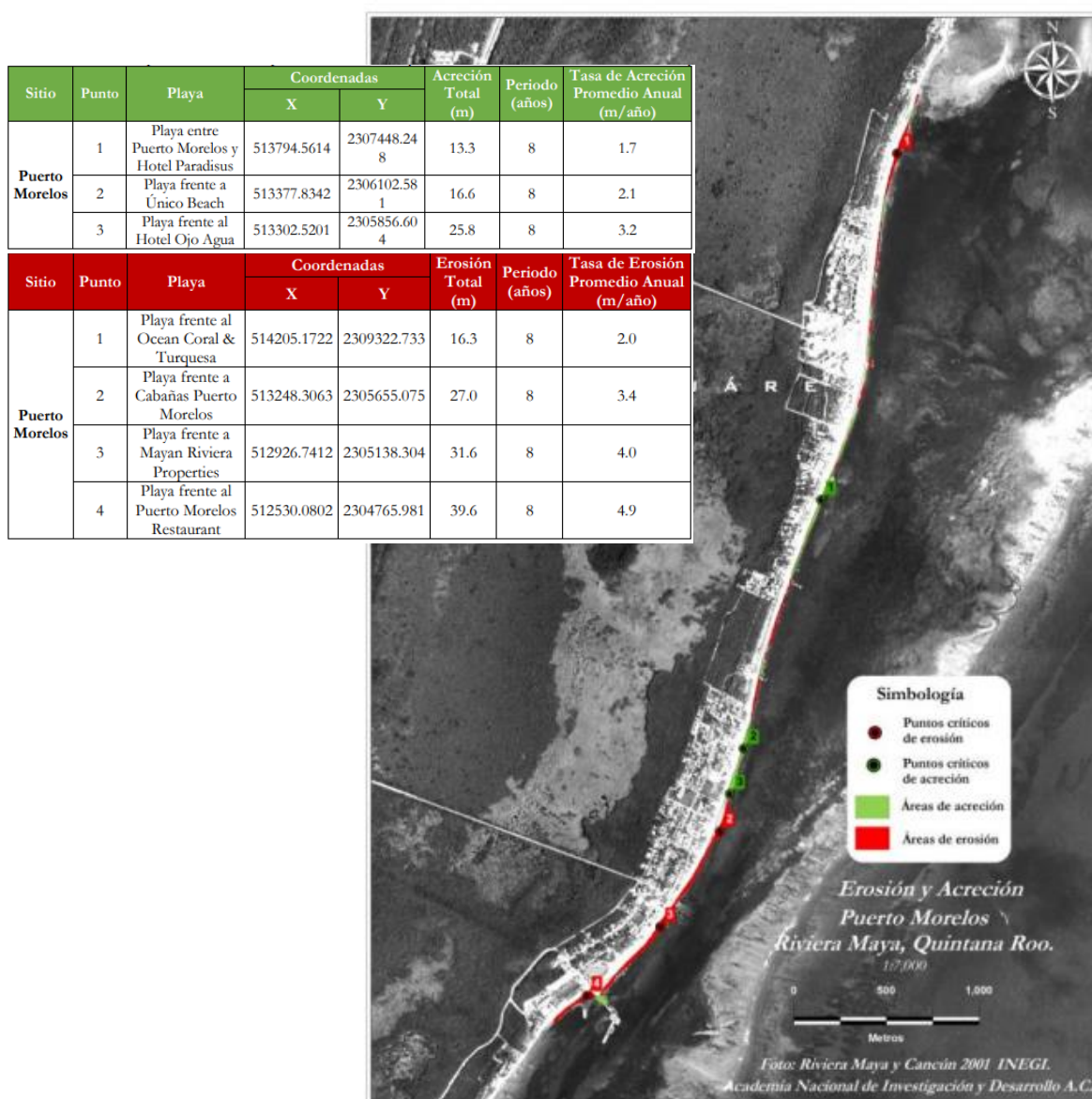


Figura 85. Puntos críticos de mayor erosión y acreción en Puerto Morelos, Riviera Maya (modificado de Bolongaro, 2014).

## VII.1.2 Caracterización ecológica

### Tipos de ecosistemas

El estado de Quintana Roo pertenece a la región biogeográfica neotropical denominada como Península de Yucatán. Dicha región está caracterizada por una alta biodiversidad que incluye alrededor de 8 000 especies registradas de animales, plantas, hongos y protistas. En el estado se encuentran diversos tipos de vegetación como: selvas (selva alta subperennifolia; selva mediana subperennifolia; selva mediana subcaducifolia; selva baja espinosa subperennifolia; selva baja subcaducifolia; selva baja caducifolia), palmares, sabana, humedales (petén, tular, manglar), vegetación de dunas costeras y pastos marinos.

En el frente costero de Puerto Morelos se pueden encontrar humedales (principalmente manglares), vegetación de playas, vegetación de playas y pastos marinos. Además, se encuentra una importante porción de arrecifes de coral (Figura 86).

#### Humedales

En el sitio, se encuentran tanto humedales arbóreos como herbáceos. El humedal arbóreo está constituido por manglar que en la zona puede tener hasta mosaicos de cuatro especies: Botoncillo (*Conocarpus erectus*); Mangle blanco (*Laguncularia racemosa*); Mangle negro (*Avicennia germinans*) y Mangle rojo (*Rhizophora mangle*).

Por su parte, en los humedales herbáceos de la zona se encuentran: Cortadera, navajuela (*Cladium jamaicense*); Tule (*Typha domingensis*); Tulillo (*Scirpus* sp.); Zacate (*Cyperus ligularis*); Zacate (*Panicum* sp.)

#### Dunas y playas

La vegetación de playa está mayormente integrada por herbáceas. En cambio, en las dunas se alternan herbáceas con especies arbustivas. Estas especies son muy resistentes a la salinidad, abrasión por arena, altas temperaturas, entre otras características típicas de estos ambientes.

La mayoría de las dunas que aquí se encuentran son dunas frontales de baja altura. Sin embargo, se puede encontrar una gran variedad de especies. Por ejemplo, carrizo (*Phragmites communis*), ciricote de playa (*Cordia sebestena*), espinoso (*Jacquinia aurantiaca*); frijolillo playero (*Canavalia rosea*), hierba de arena (*Ernodea littoralis*), icaco (*Chrysobalanus icaco*), mulche (*Bumelia retusa*), orégano (*Lantana involucrata*), pantsil (*Suriana marítima*), pasionaria (*Passiflora foetida*), pino caribeño (*Pinus caribaea*), riñoñina (*Ipomoea pescaprae*), uva de mar (*Coccoloba uvifera*), tastab (*Guettarda elliptica*), entre otras especies.

#### Arrecifes y pastos marinos

El sistema arrecifal del estado de Quintana Roo está zonificado en tres sectores: Norte, Centro y Sur. El arrecife de Puerto Morelos corresponde al sector Norte que comprende desde Isla Contoy hasta Tulúm. Este arrecife es altamente biodiverso y con especies únicas. Por ejemplo, en la isla de Cozumel existe un sistema arrecifal de aguas profundas único en su tipo.

El sistema arrecifal de Puerto Morelos está caracterizado por tener pendientes suaves, cobertura dominada por corales blandos sobre fondos duros con comunidades pequeñas de corales duros (Jordán- Dahlgren, 1993). La barrera forma una laguna arrecifal de entre 550 y 1 500 m de ancho (Coronado et al., 2007) y su profundidad es inferior a 5 m en prácticamente todo el tramo. En el interior de la laguna se tienen praderas de pastos marinos.

Las praderas de pastos marinos tienen un desarrollo muy homogéneo y su presencia es una característica de la laguna arrecifal. De acuerdo a estudios previos realizados en la laguna existen cuatro especies de pastos marinos (*Thalassia testudinum*, *Syringodium filiforme*, *Halophila decipiens* y *Halodule wrightii*). Las especies dominantes son *Thalassia testudinum* o *Syringodium filiforme*. Dichas especies suelen estar acompañadas por algas, destacando la especie *Halimeda incrassata* que ha sido catalogada como el principal productor de materia orgánica y carbonato de calcio (Jordan, 1979). También, de manera menos frecuente, se pueden encontrar plantas de las especies *Halodule wrightii* (Creed et al., 2003).

Además del valor ecológico del sistema arrecifal de Puerto Morelos, este ecosistema provee importantes servicios de protección, por ejemplo, frente a la acción del oleaje, evitan la erosión de las costas y forman zonas de protección, crianza y alimentación para invertebrados y peces. En consecuencia, este litoral tiene un mayor ancho de playa seca, menor variabilidad energética a lo largo del año y menor vulnerabilidad a la erosión en caso de tormentas extremas que otras playas de región como Cancún. Es por ello que la degradación del sistema arrecifal es un gran problema que debe ser afrontado a la brevedad con medidas enfocadas a su recuperación.

### Principales amenazas a los ecosistemas

Las principales amenazas para los ecosistemas del Caribe mexicano están directamente relacionadas con las actividades turísticas de la zona. La construcción de hoteles, caminos y zonas urbanas sin una planeación territorial apropiada ha causado la modificación de la línea de costa, destrucción de dunas, desecación de manglares y deterioro de la barrera arrecifal.



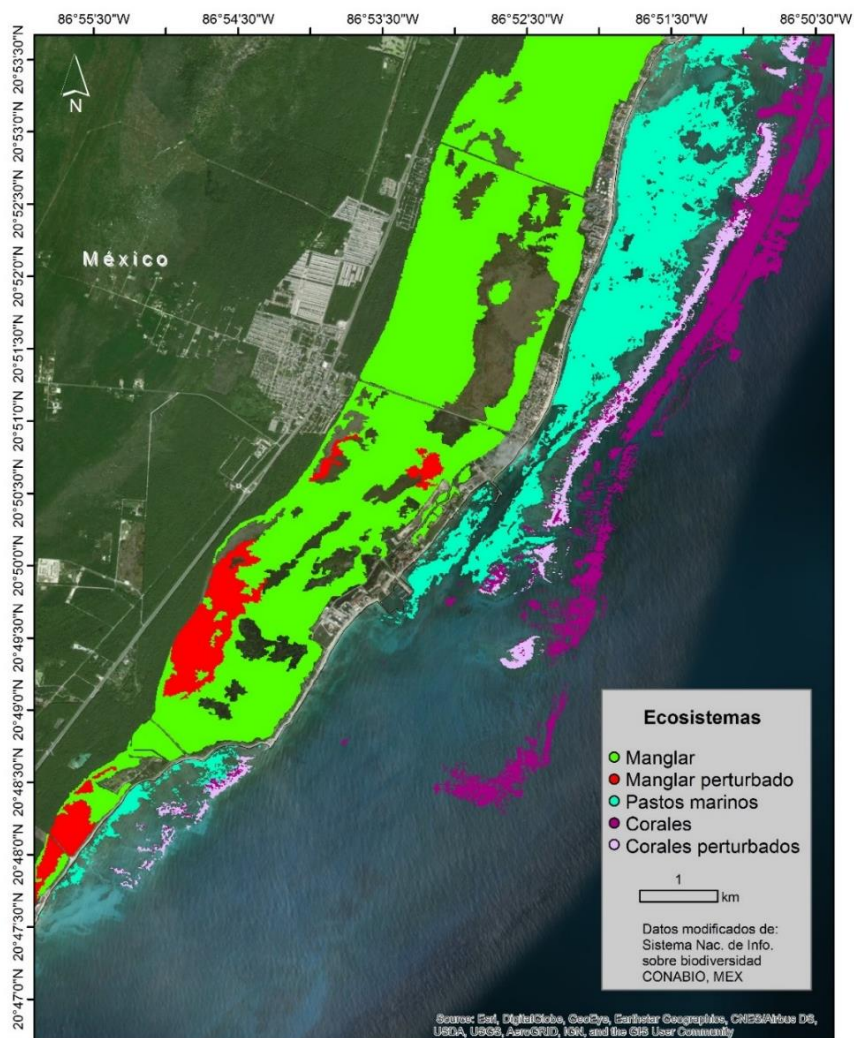


Figura 86. Distribución de manglares y corales e identificación de parches deteriorados

## Estado de conservación de los ecosistemas

### Humedales

La cobertura de humedales ha sido severamente disminuida por tala, desecación y modificación de flujos hídricos. Históricamente, en la zona Puerto Morelos - Tulum se encontraba una franja de manglares de dos a cinco kilómetros de ancho. Sin embargo, solo permanecen pequeños tramos. La mayoría ha sido desecada para la construcción e infraestructura turística y carreteras. Aunado a la pérdida ecológica y de servicios de protección. La interrupción de los flujos hídricos en estos humedales ha provocado que la zona enfrente un problema social serio por los olores despedidos por el agua estancada, así como la proliferación de mosquitos.



La interrupción de flujos hídricos continúa causando la muerte de manglares que no fueron desecados o reemplazados por infraestructura, especialmente en el sur de Puerto Morelos (Figura 86).

### Playas y Dunas

A pesar de la protección ofrecida por el sistema arrecifal, la playa de Puerto Morelos presenta tramos con erosión. Dicha erosión es más severa bajo determinadas condiciones extremas de oleaje durante la época de ciclones y nortes, particularmente con la presencia de huracanes.

### Arrecifes

Los impactos físicos sobre los arrecifes incluyen desde el paso de cruceros, atraco y encallamiento accidental hasta el saqueo hormiga de fragmentos de coral. El saqueo hormiga es un problema de gran importancia dado el número de turistas practica el buceo libre y sin supervisión durante el cual caminan sobre los arrecifes y extraen trozos como recuerdo. Aunado a lo anterior, en la zona arrecifal ocurre una explotación pesquera local de alta intensidad.

Además de los daños físicos por colisión con embarcaciones, así como por la remoción para la construcción de marinas, los arrecifes han sido deteriorados por la descarga de aguas no tratadas con alto contenido de contaminantes y sedimentos. El incremento en la turbidez del agua limita el crecimiento y deteriora la salud del sistema (Almada Villela et al., 2002). Además, las aguas no tratadas han causado el incremento de enfermedades coralinas que cada vez cobran mayor importancia (Ward et al., 2006).

Es altamente probable que el deterioro de la barrera arrecifal continúe en los próximos años pues los planes federales de desarrollo incluyen el incremento de la densidad turística del Caribe Mexicano desde Cancún, pasando por Puerto Morelos y hasta la frontera con Belice (Jordán Dahlgren and Rodríguez Martínez, 2003).

### Figuras de protección

Los arrecifes frente al sitio de estudio son parte de un Área Natural Protegida desde el 2 de febrero de 1998.

## VII.1.3 Caracterización socioeconómica

### Población

En la década de 1970, la riqueza biológica, cultural y paisajística del estado de Quintana Roo fue objeto de gran interés, motivando el establecimiento de Cancún como polo de desarrollo de la zona norte del estado. Dicho desarrollo ha sido desordenado y a un ritmo acelerado, extendiéndose hacia el sur y formando ciudades como Puerto Morelos o Playa

del Carmen. Esta última reconocida como una de las ciudades con mayor crecimiento poblacional en el mundo.

En el último censo poblacional (2015), el estado de Quintana Roo tenía 1 501 562 de habitantes, ocupando el lugar 26 a nivel nacional. La población de Puerto Morelos se encuentra integrada en el Corredor Cancún-Tulum (también conocido como “Riviera Maya”) cuyo desarrollo turístico ha ido en aumento en las últimas décadas. Hasta antes de 2015, Puerto Morelos pertenecía al municipio de Benito Juárez, municipio que comprende a Cancún. Sin embargo, el crecimiento poblacional ha sido tal que en noviembre de 2015 se decidió crear un propio municipio con el mismo nombre. Dicho decreto entro en vigor en enero de 2016 y actualmente está densamente poblado (Figura 87).

En el último censo poblacional (2014-2015), Puerto Morelos pertenecía al municipio de Benito Juárez en el que vivían 743 626 personas, alrededor de la mitad de todos los habitantes del estado. Actualmente, se tiene estimado que la población de Puerto Morelos es de 37 000 personas agrupadas en tres localidades (Puerto Morelos, Leona Vicario y Central Vallarta).

### Actividades económicas

La principal actividad económica de Puerto Morelos es el turismo y se prevé que siga en aumento. Sin embargo, la economía del lugar se ha visto afectada en varias ocasiones por eventos hidrometeorológicos extremos pues al estar en el Caribe es una de las zonas con más alto riesgo del mundo por la presencia de ciclones tropicales. Más recientemente incluso por arribazones de sargazo.

Además de la presencia de eventos extremos, la alta vulnerabilidad responde, en gran parte, al inadecuado planeamiento y construcción de los desarrollos turísticos sobre humedales desecados y cordones dunares. Entre las principales afectaciones están las pérdidas por inundaciones durante oleaje de tormenta, procesos de erosión y sedimentación que transforman la morfología de las playas o alteran los ecosistemas y como consecuencia se producen daños económicos, ambientales y sociales muy severos.

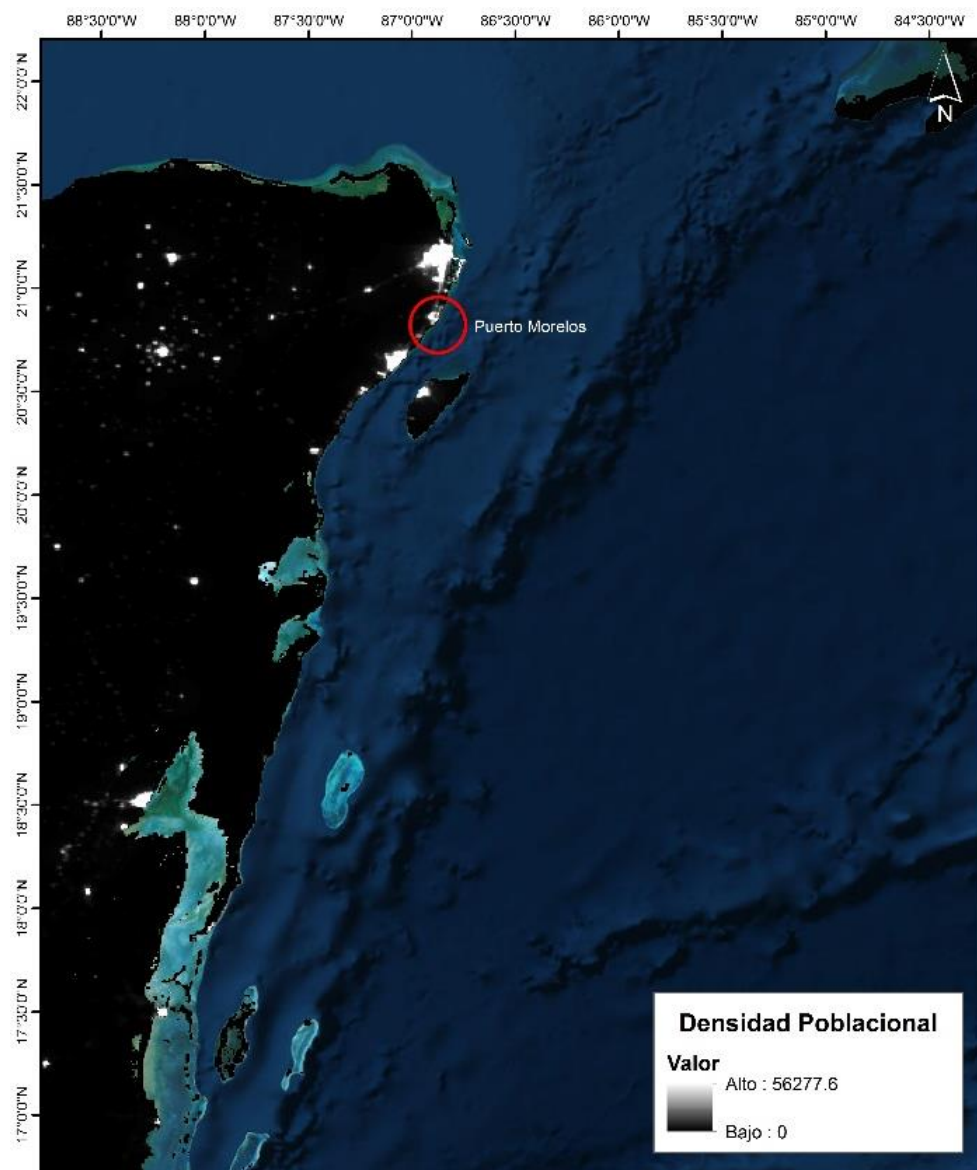


Figura 87. Densidad poblacional de Puerto Morelos, México

#### VII.1.4 Selección de alternativas

Como se mencionó en la sección III.3, para el caso de Puerto Morelos, México (Figura 70), se seleccionó la zona costera ubicada frente al hotel Now Jade, el cual previamente ya ha sido intervenido por infraestructura verde en dos fases anteriores (arrecife artificial, Figura 71) para mitigar el riesgo de erosión al cual se enfrentan desde el año 2007 tras el paso del huracán Dean (Silva *et al.*, 2016b).

Para la selección de alternativas, tanto en las fases 1 y 2 ya implementadas, como para la fase 3 en curso, se siguió el modelo de decisión de la Figura 42 y se seleccionaron las alternativas de la Figura 43.

En este caso, el ecosistema objetivo fue la playa que se encontraba degradada por el paso de un evento extremo. Las alternativas seleccionadas se resumen en la Tabla 4. Se identificó que podría recuperarse a través de una alternativa de Ecosistema Asistido (la fase 1 se detalla en la Ilustración 52 del Manual para tomadores de decisiones), modificando el medio físico con la construcción de un arrecife artificial (Figura 88). Esta alternativa fue seleccionada tanto para la fase 1 como para la fase 2.

Tabla 4. Alternativas seleccionadas para las fases 1 y 2 del proyecto Now Jade

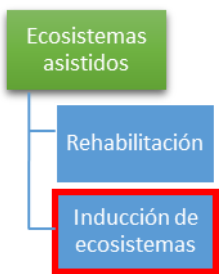
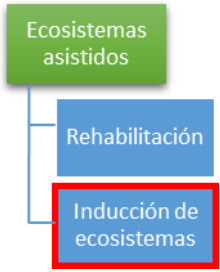
Fase	Año	Tipo de alternativa	Descripción
1	2008		Estudio técnico de la UNAM, evaluación batimétrica y de impacto ambiental llevada a cabo en 2008 y seguida por la construcción del arrecife modular # 1
2	2012		Estudio técnico de la UNAM, evaluación batimétrica y de impacto ambiental realizada en 2011, seguida de la construcción del arrecife artificial modular # 2



Figura 88. Arrecife modular en Puerto Morelos, México

La efectividad de las soluciones implementadas fue determinada a partir del monitoreo en el sitio. Como se observa en la Figura 89, el sistema fue estabilizado.



Figura 89. Resultados de la implementación de la fase 1 y 2 en Puerto Morelos, México

Posteriormente, para incrementar la resiliencia del sistema, se encuentra en curso la implementación de la fase 3, para la cual se seleccionó una alternativa híbrida: Basada en la Naturaleza y Ecosistema Asistido, en esta ocasión con el objetivo de restaurar y re-vegetar la duna en la playa (Tabla 5). Los resultados de la evaluación de esta alternativa se encuentran en la sección III.3.

Tabla 5. Alternativas seleccionadas para la fase 3 del proyecto Now Jade

Fase	Año	Tipo de alternativa	Descripción
3	En curso	<div><div>Basada en ecosistemas</div><div>Conservación</div><div>Restauración</div></div> <div>+</div> <div><div>Ecosistemas asistidos</div><div>Rehabilitación</div><div>Inducción de ecosistemas</div></div>	Restauración y re-vegetación de la duna (construcción de la duna en tres segmentos y una máquina de arena)



## VII.2 República Dominicana

En República Dominicana, se seleccionaron tres sitios de estudio debido a la problemática que presentan y a la importancia que tienen para las comunidades locales. Los sitios fueron Las Terrenas, Bayahibe y Punta Cana (Figura 90).

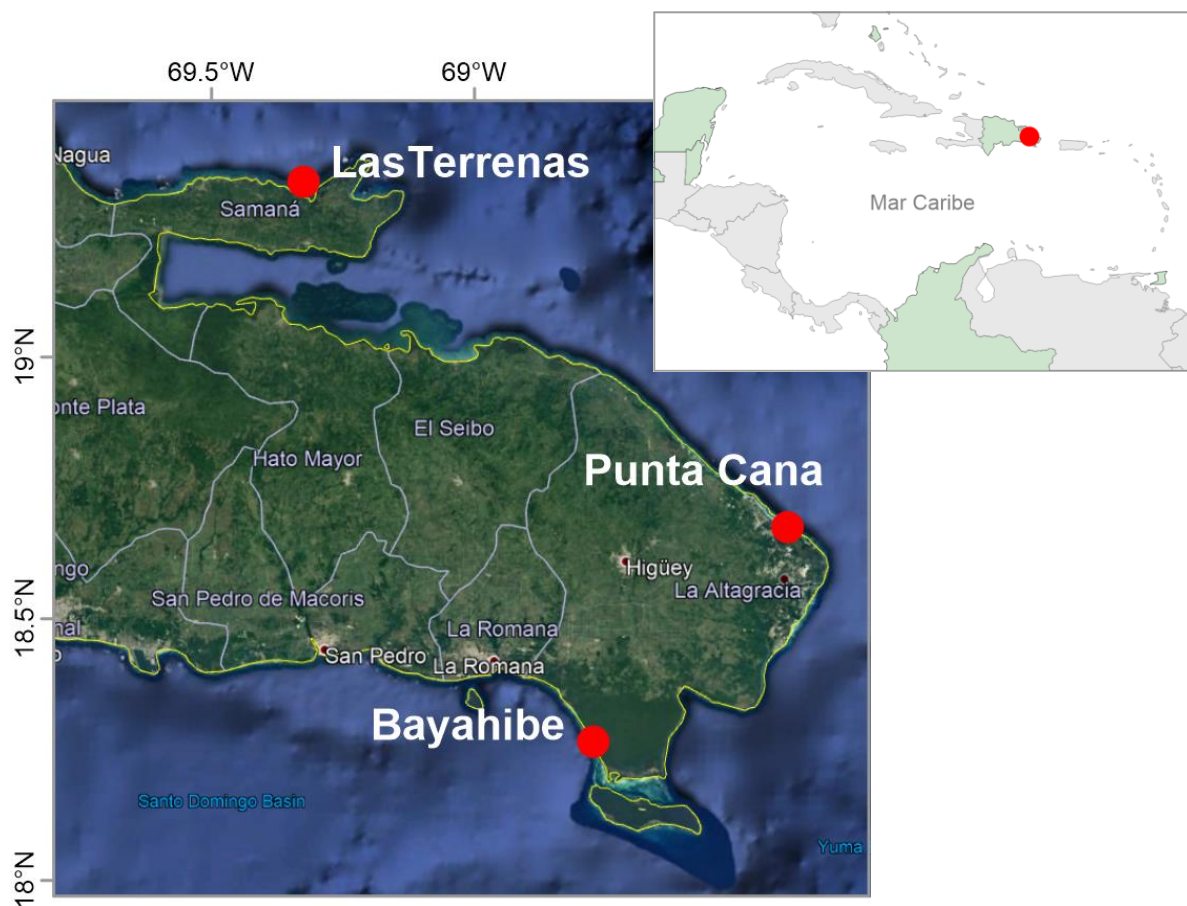


Figura 90. Localización de los sitios elegidos en República Dominicana: Las Terrenas, Bayahibe y Punta Cana (imagen modificada de Google Earth).

### VII.2.1 Las Terrenas

#### Caracterización física

Para la caracterización del clima marítimo de la zona, se utilizaron los datos de reanálisis del modelo WAVEWATCHIII de la NOAA para la malla del Atlántico NW (NOOA, 2018), en la celda longitud 69.50°W latitud 19.33°N, la cual se ubica frente a las costas de la Las

Terrenas, a una profundidad de 20 m sobre el nivel medio del mar. Los datos incluyen valores de febrero de 2005 a septiembre de 2018.

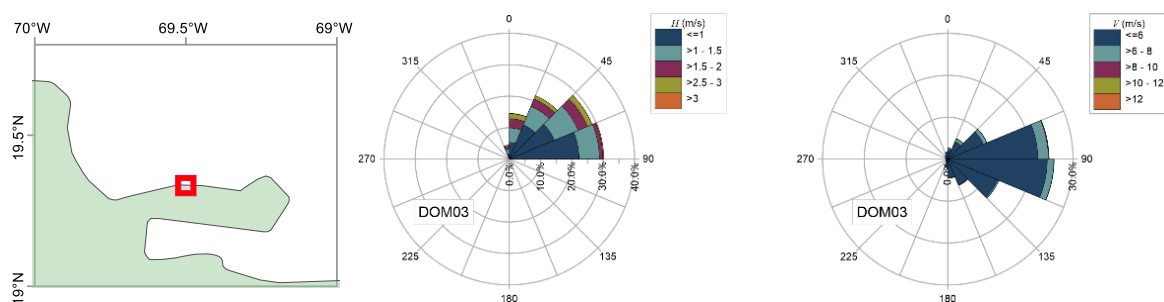


Figura 91. Localización de la celda de análisis y rosas de altura de ola y velocidad de viento para Las Terrenas

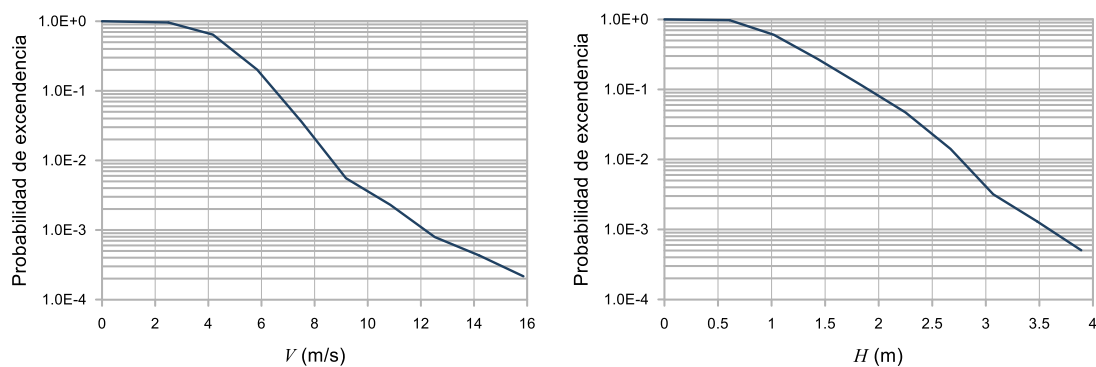


Figura 92. Probabilidad de excedencia de velocidad de viento y altura de ola para Las Terrenas

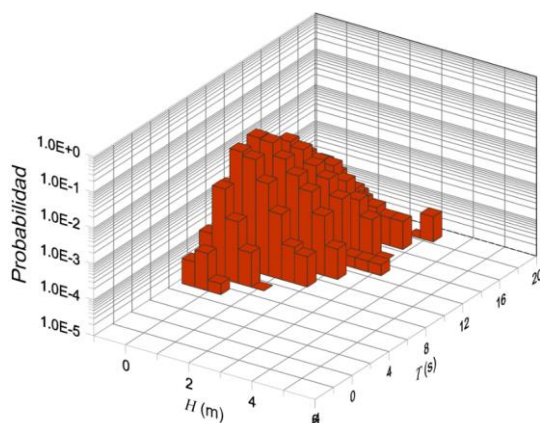


Figura 93. Probabilidad conjunta de altura de ola y periodo para Las Terrenas

Tabla 6. Parámetros estadísticos del reanálisis del oleaje para Las Terrenas

Altura de ola (m)		Periodo (s)	
$H_{m\acute{a}x}$	4.1	$T_{m\acute{a}x}$	10.78
$\bar{H}$	1.043	$\bar{T}$	8.63
$H_{rms}$	1.15		
$H_{1/2}$	1.403	$T_{1/2}$	9.22
$H_s$	1.592	$T_s$	9.46
$H_{1/10}$	2.104	$T_{1/10}$	10.04
$H_{1/100}$	2.881	$T_{1/100}$	10.9

## Caracterización ecológica

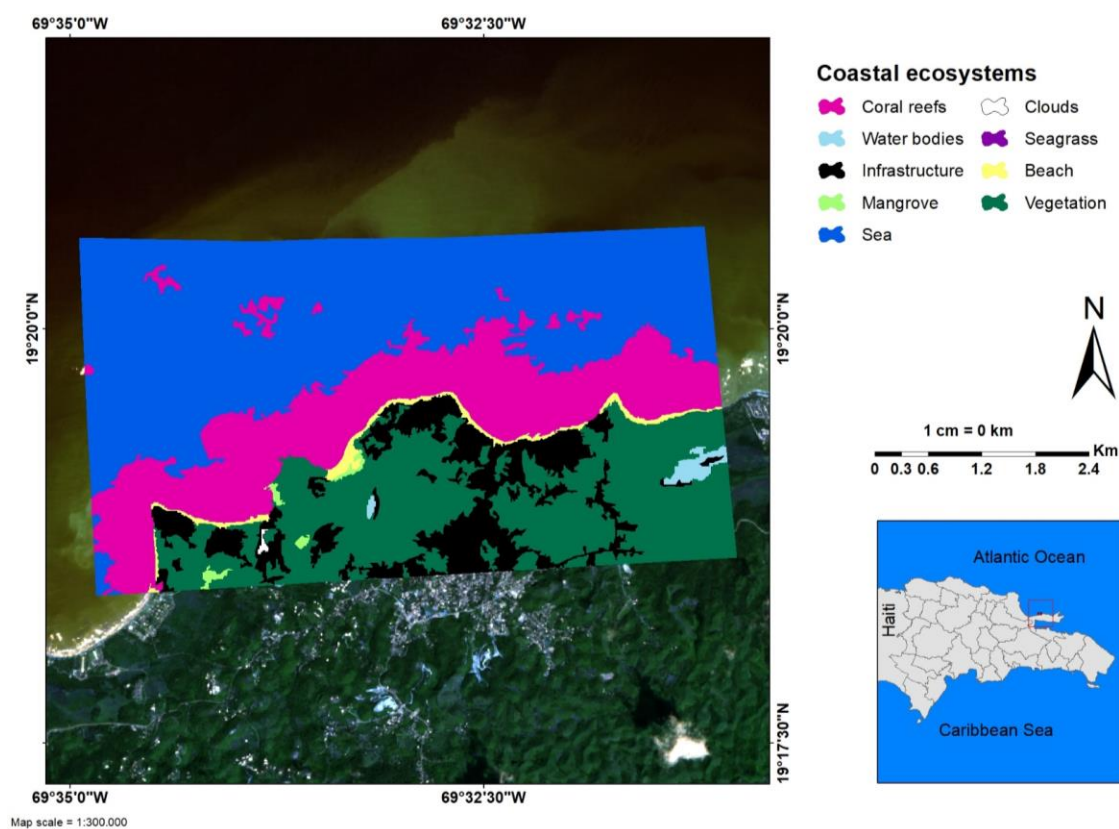


Figura 94. Ecosistemas presentes en Las Terrenas, República Dominicana

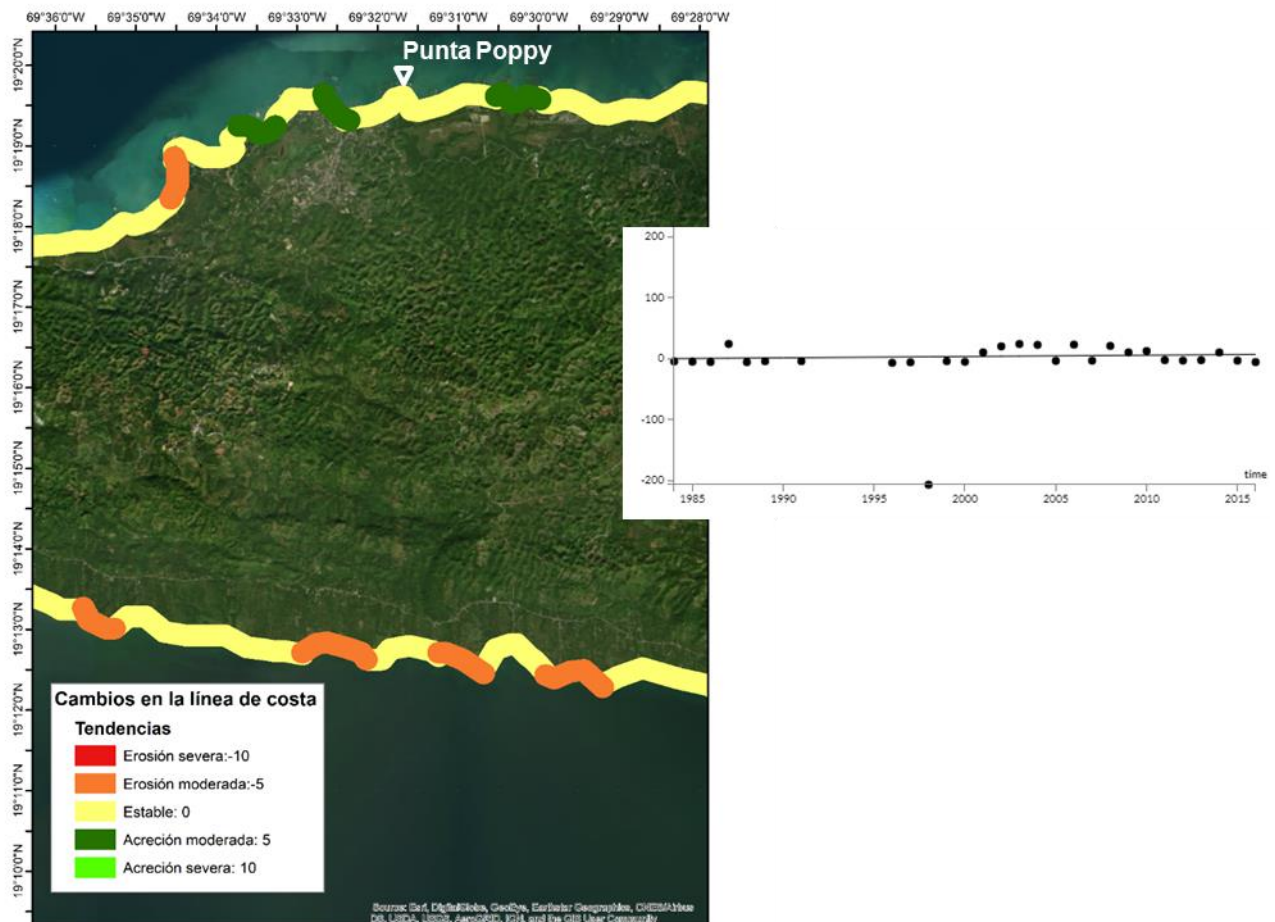


Figura 95. Estado de las playas, en rojo se muestran zonas con erosión severa (mayor a 10m) entre 1984 y 2017 en Las Terrenas

### Problemática y selección de alternativas: Punta Poppy, Las Terrenas

De acuerdo con la caracterización realizada, las condiciones identificadas en el sitio son (Figura 96):

- Línea de costa: Estable a nivel regional
- Erosión: Episódica asociada a tormentas. Posiblemente, crónica de muy baja intensidad
- Playa compactada: vehículos y lanchas
- Duna frontal sin vegetación y fragmentada: pisoteo, infraestructura temporal y permanente
- Posible interrupción de la dinámica duna-playa
- En general, es una playa sana





Figura 96. Condiciones actuales en Punta Poppy, Las Terrenas (imagen satelital tomada de Google Earth, fotografías de Rodolfo Silva).

Como solución se propone una alternativa híbrida: Basada en Ecosistemas e Infraestructura rígida mejorada (Tabla 7).

Tabla 7. Alternativas seleccionadas para Punta Poppy, Las Terrenas

Tipo de alternativa		Descripción
<div> <div>Basada en ecosistemas</div> <div> <div>Conservación</div> <div>Restauración</div> </div> </div>	+	<div> <div>Infraestructura rígida mejorada</div> <div> <div>Diseño amigable con el ambiente</div> <div>Modificación amigable con el ambiente</div> </div> </div>
		1. Revisión del estado de los ecosistemas, principalmente corales. Actuación en función de su estado.  2. Contención de la erosión en la playa en sitios afectados con la construcción de infraestructura rígida mejorada (Ej. Duna acorazada)

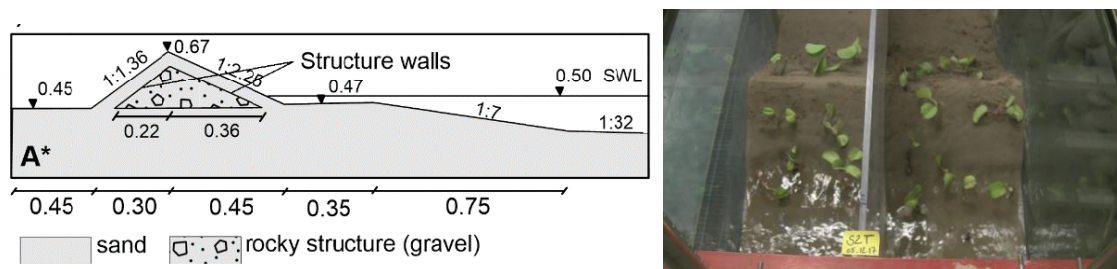


Figura 97. Definición de una duna acorazada (Knöchelmann, 2018)

## VII.2.2 Bayahibe

### Caracterización física

Para la caracterización del clima marítimo de la zona, se utilizaron los datos de reanálisis del modelo WAVEWATCHIII de la NOAA para la malla del Atlántico NW (NOOA, 2018), en la celda longitud 69.00°W latitud 18.33°N, la cual se ubica frente a las costas de Bayahibe, a una profundidad de 20 m sobre el nivel medio del mar. Los datos incluyen valores de febrero de 2005 a septiembre de 2018.

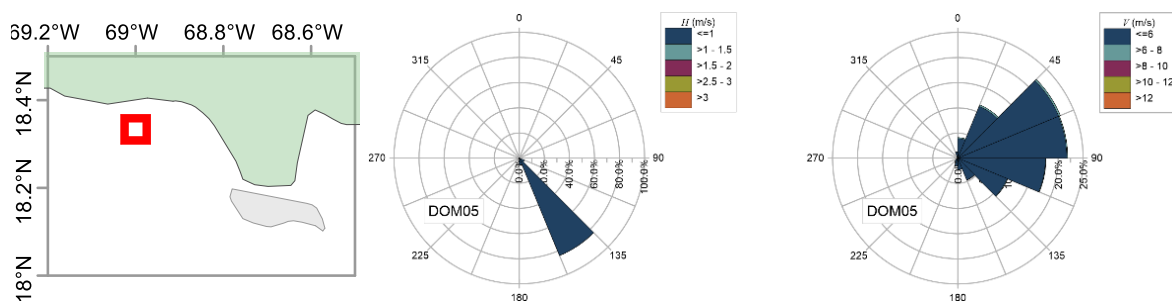


Figura 98. Localización de la celda de análisis y rosas de altura de ola y velocidad de viento para Bayahibe

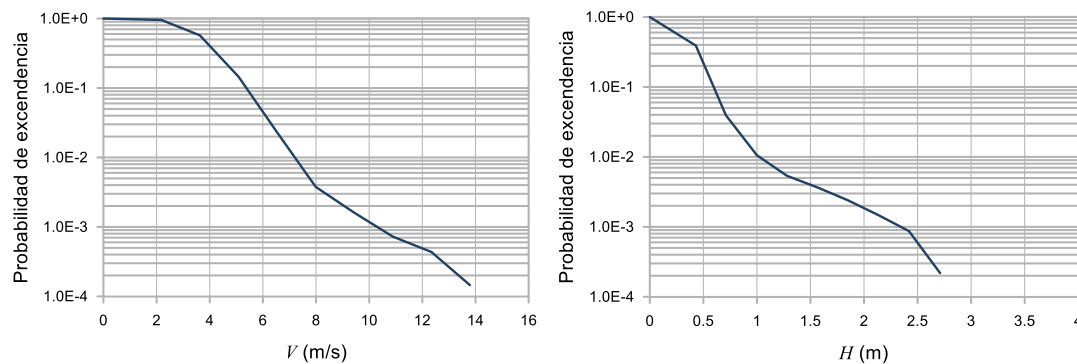


Figura 99. Probabilidad de excedencia de velocidad de viento y altura de ola para Bayahibe



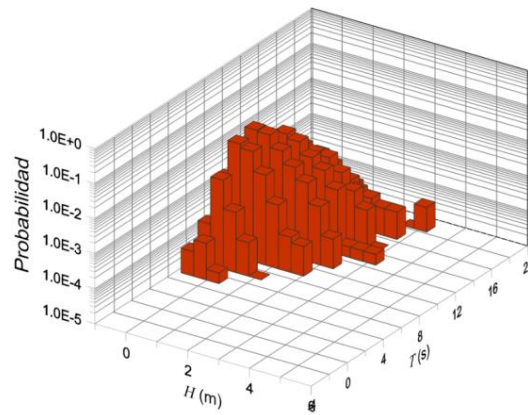


Figura 100. Probabilidad conjunta de altura de ola y periodo para Bayahibe

Tabla 8. Parámetros estadísticos del reanálisis del oleaje para Bayahibe

Altura de ola (m)		Periodo (s)	
$H_{m\acute{a}x}$	2.85	$T_{m\acute{a}x}$	7.31
$\bar{H}$	0.276	$\bar{T}$	6.09
$H_{rms}$	0.331		
$H_{1/2}$	0.391	$T_{1/2}$	6.45
$H_s$	0.449	$T_s$	6.57
$H_{1/10}$	0.638	$T_{1/10}$	6.78
$H_{1/100}$	1.375	$T_{1/100}$	7.24

## Caracterización ecológica

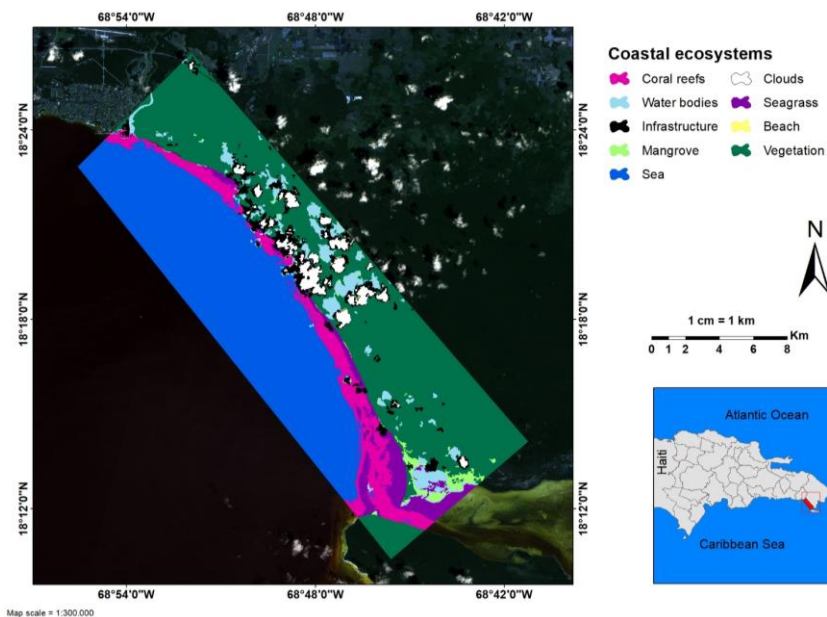


Figura 101. Ecosistemas presentes en Bayahibe, República Dominicana

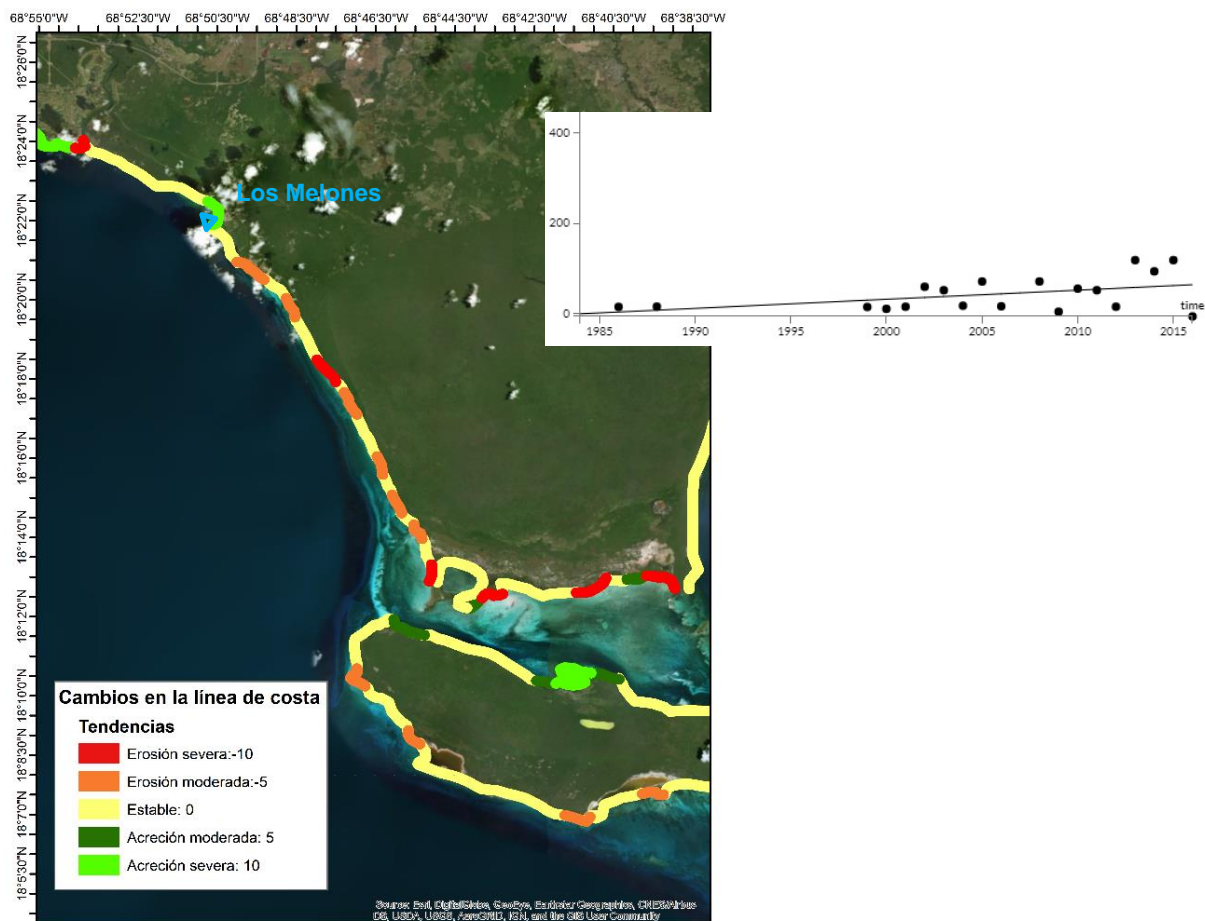


Figura 102. Estado de las playas, en rojo se muestran zonas con erosión severa (mayor a 10m) entre 1984 y 2017 en Bayahibe

### Problemática y selección de alternativas: Los Melones, Bayahibe

De acuerdo con la caracterización realizada, las condiciones identificadas en el sitio son (Figura 103):

- Línea de costa: Acreción regional y erosión puntual
- Limitaciones en el ordenamiento territorial: cementerio en la playa
- Problemas en el manejo de embarcaciones y visitantes
- Playa perturbada: compactada por vehículos y lanchas. Infraestructura sobre la playa
- Estructuras de protección y delimitación sobre playa.

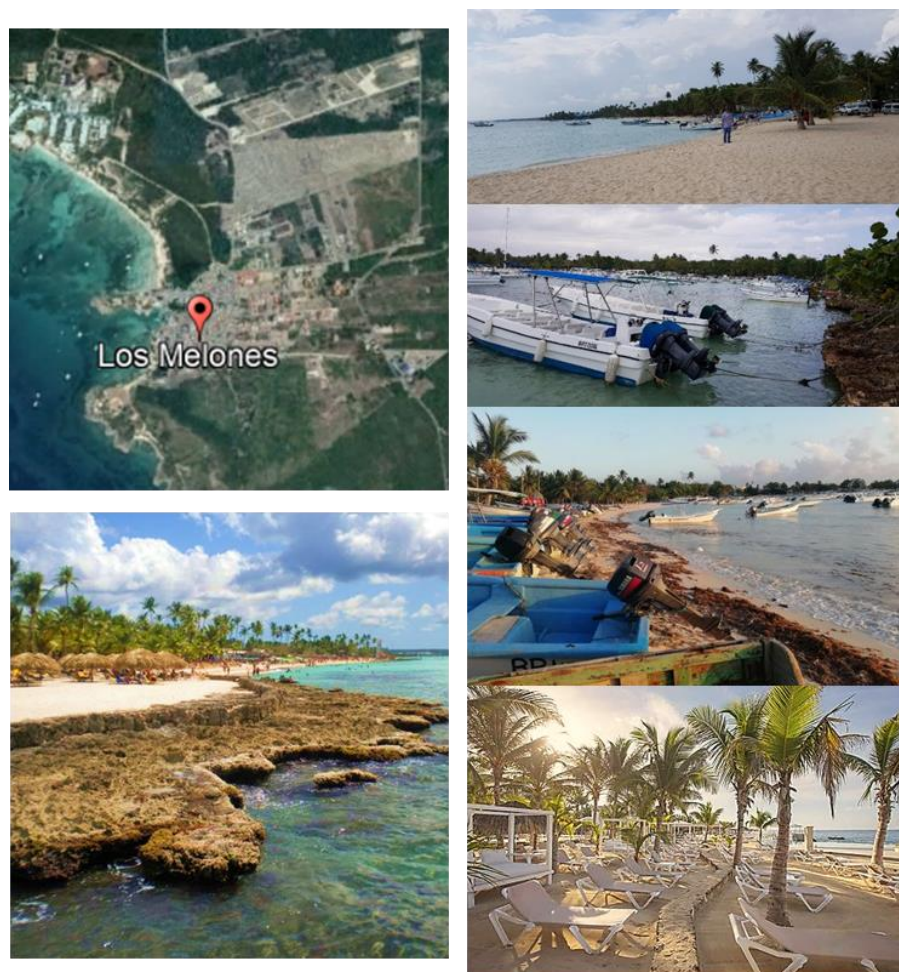


Figura 103. Condiciones actuales en Los Melones, Bayahibe (imagen satelital tomada de Google Earth, fotografías de Rodolfo Silva).

Como solución se propone una alternativa híbrida: Basada en Ecosistemas, Desmantelamiento/reubicación de estructuras e Infraestructura rígida mejorada (Tabla 9).

Tabla 9. Alternativas seleccionadas para Los Melones, Bayahibe.

Tipo de alternativa	Descripción
<div data-bbox="235 1522 930 1795"> <div data-bbox="235 1522 446 1617">Basada en ecosistemas</div> <div data-bbox="414 1554 479 1606">+</div> <div data-bbox="479 1522 690 1617">Desmantelamiento/reubicación de estructuras</div> <div data-bbox="657 1554 722 1606">+</div> <div data-bbox="722 1522 930 1617">Infraestructura rígida mejorada</div> <div data-bbox="251 1627 438 1795"> <div data-bbox="251 1627 438 1690">Conservación</div> <div data-bbox="251 1711 438 1795">Restauración</div> </div> <div data-bbox="511 1627 698 1795"> <div data-bbox="511 1627 698 1690">Desmantelamiento</div> <div data-bbox="511 1711 698 1795">Reubicación</div> </div> <div data-bbox="755 1627 930 1795"> <div data-bbox="755 1627 930 1690">Diseño amigable con el ambiente</div> <div data-bbox="755 1711 930 1795">Modificación amigable con el ambiente</div> </div> </div>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Revisión del estado de los ecosistemas, principalmente corales. Actuación en función de su estado.</li> <li>2. Elaboración de un plan de reordenamiento en la zona, con el fin de obtener los beneficios que requiere la población, manteniendo flujos y servicios ecosistémicos.</li> <li>3. Posible construcción de una marina</li> </ol>

## VII.2.3 Punta Cana

### Caracterización física

Para la caracterización del clima marítimo de la zona, se utilizaron los datos de reanálisis del modelo WAVEWATCHIII de la NOAA para la malla del Atlántico NW (NOOA, 2018), en la celda longitud 68.50°W latitud 18.33°N, la cual se ubica frente a las costas de Punta Cana, a una profundidad de 20 m sobre el nivel medio del mar. Los datos incluyen valores de febrero de 2005 a septiembre de 2018.

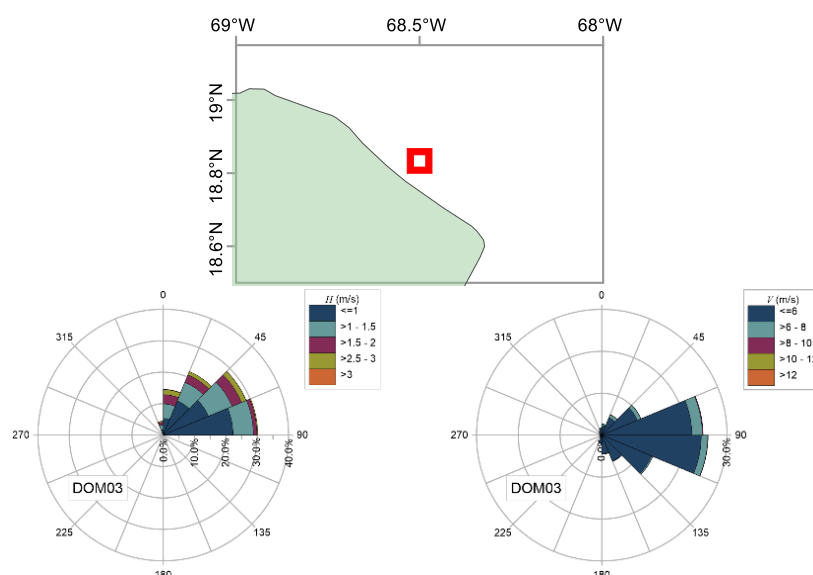


Figura 104. Localización de la celda de análisis y rosas de altura de ola y velocidad de viento para Punta Cana

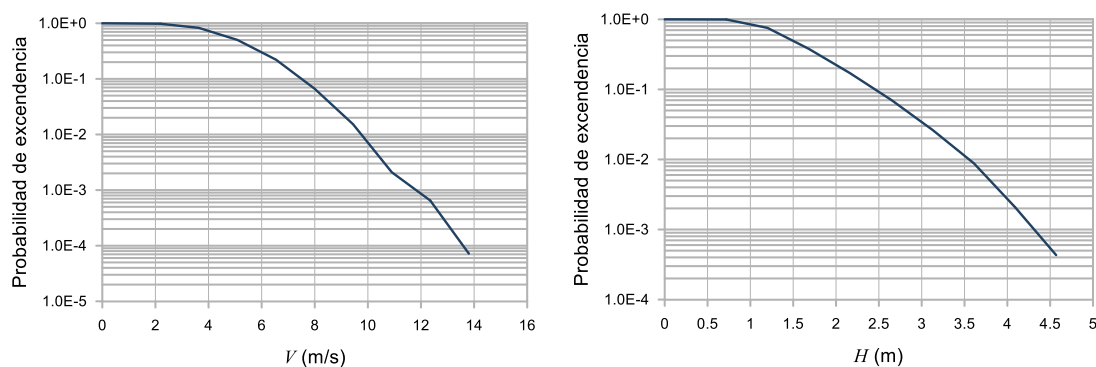


Figura 105. Probabilidad de excedencia de velocidad de viento y altura de ola para Punta Cana



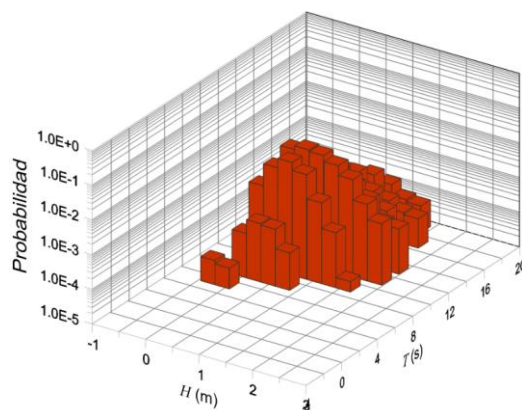


Figura 106. Probabilidad conjunta de altura de ola y periodo para Punta Cana

Tabla 10. Parámetros estadísticos de la reanálisis del oleaje para Punta Cana

Altura de ola (m)		Periodo (s)	
$H_{m\acute{a}x}$	4.81	$T_{m\acute{a}x}$	10.54
$\bar{H}$	1.4	$\bar{T}$	8.53
$H_{rms}$	1.522		
$H_{1/2}$	1.849	$T_{1/2}$	9.02
$H_s$	2.078	$T_s$	9.26
$H_{1/10}$	2.699	$T_{1/10}$	9.74
$H_{1/100}$	3.629	$T_{1/100}$	10.6

## Caracterización ecológica

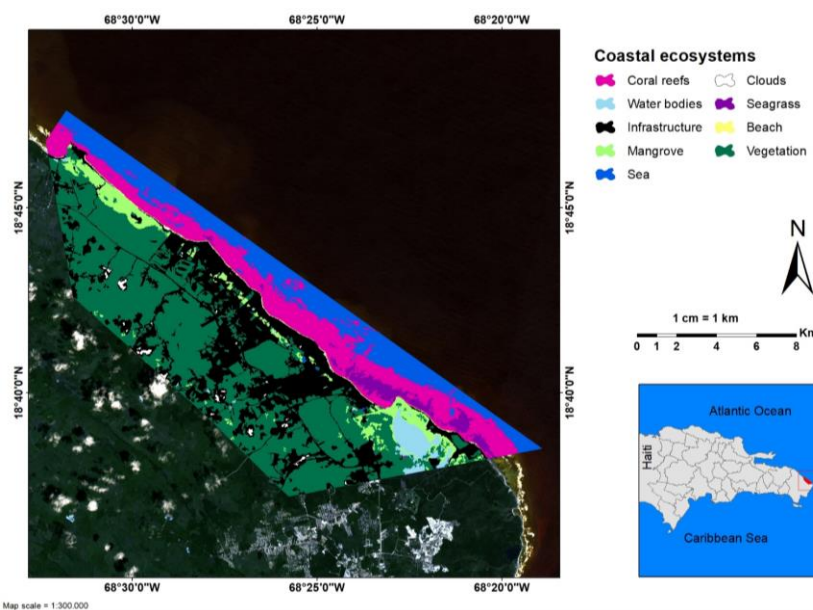


Figura 107. Ecosistemas presentes en Punta Cana, República Dominicana

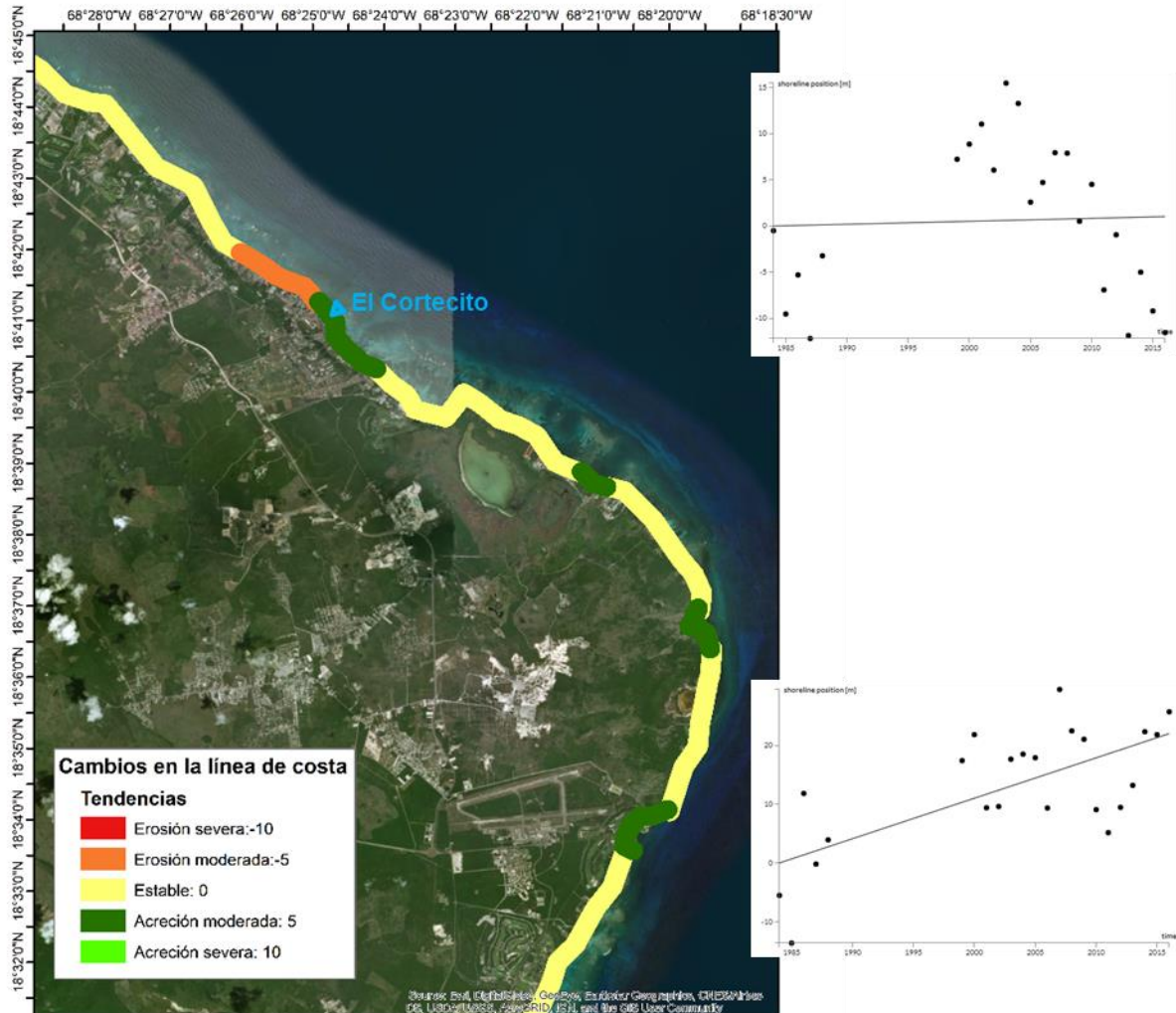


Figura 108. Estado de las playas, en rojo se muestran zonas con erosión severa (mayor a 10m) entre 1984 y 2017 en Punta Cana

### Problemática y selección de alternativas: El Cortecito, Punta Cana

De acuerdo con la caracterización realizada, las condiciones identificadas en el sitio son (Figura 109):

- Línea de costa: Heterogénea. Aparente acreción regional y zonas puntuales con erosión
- Arrecife fragmentado
- Playa y dunas frontales perturbadas: lanchas, vehículos e infraestructura
- Dunas: Pasillos de deflación por pisoteo, vegetación afectada
- Dudas sobre selección y ubicación de estructuras de protección: Geotubos tienen efectos adversos





Figura 109. Condiciones actuales en El Cortecito, Punta Cana (imagen satelital tomada de Google Earth, fotografías de Rodolfo Silva).

Como solución se propone una alternativa híbrida: Basada en Ecosistemas e Infraestructura rígida mejorada (Tabla 11).

Tabla 11. Alternativas seleccionadas para El Cortecito, Punta Cana

Tipo de alternativa			Descripción
Basada en ecosistemas	+	Desmantelamiento/reubicación de estructuras	1. Revisión del estado de los ecosistemas, principalmente corales. Actuación en función de su estado. 2. Desmantelamiento de estructuras 3. Contención de la erosión con rehabilitación de la duna-playa
Conservación		Desmantelamiento	
Restauración		Reubicación	
	+	Basada en ecosistemas	
		Conservación	
		Restauración	

### VII.3 Colombia

**Lugar:** Ciénega Grande de Santa Marta

**Ubicación:** La Ciénega Grande de Santa Marta es la laguna más grande de Colombia, está localizada en la parte baja de la cuenca del Río Magdalena, al norte del país. Limita al Este con la Sierra Nevada de Santa Marta y al Norte con una barra arenosa llamada isla Salamanca. Esta zona abarca 300 km<sup>2</sup> y se extiende 73 km entre el delta del río Magdalena y el municipio de Ciénega (Departamento de Magdalena).

El complejo lagunar tiene un área de 3 812 km<sup>2</sup>, está conformado por dos cuerpos de agua principales (Ciénega Grande con 450 km<sup>2</sup> y Ciénega de Pajarales 120 km<sup>2</sup>) y un sistema de 20 lagunetas, pantanos y manglares interconectados por una extensa red de canales. En total, contiene 757 km<sup>2</sup> de cuerpos de agua, convirtiéndolo en el ecosistema delta-lagunar más extenso del Caribe colombiano.



Figura 110. Localización de la Ciénega Grande de Santa Marta, Magdalena, Colombia (imagen modificada de Google Earth).

### VII.3.1 Caracterización física

#### Geología y geomorfología

La llanura del río Magdalena, dentro de la cual se encuentra la Ciénega Grande de Santa Marta, es resultado de la depresión formada por la Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía de San Jacinto. Esta llanura es constituida por cuatro unidades geomorfológicas mostradas en la Figura 111 (Bernal y Betancur, 1994).

I: Llanura de inundación del río Magdalena: Está formada por lodos limosos y arenas finas con contenido de materia orgánica. Los márgenes son acumulaciones en forma sinuosa con diferente amplitud y dirección (Martínez y Molina, 1992).

II: Sistema lagunar del delta: Mantiene un intercambio continuo entre el río y el Mar Caribe, con aportes sedimentarios de ambas fuentes (Bernal, 1996).

III: Sistema lagunar marginal: Incluye la Ciénega Grande de Santa Marta, el sistema lagunar de Pajarales y la ciénega del Chino. Se identifican formaciones como espigas, bajos, barras, deltas embrionarios subacuáticos, y playones. Su estructura geomorfológica y sus intercambios marinos-continetales permiten que este sistema se comporte como una laguna costera (Múnera, 2003).

IV: Playa e isla barrera: Esta unidad es conocida como la isla Salamanca y está conformada por playas, playas barreras, lagunas interiores y dunas. La dinámica de estas formaciones está gobernada por el oleaje y el transporte eólico. Se pueden encontrar dos tipos de dunas: parabólicas y embrionarias (Gómez, 2017).

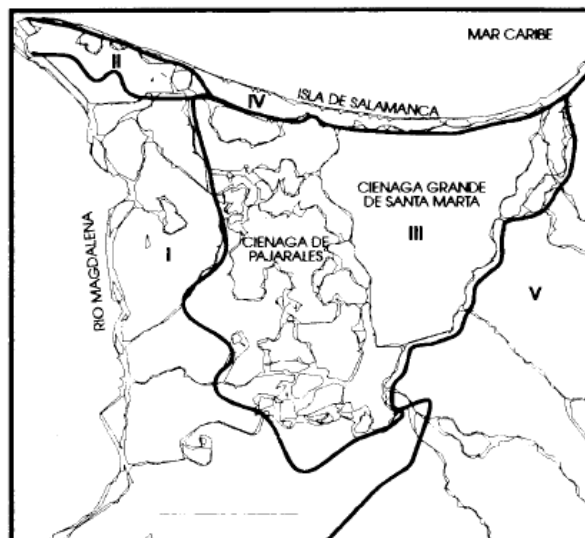


Figura 111. Unidades geomorfológicas del delta del río Magdalena (modificado de Bernal, 1996).

## Hidrodinámica

La dinámica hidrológica de la Ciénega Grande de Santa Marta está determinada por (Múnera, 2003):

- Precipitación
- Aportes fluviales de subcuencas de drenaje
- Intercambios con los cuerpos de agua con los que está interconectado por medio de caños
- Intercambios con el mar Caribe

Por otro lado, la ocurrencia de los eventos meteorológicos El Niño y La Niña, también contribuyen a la dinámica hidrológica del sitio.

### Análisis estadístico del clima marítimo

Para la caracterización del clima marítimo de la zona, se utilizaron los datos de reanálisis del modelo WAVEWATCHIII de la NOAA para la malla del Atlántico NW (NOOA, 2018), en la celda longitud 74.50°W latitud 11.17°N, la cual se ubica frente a las costas de la Ciénega Grande de Santa Marta, a una profundidad de 20 m sobre el nivel medio del mar. Los datos incluyen valores de febrero de 2005 a septiembre de 2018. La Tabla 12 muestra algunos parámetros estadísticos calculados con estos datos, de donde se tiene que la altura de ola media es de 2.21 m y el periodo de ola medio de 8.45 s.

Tabla 12. Parámetros estadísticos de la reanálisis del oleaje para Ciénega Grande de Santa Marta

Altura de ola (m)		Periodo (s)	
$H_{m\acute{a}x}$	2.97	$T_{m\acute{a}x}$	9.32
$\bar{H}$	1.123	$\bar{T}$	7.01
$H_{rms}$	1.211		
$H_{1/2}$	1.491	$T_{1/2}$	7.41
$H_s$	1.628	$T_s$	7.63
$H_{1/10}$	1.932	$T_{1/10}$	8.1
$H_{1/100}$	2.349	$T_{1/100}$	8.64

El resultado del análisis estadístico arroja las siguientes características:

- La dirección predominante de incidencia del oleaje es NNE, presentándose en mayor porcentaje olas de 1.0 a 2.0 m de altura. Para el caso del viento, la dirección predominante es NE, con velocidades de 6 a 10 m/s (Figura 112).
- El 50 % de probabilidad de excedencia se tiene en alturas de ola menores a 1.25 m. La velocidad del viento con más de 50 % de probabilidad de excedencia es de 6 m/s (Figura 113).
- El rango de periodos que se tienen es entre 2 y 12 s, teniendo mayor probabilidad la presencia de olas con periodos entre 6 y 8 s, con alturas menores a 1 m (Figura 114).

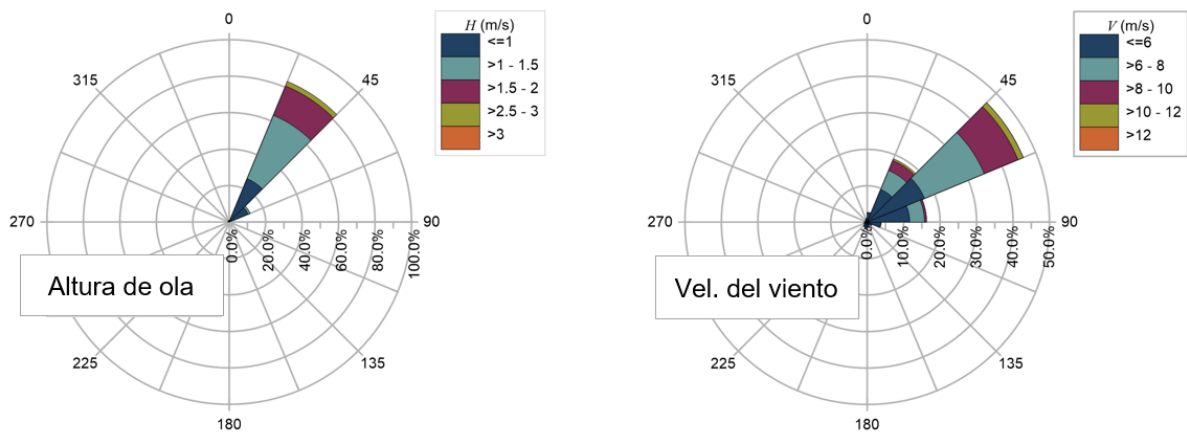


Figura 112. Rosa de oleaje (izq.) y rosa de vientos (der.) para Ciénega Grande de Santa Marta – Anual

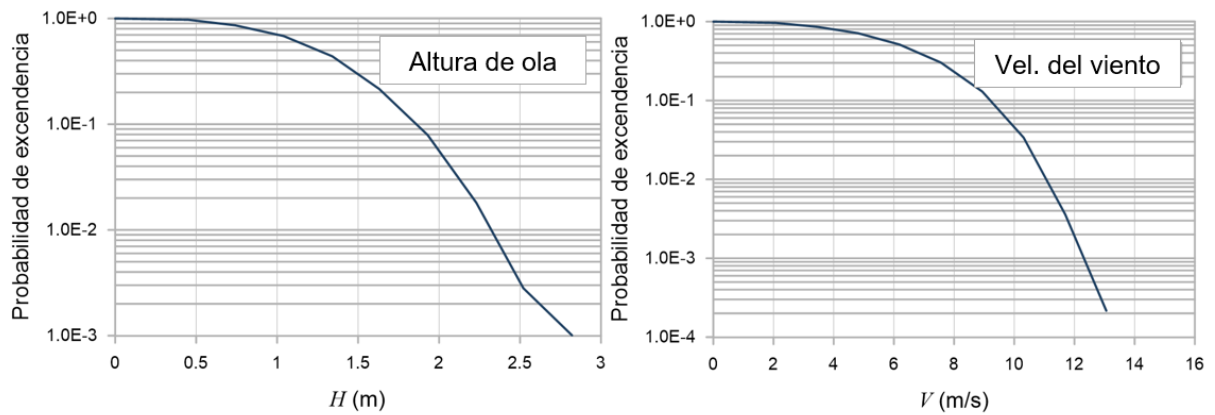


Figura 113. Probabilidad de excedencia de alturas de ola significativa (izq.) y de periodos medio de ola (der.) para Ciénega Grande de Santa Marta - Anual

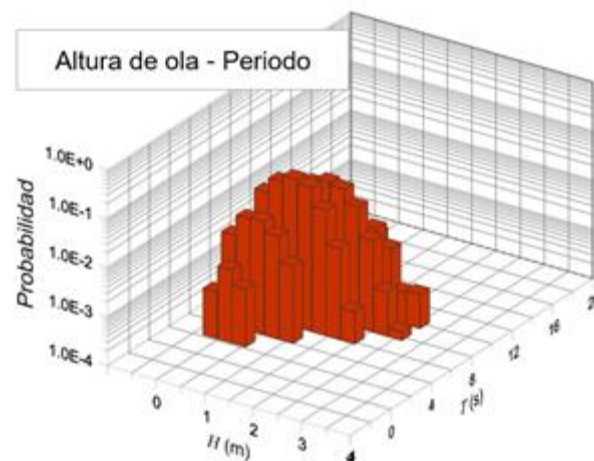


Figura 114. Probabilidad conjunta altura de ola significativa y periodo medio de ola para Ciénega Grande de Santa Marta - Anual



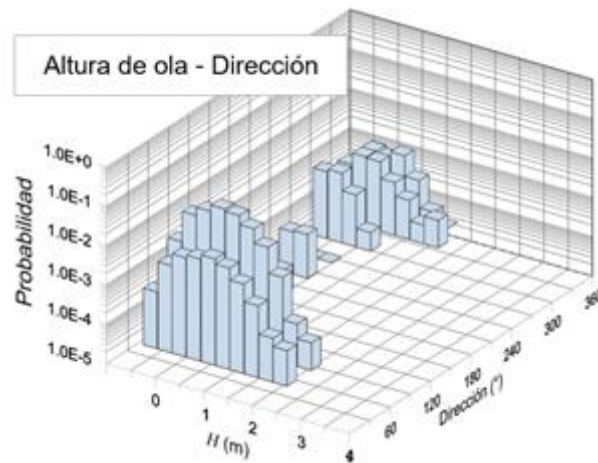


Figura 115. Probabilidad conjunta altura de ola significativa y dirección de propagación para Ciénega Grande de Santa Marta - Anual

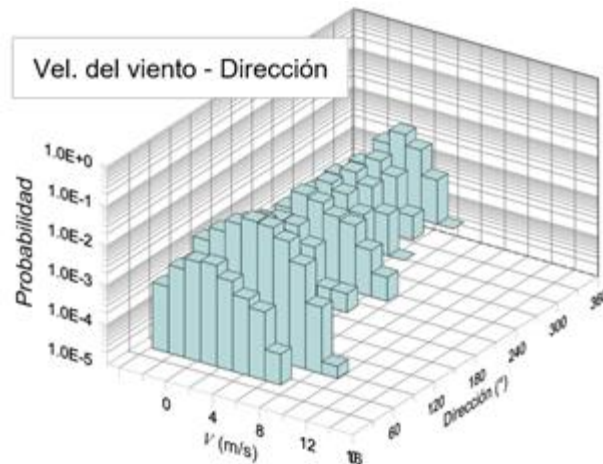


Figura 116. Probabilidad conjunta de vientos sostenidos y dirección de incidencia para Ciénega Grande de Santa Marta – Anual

## Riesgos identificados

En la actualidad, la erosión costera es un proceso predominante en los sectores oriental y central de la Isla Salamanca. En esta zona, las dunas presentan escarpes e irregularidades por efecto de la acción del oleaje. Por otro lado, se identifican tendencias de acreción en la zona occidental, donde dunas embrionarias se encuentran en formación (Gómez, 2017).

Cuando ocurre el paso de fuertes lluvias en la zona, éstas provocan el aumento de los niveles en el río y que se recupere el margen natural correspondiente a esta época. Estos eventos dañan poblaciones que se ven afectadas por inundaciones.



### VII.3.2 Caracterización ecológica

#### Tipos de ecosistemas y estado de conservación

La compleja geomorfología del sitio ha dado origen a un mosaico de distintos ecosistemas. Entre ellos, manglares, lagunas, salinas, playas y dunas.

#### Humedales: Manglares y pantanos

Los humedales son los ecosistemas dominantes en la zona. Son de especial importancia los humedales arbóreos que en este sistema están representados por manglar. Los bosques de manglar tienen tres especies dominantes: Mangle rojo o colorado, mangle amarillo y mangle negro o salado (*Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* y *Avicennia germinans*, respectivamente).

El estado de conservación es heterogéneo. En algunas zonas se encuentra fragmentado por la modificación de flujos hídricos. Dicha modificación es producto de la construcción de infraestructura como la carretera Ciénega-Barranquilla. La interrupción de flujos ha originado el incremento de salinidad y manchones de manglar muerto que, a su vez, han dado pie al incremento del área de pantanos y de salares (Morales et al., 2012). Además, en el borde de la Isla Salamanca, la erosión ha llegado hasta los manglares causando su retroceso (INVEMAR-GEO, 2014). No obstante, algunos de los parches de manglar que han quedado aislados por la carretera han sido catalogados como manglares bien conservados pues son de difícil acceso (Gómez et al., 2012; Cótes, 2004).

#### Salinas o salares

Las salinas se encuentran en todo el sistema lagunar, aunque con mayor frecuencia detrás de las playas y entre manchones de manglar. Por ejemplo, detrás de la playa de la Isla Salamanca. En este caso se pueden diferenciar dos tipos de salares, los que son efímeros y los permanentes. Los permanentes están asociados a áreas donde había manglar, pero su muerte y la formación de capas de sal sobre sedimentos con altos niveles de materia orgánica ha dado paso a este ecosistema.

En estos ecosistemas se presentan inundaciones estacionales que han formado grietas (Posada et al., 2009; Bernal, 1996). También, se observa evidencia de erosión y pérdida de suelos.

#### Playas y dunas

El frente costero de Ciénega Grande tiene más de 100 km (Figura 117). En las playas hay vegetación típica de estos ambientes y la formación de dunas móviles y estabilizadas por vegetación de matorral. Las playas tienen evidencia de erosión crónica (13.5 m/año).

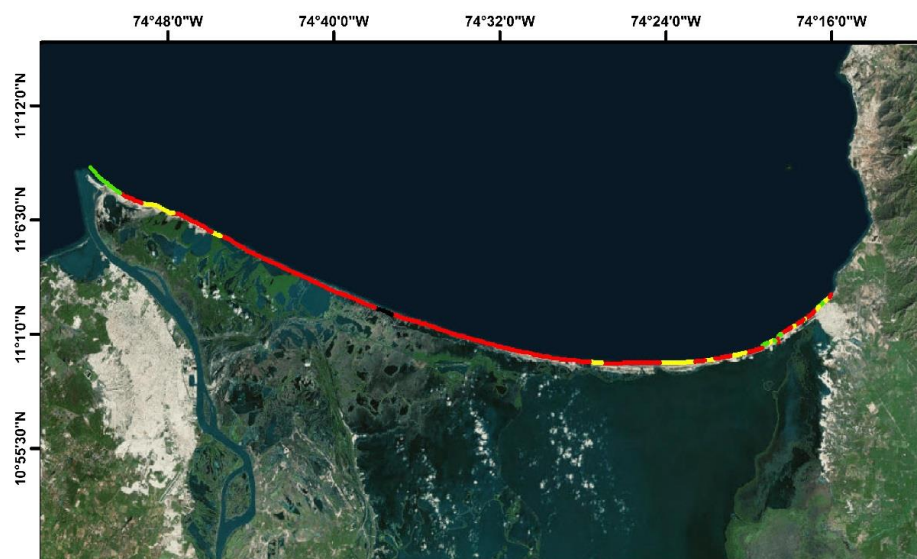


Figura 117. Grado de erosión de Ciénega Grande, Colombia. En rojo se presentan las zonas con erosión, en amarillo zonas relativamente estables y en verde zonas con acreción. En análisis considera los cambios entre 2000 y 2017.

Entre los factores que han causado la modificación de la dinámica sedimentaria del frente costero, está la construcción de obras de protección (Figura 118). A estas obras se asocia el incremento de hasta 100 m en una zona y simultáneamente el retroceso de una zona contigua a tasas de hasta 12 m/año (INVEMAR-GEO, 2014). Por su parte, las dunas presentan signos de erosión y pérdida de vegetación (Gámez, 2011).

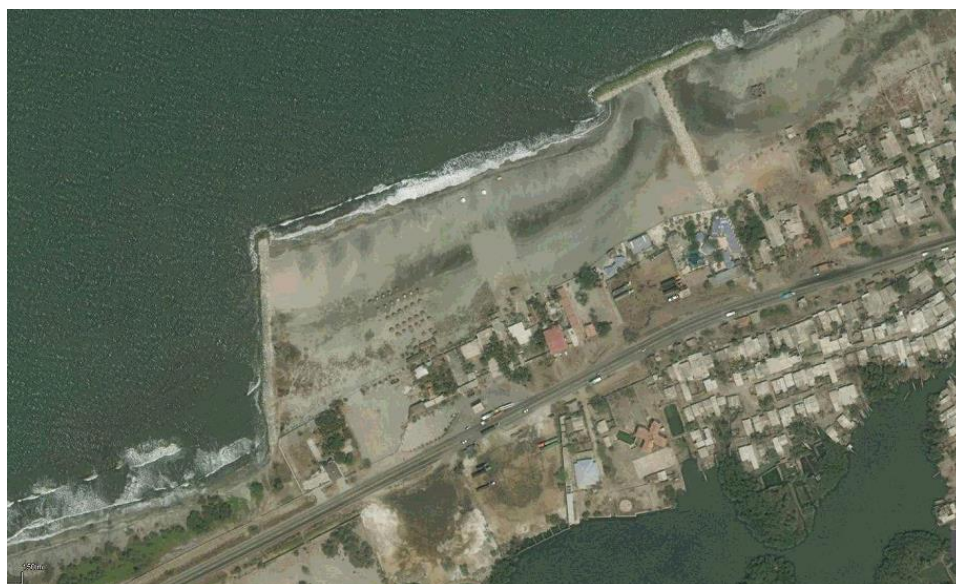


Figura 118. Obras de protección costera en Ciénega Grande de Santa Marta

## Principales amenazas

Los principales factores de degradación han sido la modificación de los flujos hidrosedimentarios, tala y contaminación del agua. La interrupción de flujos hídricos ha traído consigo el incremento de salinidad en algunos sitios y la muerte de extensas zonas de manglar. Se tiene estimado un incremento en la sedimentación y que más de la mitad del manglar original ha muerto por dichas causas. Desde 1995 se hacen esfuerzos por recuperar la interconexión entre los diferentes parches de Manglar y el río Magdalena (INVEMAR, 2002). Los trabajos de recuperación y rehabilitación del sistema lagunar de la CGSM y de los bosques de manglar asociados a este se iniciaron en 1995 (Perdomo et al., 1999). Por su parte, la instalación de estructuras de protección costera ha causado la modificación de las playas, pérdida de dunas y desplazamiento de manglar (Marín, 2003).

## Figuras de protección ambiental

La Ciénega Grande de Santa Marta es de gran importancia ecológica. De hecho, es el sitio colombiano con mayor número de figuras de protección y conservación. Esto se debe a es el hábitat de aves (195 especies), mamíferos (46 especies), reptiles (40 especies), anfibios (10 especies), peces (130 especies) (Invemar, 2007; Moreno-Bejarano y ÁlvarezLeón, 2003).

A nivel internacional, se encuentran los siguientes reconocimientos: Sitio RAMSAR, Reserva de la Biósfera, Área de Importancia para la Conservación de las Aves. Además, a nivel nacional se han decretado dos áreas protegidas dentro de esta zona: la Vía Parque Isla de Salamanca y el Santuario de Flora y Fauna Ciénega Grande de Santa Marta.

## VII.3.3 Caracterización socioeconómica

### Población

El área de estudio corresponde a tres municipios: Sitio nuevo, Pueblo Viejo y Ciénega donde habitan 166,487 personas. Esta zona equivale a la cuarta parte de la costa del departamento de Magdalena. La población está concentrada en zonas urbanas (Figura 119).

### Actividades económicas

Desde el punto de vista económico, el río Magdalena es la arteria fluvial más importante de Colombia. Por su parte, Ciénega grande tiene una alta importancia pesquera con una producción anual estimada en 6 200 toneladas (Invemar, 2013b) y del que dependen 15 000 familias.

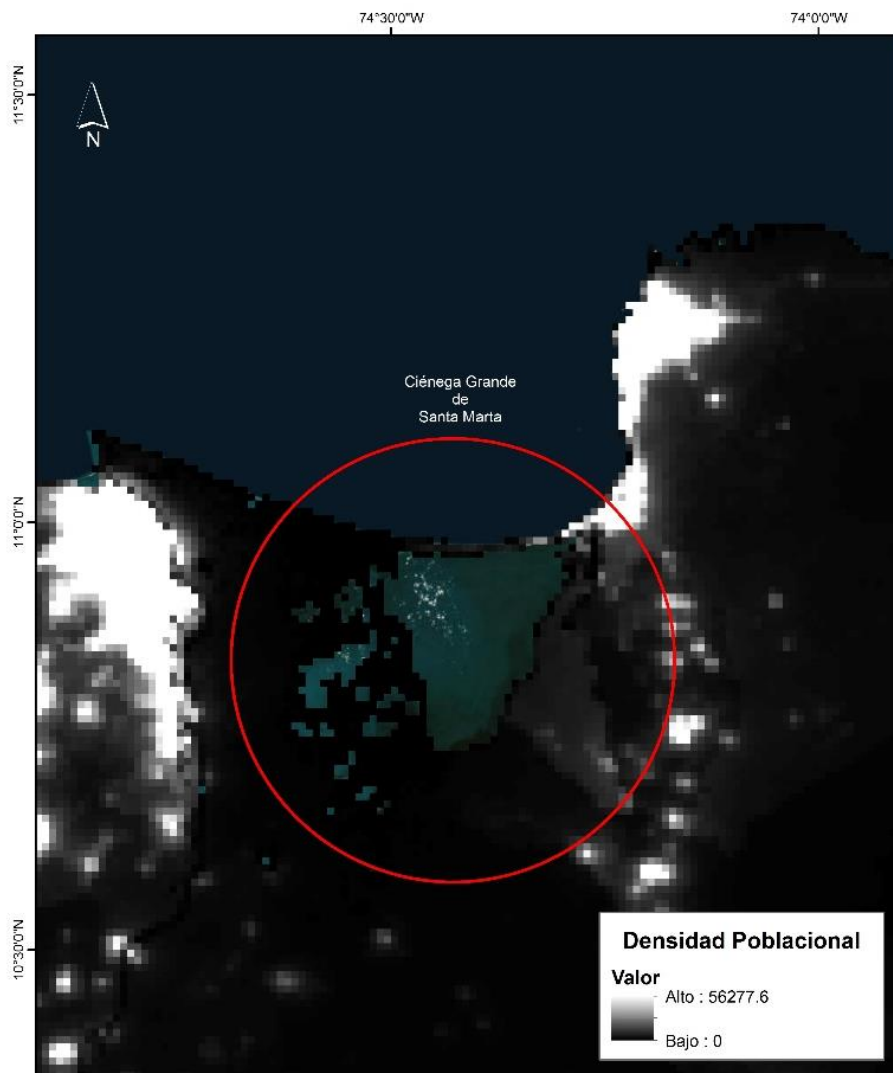


Figura 119. Densidad poblacional de Ciénega de Santa Marta

#### VII.3.4 Problemática y selección de alternativas: Kilómetro 19 de la Vía Ciénega-Barranquilla

De acuerdo con la caracterización realizada, las condiciones identificadas en el sitio son (Figura 120):

- La construcción de la carretera entre Barranquilla y Ciénega impide el intercambio de agua dulce y salada
- La energía del oleaje induce la erosión de la playa
- Los efectos de la erosión ponen en riesgo ecosistemas e infraestructura (la carretera)



Figura 120. Condiciones actuales en Kilómetro 19 de la Vía Ciénega-Barranquilla (imagen satelital tomada de Google Earth, fotografías de Valeria Chávez)

Como solución se propone una alternativa híbrida: Basada en Ecosistemas e Infraestructura rígida mejorada (Tabla 7).

Tabla 13. Alternativas seleccionadas para el Kilómetro 19 de la Vía Ciénega-Barranquilla

Tipo de alternativa	Descripción
<div data-bbox="272 1430 776 1696"> <div data-bbox="272 1430 440 1514">Basada en ecosistemas</div> <div data-bbox="483 1461 537 1514">+</div> <div data-bbox="570 1430 737 1514">Infraestructura rígida mejorada</div> <div data-bbox="321 1535 483 1598">Conservación</div> <div data-bbox="613 1535 776 1598">Diseño amigable con el ambiente</div> <div data-bbox="321 1619 483 1696">Restauración</div> <div data-bbox="613 1619 776 1696">Modificación amigable con el ambiente</div> </div>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Restauración-recuperación de los flujos hidrosedimentarios dentro del humedal y mejorar la conectividad entre ecosistemas.</li> <li>2. Contención de la erosión en la playa en sitios afectados con la construcción de infraestructura rígida mejorada (Ej. Duna acorazada con vegetación)</li> </ol>



## VII.4 Trinidad y Tobago

**Lugar:** Pigeon Point y Otaheite bay

### **Ubicación:**

La playa de Pigeon Point se localiza en la isla de Tobago y está delimitada por el Parque Marino Bucco Reef por la parte continental. Forma parte del *Pigeon Point Heritage Park*. Es el límite Este de la laguna Bon Accord.

Otaheite bay se localiza en el sur occidental de la isla de Trinidad, en el Golfo de Paria, entre San Fernando y La Brea.

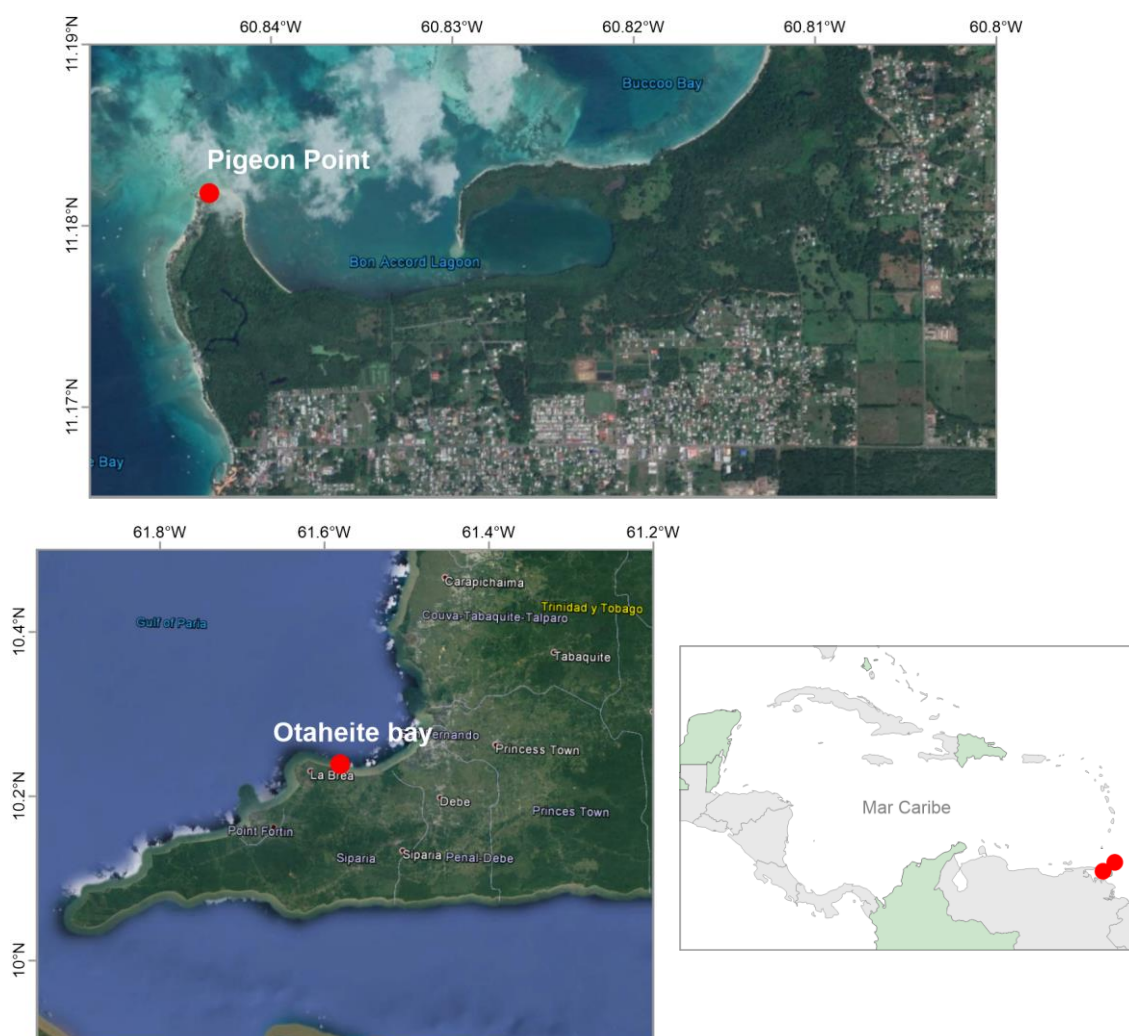


Figura 121. Localización de Pigeon Point, Tobago y Otaheite bay, Trinidad (imágenes modificadas de Google Earth).



#### VII.4.1 Caracterización física

Trinidad y Tobago se encuentran en la plataforma continental de América del Sur. La isla de Trinidad se localiza justo frente al delta del Río Orinoco. La estación seca ocurre entre enero y abril, mientras que la estación húmeda se extiende de junio a noviembre. Mayo y diciembre se consideran meses de transición entre las dos estaciones (Henry, 1990).

Para la caracterización del clima marítimo de la zona, se utilizaron los datos de reanálisis del modelo WAVEWATCHIII de la NOAA para la malla del Atlántico NW (NOOA, 2018), en dos celdas: la celda longitud 60.83°W latitud 11.17°N, frente a la costa de Pigeon Point; y la celda longitud 61.83°W latitud 10.83°N, frente a la costa de Otaheite bay, ambas a una profundidad de 20 m sobre el nivel medio del mar. Los datos incluyen valores de febrero de 2005 a septiembre de 2018. La Tabla 14 muestra algunos parámetros estadísticos calculados con estos datos, de donde se tiene que para Pigeon Point la altura de ola media es de 2.32 m y el periodo de ola medio de 9.08 s. Para Otaheite bay, la altura de ola media es de 2.36 m y el periodo de ola medio de 9.14 s. Ambas condiciones de oleaje son muy similares.

Tabla 14. Parámetros estadísticos del reanálisis del oleaje para Pigeon Point y Otaheite bay

Pigeon Point				Otaheite bay			
Altura de ola (m)		Periodo (s)		Altura de ola (m)		Periodo (s)	
$H_{m\acute{a}x}$	2.71	$T_{m\acute{a}x}$	9.04	$H_{m\acute{a}x}$	2.36	$T_{m\acute{a}x}$	9.24
$\bar{H}$	1.34	$\bar{T}$	8.26	$\bar{H}$	1.032	$\bar{T}$	8.52
$H_{rms}$	1.386			$H_{rms}$	1.083		
$H_{1/2}$	1.619	$T_{1/2}$	8.45	$H_{1/2}$	1.29	$T_{1/2}$	8.8
$H_s$	1.74	$T_s$	8.49	$H_s$	1.404	$T_s$	8.88
$H_{1/10}$	2.037	$T_{1/10}$	8.84	$H_{1/10}$	1.691	$T_{1/10}$	9.04
$H_{1/100}$	2.453	$T_{1/100}$	9.13	$H_{1/100}$	2.138	$T_{1/100}$	9.21

El resultado del análisis estadístico para la celda localizada frente a Pigeon Point arroja las siguientes características:

- La dirección predominante de incidencia del oleaje es E, presentándose en mayor porcentaje olas menores a 2.0 m de altura. Para el caso del viento, la dirección predominante es igualmente E, con velocidades menores a 10 m/s (Figura 122).
- El 50 % de probabilidad de excedencia se tiene en alturas de ola menores a 1.4 m. La velocidad del viento con más de 50 % de probabilidad de excedencia es de 7 m/s (Figura 123).
- El rango de periodos que se tienen es entre 6 y 20 s, teniendo mayor probabilidad la presencia de olas con periodos alrededor de 12 s, con alturas menores a 1 m (Figura 124).

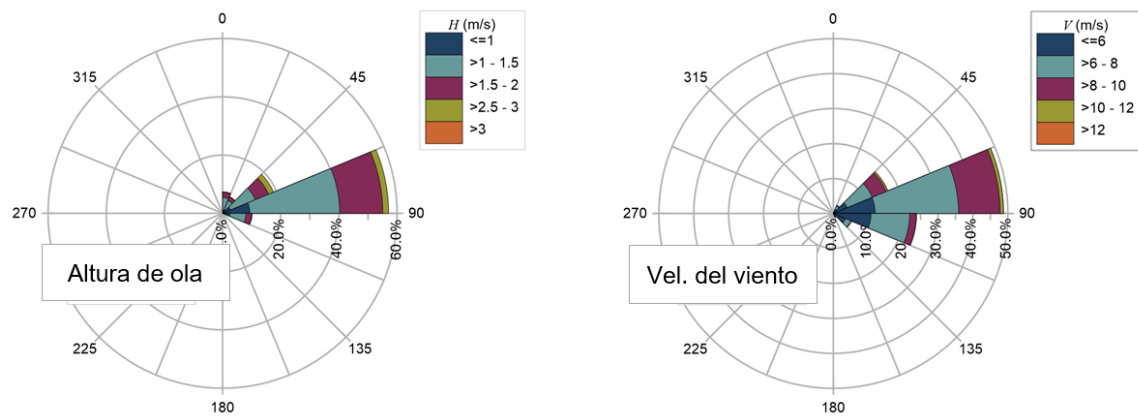


Figura 122. Rosa de oleaje (izq.) y rosa de vientos (der.) para Pigeon Point - Anual

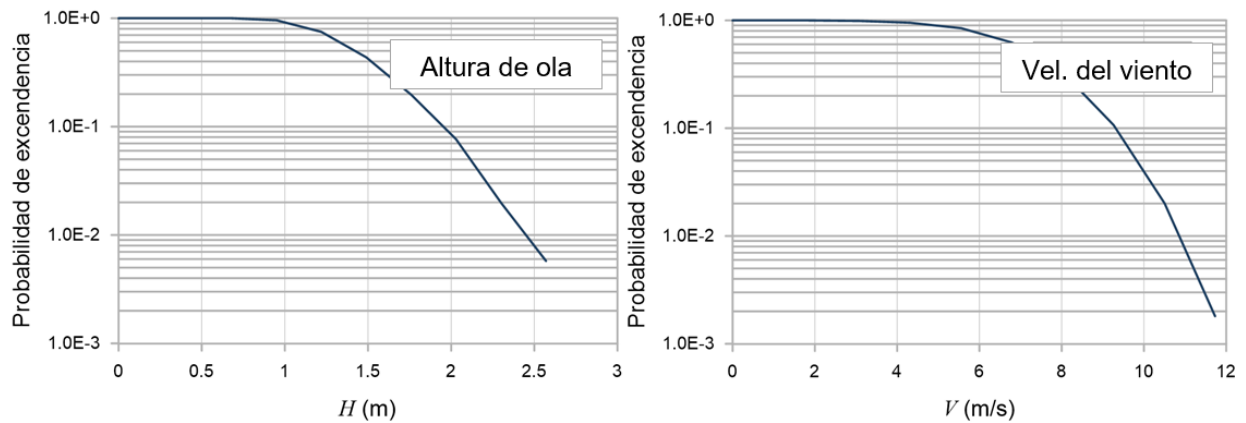


Figura 123. Probabilidad de excedencia de alturas de ola significativa (izq.) y de periodos medio de ola (der.) para Pigeon Point - Anual

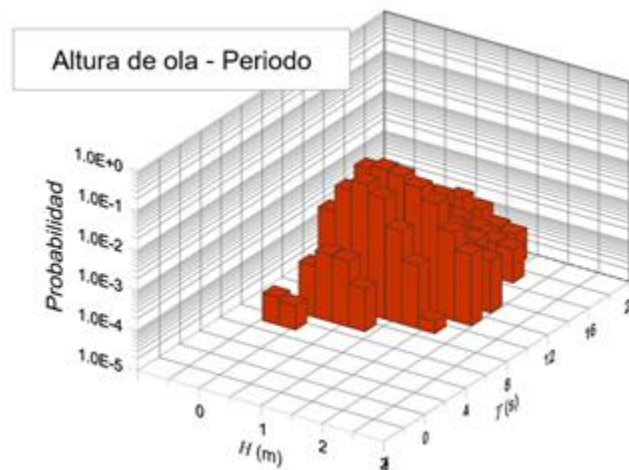


Figura 124. Probabilidad conjunta altura de ola significativa y periodo medio de ola para Pigeon Point - Anual

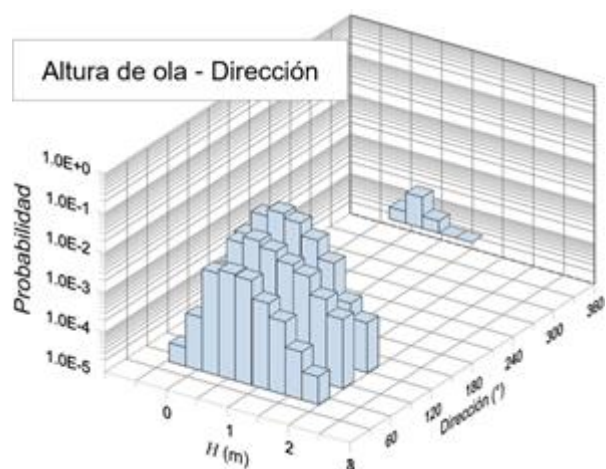


Figura 125. Probabilidad conjunta altura de ola significativa y dirección de propagación para Pigeon Point - Anual

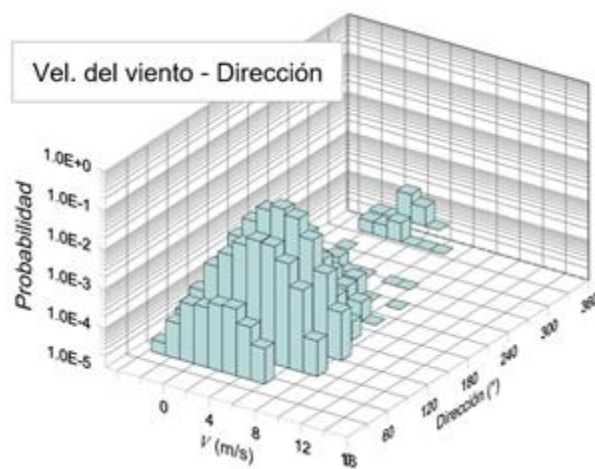


Figura 126. Probabilidad conjunta de vientos sostenidos y dirección de incidencia para Pigeon Point - Anual

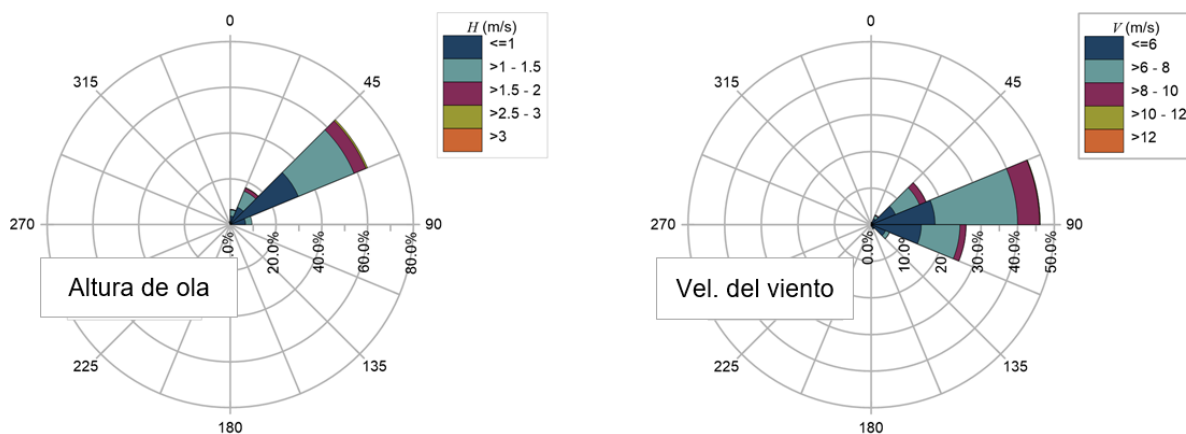


Figura 127. Rosa de oleaje (izq.) y rosa de vientos (der.) para Otaheite bay - Anual

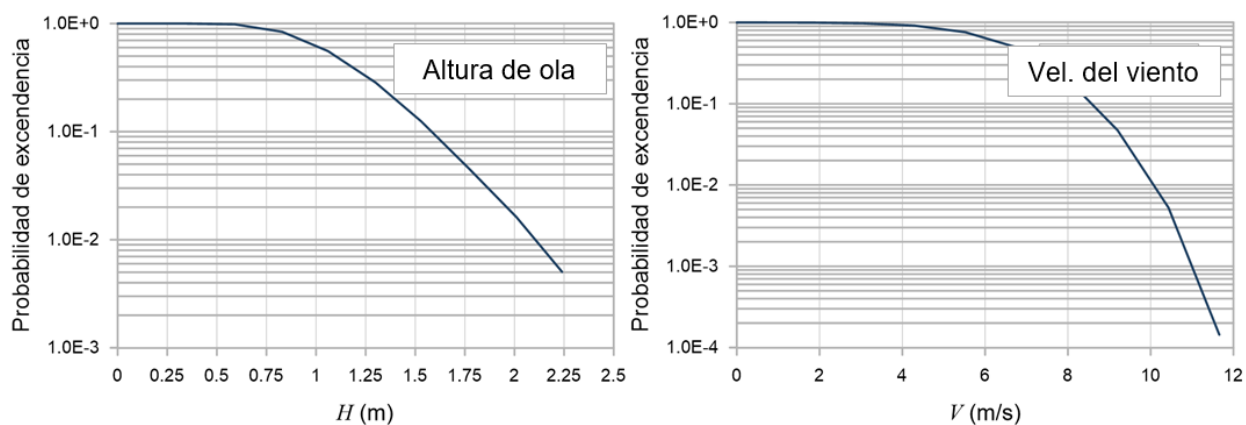


Figura 128. Probabilidad de excedencia de alturas de ola significativa (izq.) y de periodos medio de ola (der.) para Otaheite bay - Anual

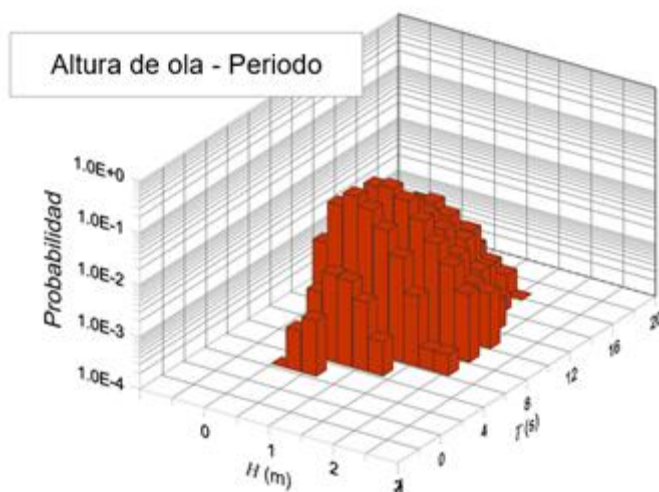


Figura 129. Probabilidad conjunta altura de ola significativa y periodo medio de ola para Otaheite bay - Anual

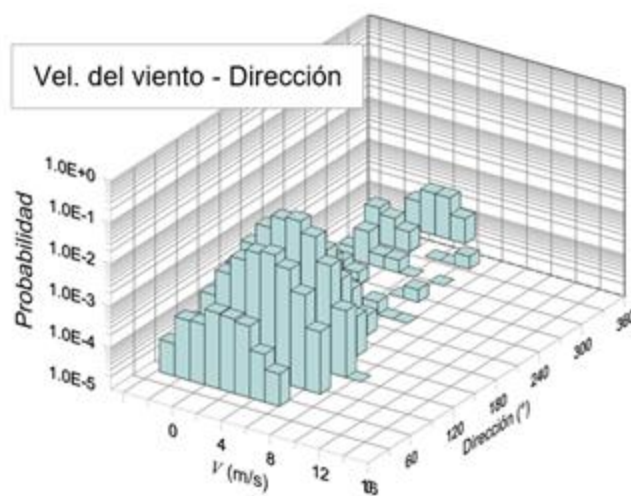


Figura 130. Probabilidad conjunta de vientos sostenidos y dirección de incidencia para Otaheite bay - Anual

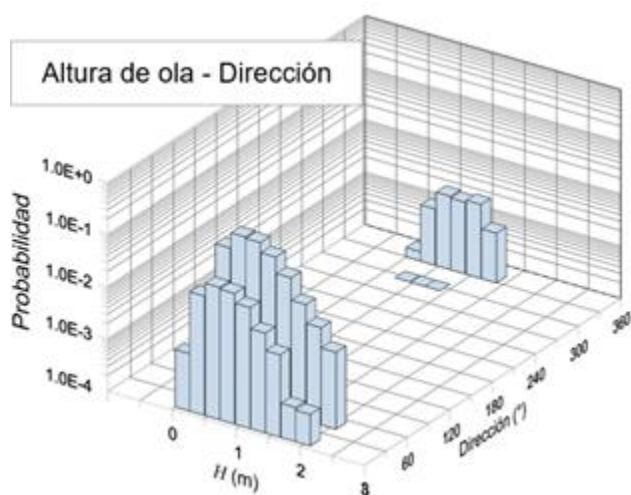


Figura 131. Probabilidad conjunta altura de ola significativa y dirección de propagación para Otaheite bay - Anual

## VII.4.2 Caracterización ecológica

### Tipos de ecosistemas

A pesar de encontrarse en islas distintas, los dos sitios de estudio tienen ecosistemas similares. Entre ellos, destacan los manglares, playas con dunas frontales, arrecifes y pastos marinos.



## Estado de conservación

### Humedales

Los manglares son los humedales más importantes en ambas islas. Sin embargo, se encuentran bajo una presión considerable. Por ejemplo, en la isla de Trinidad se perdieron alrededor de 3 000 ha en tres décadas (1976 a 2006) y algunas estimaciones refieren que se han perdido la mitad de los humedales que había a principios del siglo XX. Las principales amenazas son la tala, el establecimiento de campos agrícolas y la construcción de infraestructura (Carbonell et al., 2007).

### Playas y dunas costeras

En ambos casos, las playas han sido afectadas por la degradación de los arrecifes que ha causado que el oleaje golpee con mayor energía causando erosión (Figura 132). Además, se ha interrumpido la dinámica sedimentaria por la construcción de infraestructura como marinas u hoteles sobre el cordón de dunas primario.

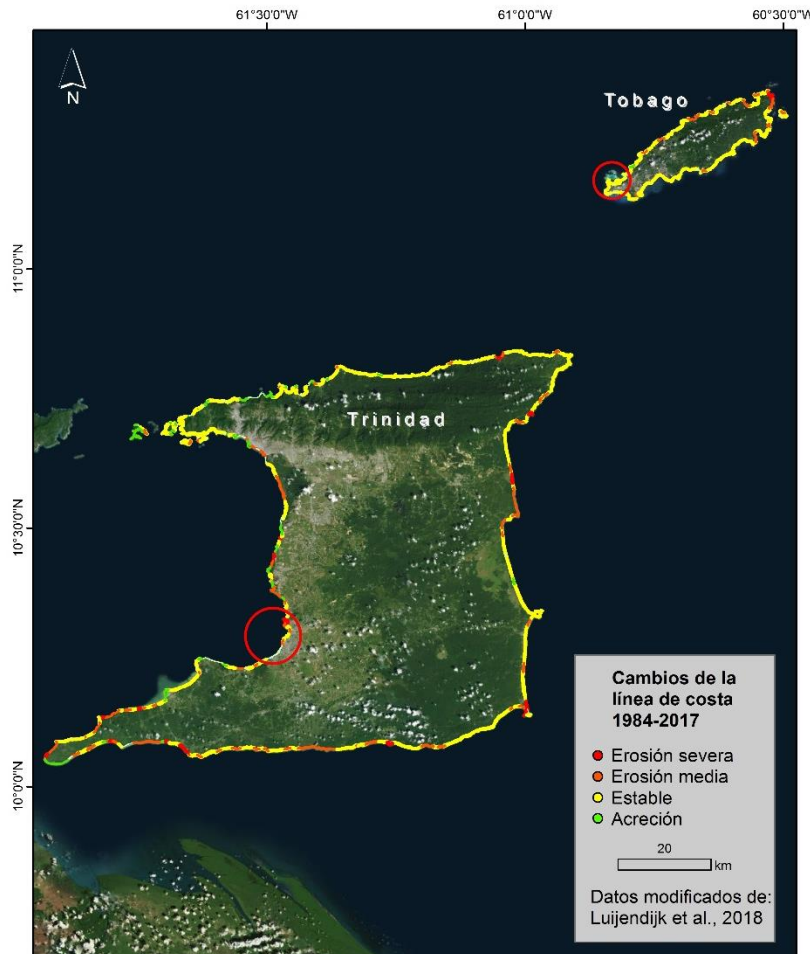


Figura 132. Estado de las playas, en rojo se muestran zonas con erosión severa (mayor a 10m) entre 1984 y 2017

### Arrecifes de coral

En Tobago, los arrecifes están presentes en alrededor del 70% de las aguas costeras. De manera similar a otras islas del Caribe, los arrecifes han estado sujetos a una degradación severa. Entre los factores que han causado el deterioro de estos sistemas están: eventos de blanqueamiento, eventos hidrometeorológicos extremos, incremento en la turbidez del agua por descargas no tratadas, enfermedades coralinas, daño físico directo por encallamientos y turismo con manejo deficiente. Se estima que, en el norte de la isla de Tobago, la cobertura disminuyó en 10%.

### Principales amenazas

La principal amenaza es el cambio de uso de suelo acelerado con baja planeación territorial. En la Figura 133 se puede observar la mancha urbana sobre terrenos que antes estaban cubiertos por humedales y manglares. La vegetación perturbada incluye manglares perturbados, normalmente rodeando a manchones de manglar mejor conservado. El único relicto de manglar que se encuentra en Pigeon Point está perturbado. La mayor parte de este ecosistema ha sido desecado y ocupado por la zona urbana o por parcelas.

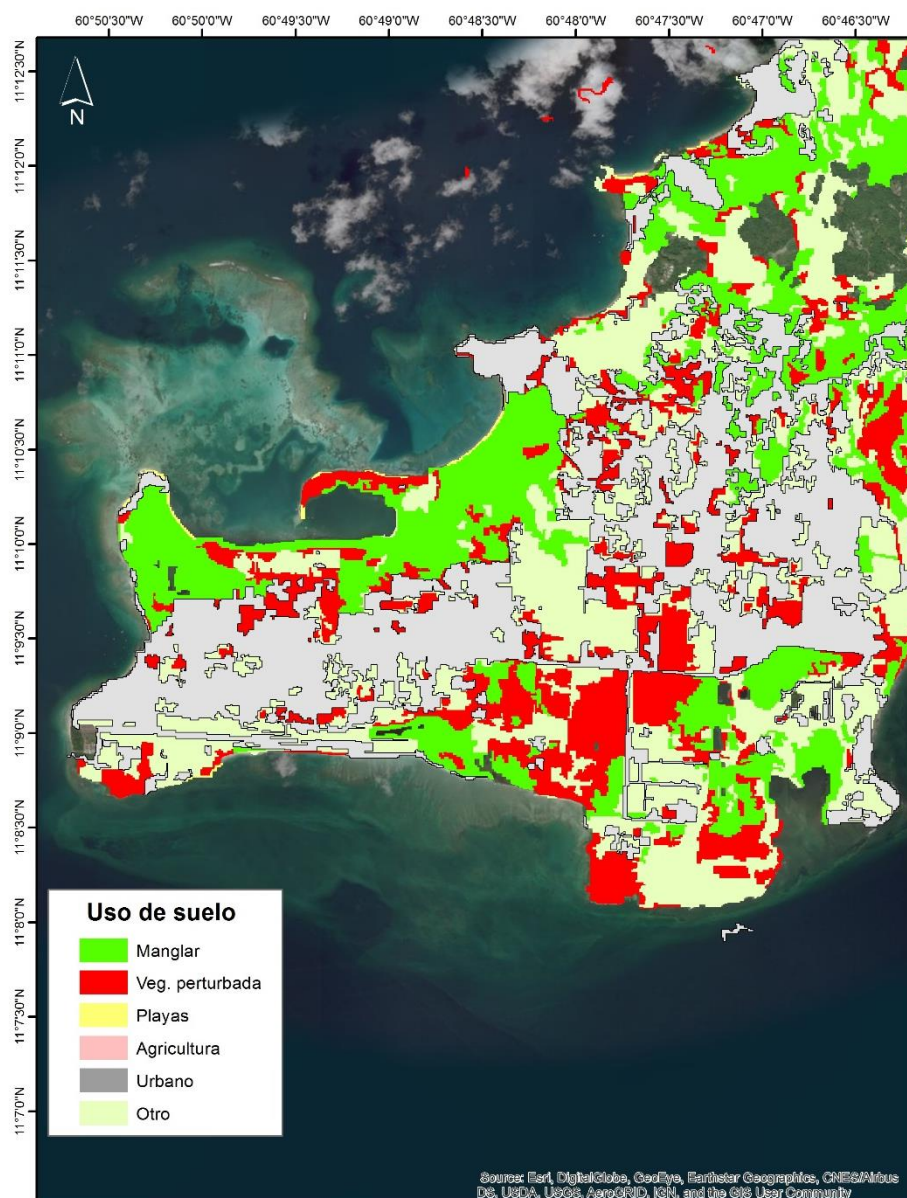


Figura 133. Uso de suelo en Pigeon Point. En rojo se observan manchones de vegetación perturbada

#### VII.4.3 Caracterización socioeconómica

En el último censo, se calculó que en el país habitan alrededor de 1.3 millones de personas. De estas, la mayoría vive en Trinidad y solo alrededor del 5% en Tobago. Como puede observarse en la Figura 134, la mayoría de la población está concentrada en el oeste de la isla, predominantemente en el norte. En cambio, en el Tobago la mayoría de la población se concentra en el sur.

En Trinidad, el desarrollo económico ha estado enfocado en el desarrollo de industria y tiene un mayor Producto Interno Bruto que Tobago en donde sus pobladores tienen una alta dependencia del turismo.

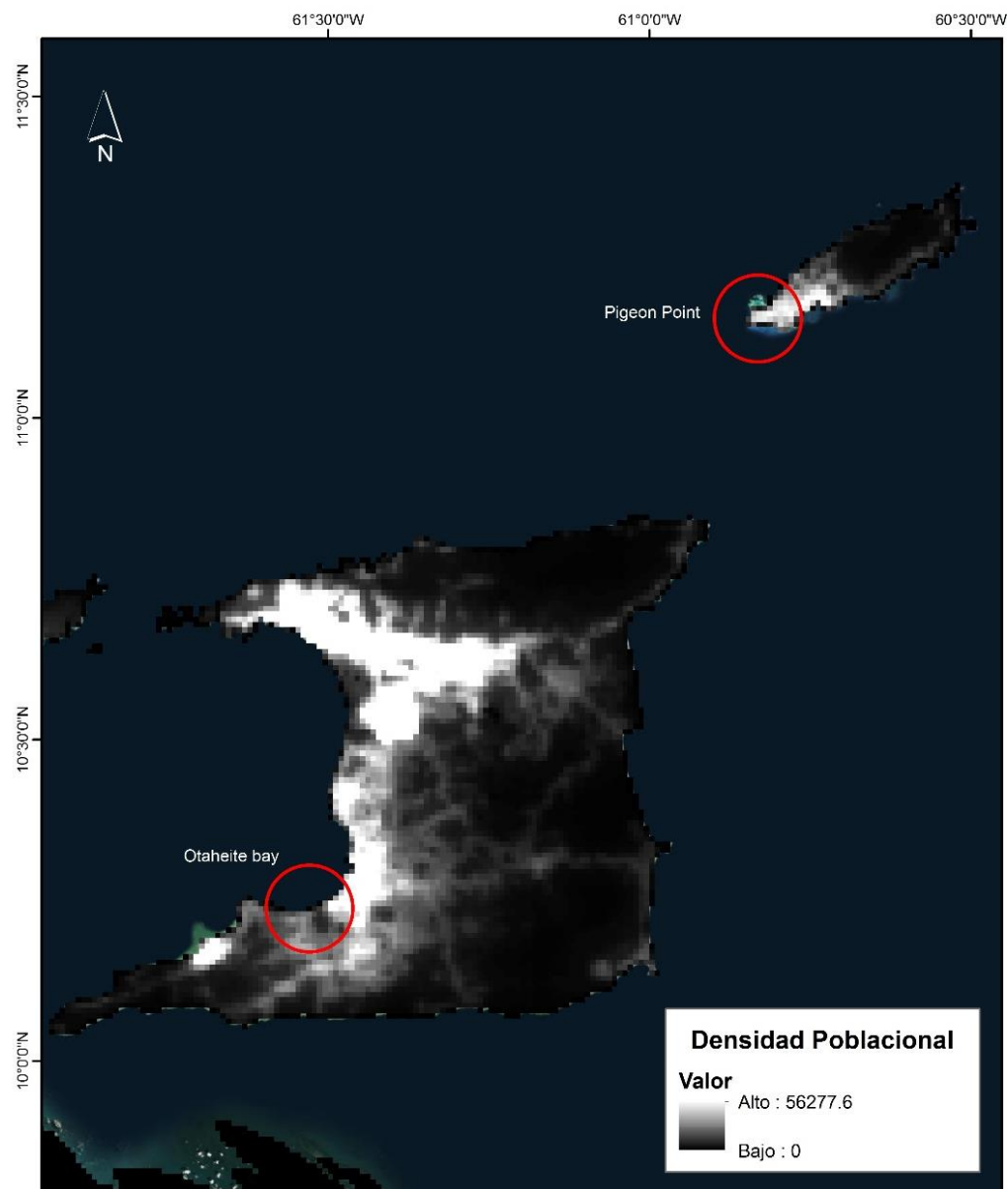


Figura 134. Densidad poblacional en Trinidad y Tobago. Se muestran en círculos rojos los sitios de interés: Otaheite bay y Pigeon Point, respectivamente

VII.4.4 Problemática y selección de alternativas: Pigeon Point, Trinidad

De acuerdo con la caracterización realizada, las condiciones identificadas en el sitio son (Figura 135):

- Degradación de los corales por descargas de aguas residuales sin tratamiento.
- Interrupción de flujos hidrosedimentarios por la presencia de la carretera.
- Playa perturbada: infraestructura (comercios) sobre la playa.



Figura 135. Condiciones actuales en Pigeon Point, Tobago (imagen satelital tomada de Google Earth, fotografías de Valeria Chávez).

Como solución se propone una alternativa híbrida: Basada en Ecosistemas, Desmantelamiento/reubicación de estructuras y Ecosistemas asistidos (Tabla 15).

Tabla 15. Alternativas seleccionadas para Pigeon Point, Tobago

Tipo de alternativa			Descripción
<div>Basada en ecosistemas</div> <div>Conservación</div> <div>Restauración</div>	+	<div>Desmantelamiento/reubicación de estructuras</div> <div>Desmantelamiento</div> <div>Reubicación</div>	<div>Ecosistemas asistidos</div> <div>Rehabilitación</div> <div>Inducción de ecosistemas</div> <div>1. Revisión del estado de los ecosistemas, principalmente corales. Actuación en función de su estado. 2. Reubicación de los locales comerciales más cercanos a la costa. 3. Evaluación de la efectividad de la creación de un arrecife de coral artificial (Ej. tipo HCLS) para reducir la energía del oleaje en la costa.</div>

VII.4.5 Problemática y selección de alternativas: Otaheite, Tobago



De acuerdo con la caracterización realizada, las condiciones identificadas en el sitio son (Figura 138):

- Tramo del camino en extremo cercano a la línea de costa, el cual se encuentra en peligro de colapso por la erosión provocada por el oleaje.

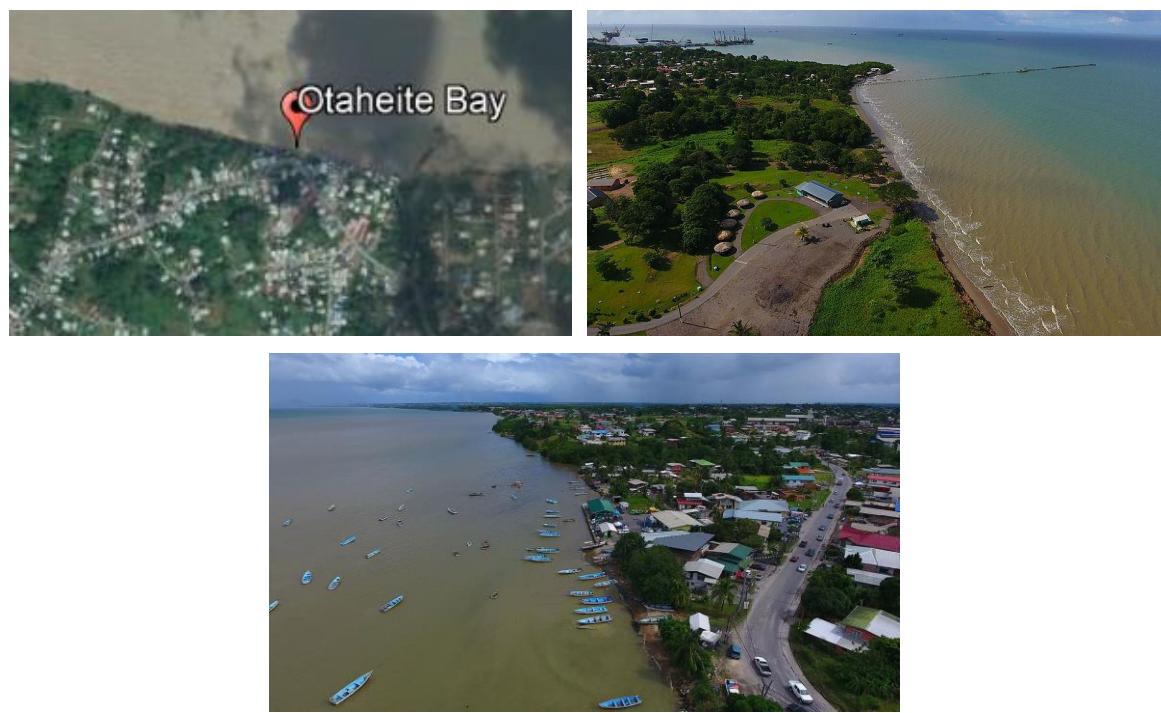


Figura 136. Condiciones actuales en Otaheite Bay, Trinidad (imagen satelital tomada de Google Earth, fotografías de Grueslayer @Wikipedia, CC BY-SA 4.0).

Como solución se propone una alternativa híbrida: Ecosistemas asistidos e Infraestructura rígida mejorada (Tabla 16).

Tabla 16. Alternativas seleccionadas para Otaheite Bay, Trinidad.

Tipo de alternativa		Descripción
<div>Ecosistemas asistidos</div> <div>+</div> <div>Infraestructura rígida mejorada</div>		
<div>Rehabilitación</div> <div>Inducción de ecosistemas</div>	<div>Diseño amigable con el ambiente</div> <div>Modificación amigable con el ambiente</div>	1. Evaluación de la efectividad de la creación de un arrecife artificial (Ej. tipo HCLS) para favorecer la formación de una saliente. Evitar la formación de un tómbolo para permitir el flujo longitudinal a la costa. 2. Contención de la erosión en la zona del tramo del camino más cercano a la costa con la construcción de infraestructura rígida mejorada (Ej. Duna acorazada con vegetación)

## VII.5 Las Bahamas

**Lugar:** Isla Andros

**Ubicación:** La Isla Andros es un archipiélago dentro de las Bahamas localizado a 48 km de Nassau, la capital del país. A pesar de que se considera una sola isla, está compuesta por cientos de islotes, los tres principales en tamaño son: North Andros, Mangrove Cay y South Andros. Si se consideran las tres islas, Andros es la sexta isla más grande del hemisferio occidental, después de Cuba, la Hispaniola, Jamaica y Puerto Rico.

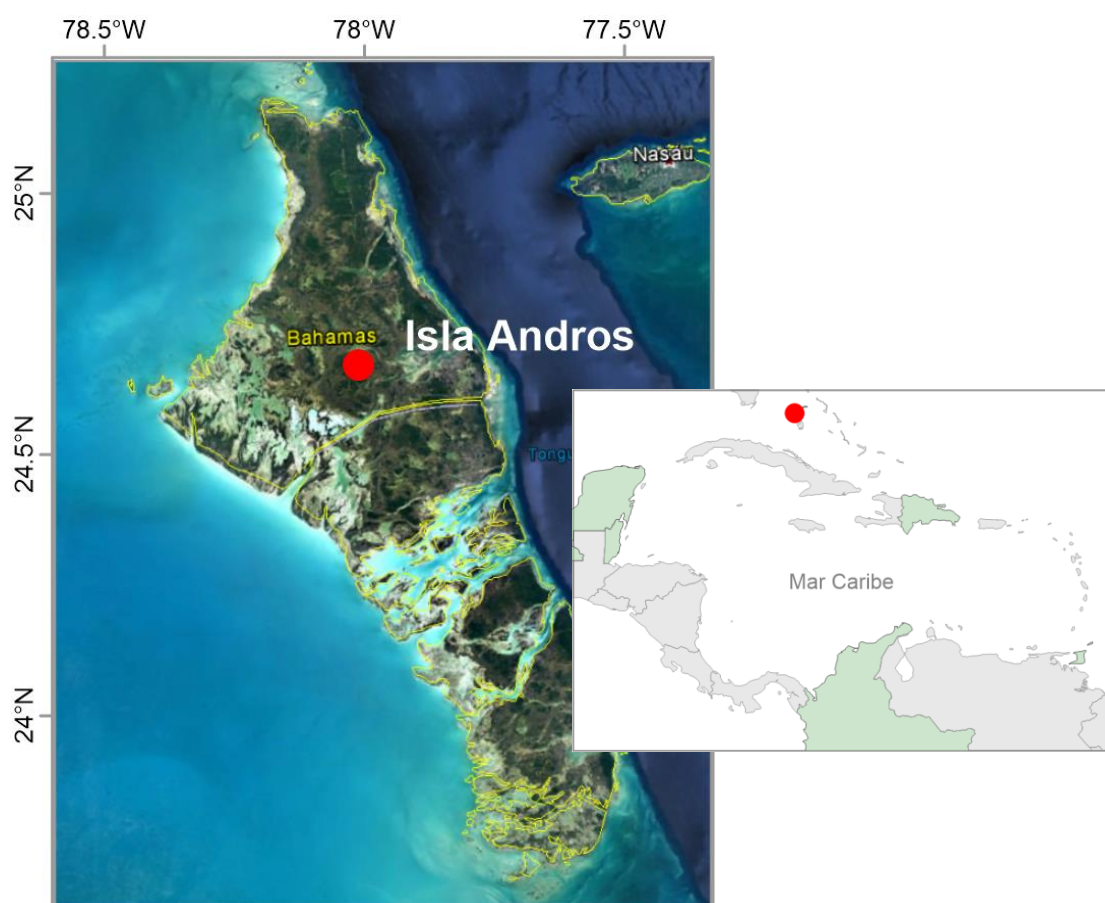


Figura 137. Localización de la Isla Andros, Bahamas (imagen modificada de Google Earth).

### VII.5.1 Caracterización física

#### Geología y geomorfología

La isla de Andros está ubicada en el margen oriental del brazo occidental del Gran Banco de las Bahamas. Paralelo al extremo este de la isla se encuentra un sistema de arrecifes, desde Joulter Cays en el norte hasta Saddleback Cays en el sur. El arrecife es continuo en muchos sitios, particularmente alrededor de la parte central y sur de Andros (Kramer et al., 2003).

En la isla pueden identificarse cuatro zonas sedimentarias (Figura 138) (Bourrouilh-Le Jan, 2007):

- Zona media-sur (Gran Banco de las Bahamas): principalmente producción biológica de carbonatos. infilled
- Zona costera submareal suroeste: zona de almacenamiento de limos
- Banda costera sur-suroeste: 50 km de ancho, zona de acumulación
- Costa norte-noroeste: zona de numerosos canales y bocas lagunares

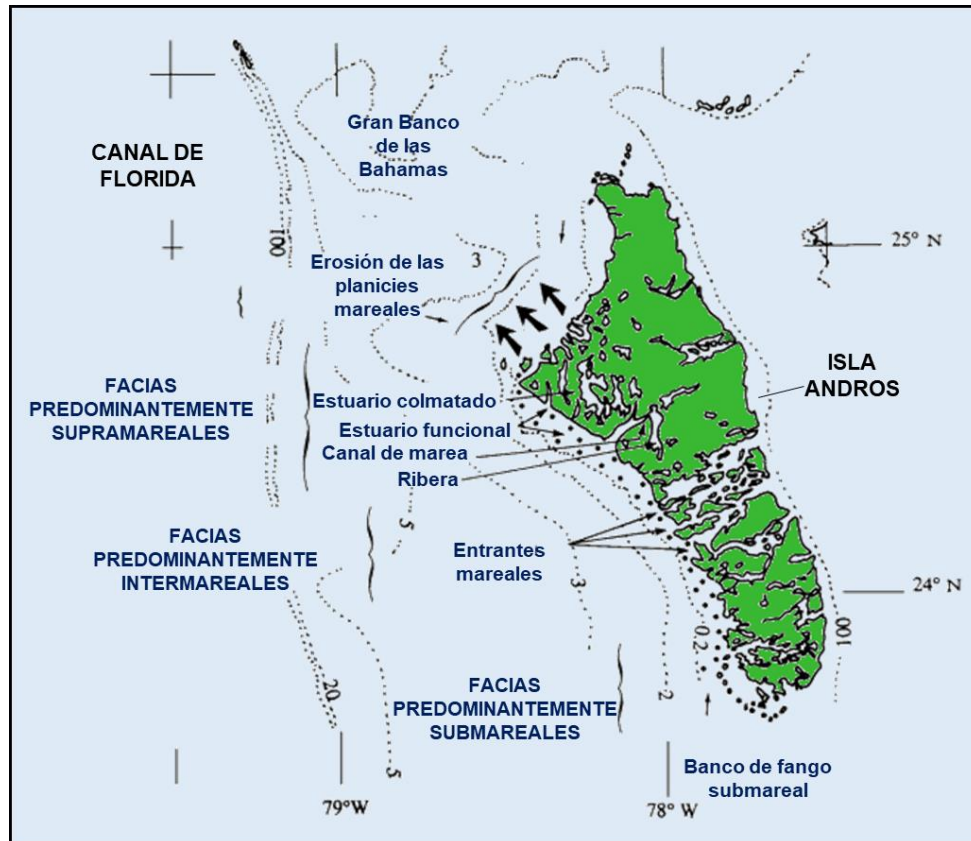


Figura 138. Sistema sedimentario de las planicies occidentales de la isla Andros (modificada de Bourrouilh-Le Jan, 2007).

## Clima marítimo

Para la caracterización del clima marítimo de la zona, se utilizaron los datos de reanálisis del modelo WAVEWATCHIII de la NOAA para la malla del Atlántico NW (NOOA, 2018), en la celda longitud 77.67°W latitud 24.50°N, la cual se ubica frente a la costa Este de la Isla Andros, a una profundidad de 20 m sobre el nivel medio del mar. Los datos incluyen valores de febrero de 2005 a septiembre de 2018. La Tabla 17 muestra algunos parámetros estadísticos calculados con estos datos, de donde se tiene que la altura de ola media es de 1.74 m y el periodo de ola medio de 5.41 s.

Tabla 17. Parámetros estadísticos del reanálisis del oleaje para la costa Este de la Isla Andros

Altura de ola (m)		Periodo (s)	
$H_{m\acute{a}x}$	2.8	$T_{m\acute{a}x}$	6.38
$\bar{H}$	0.606	$\bar{T}$	4.37
$H_{rms}$	0.723		
$H_{1/2}$	0.918	$T_{1/2}$	4.18
$H_s$	1.059	$T_s$	4.37
$H_{1/10}$	1.401	$T_{1/10}$	4.88
$H_{1/100}$	1.931	$T_{1/100}$	5.65

El resultado del análisis estadístico arroja las siguientes características:

- La dirección predominante de incidencia del oleaje es SE, presentándose en mayor porcentaje olas menores a 1.0 m de altura. Para el caso del viento, la dirección predominante es E, con velocidades menores a 10 m/s (Figura 139).
- El 50 % de probabilidad de excedencia se tiene en alturas de ola menores a 0.6 m. La velocidad del viento con más de 50 % de probabilidad de excedencia es de 7 m/s (Figura 140).
- El rango de periodos que se tienen es entre 4 y 16 s, teniendo mayor probabilidad la presencia de olas con periodos de 6 s y alturas menores a 1 m (Figura 141).

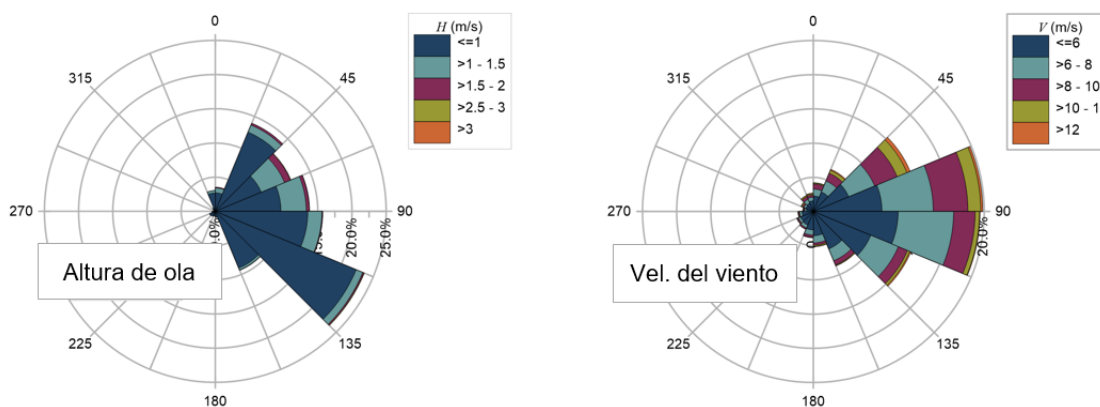


Figura 139. Rosa de oleaje (izq.) y rosa de vientos (der.) para Isla Andros - Anual

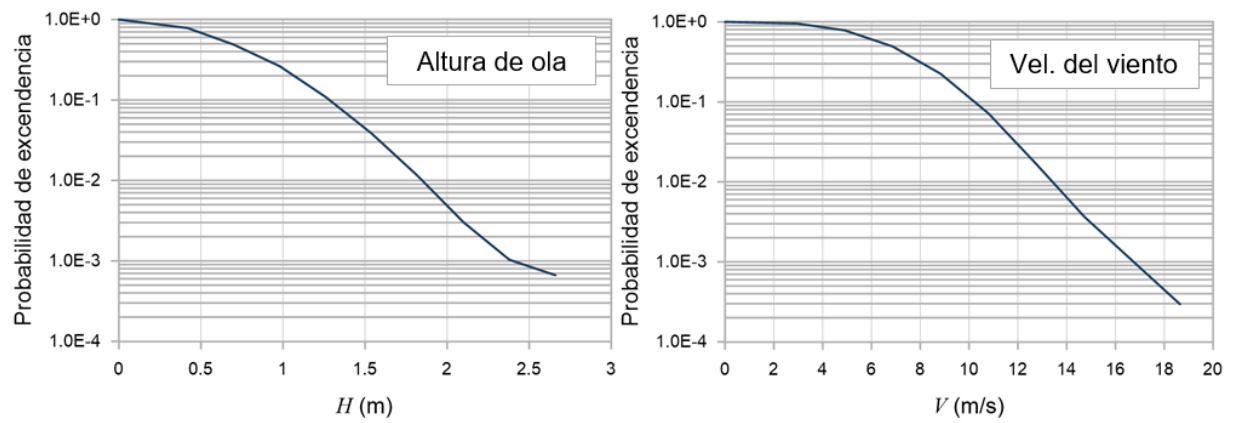


Figura 140. Probabilidad de excedencia de alturas de ola significativa (izq.) y de periodos medio de ola (der.) para Isla Andros - Anual

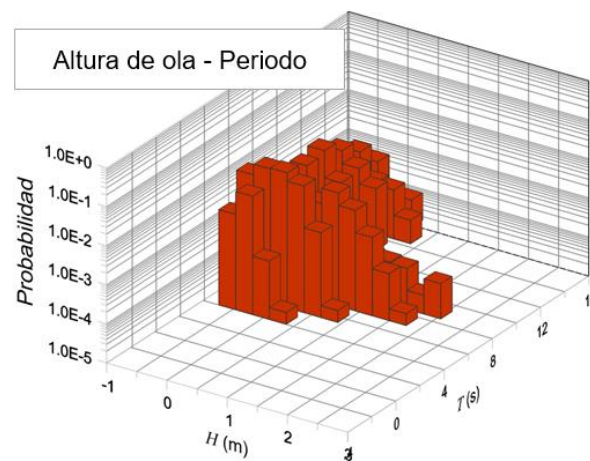


Figura 141. Probabilidad conjunta altura de ola significativa y periodo medio de ola para para Isla Andros - Anual



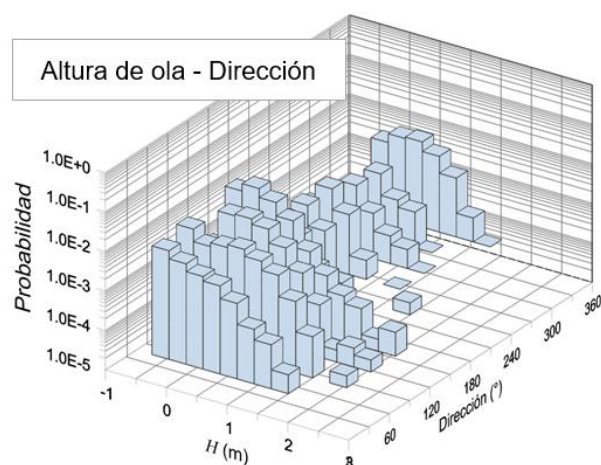


Figura 142. Probabilidad conjunta altura de ola significativa y dirección de propagación para Isla Andros - Anual

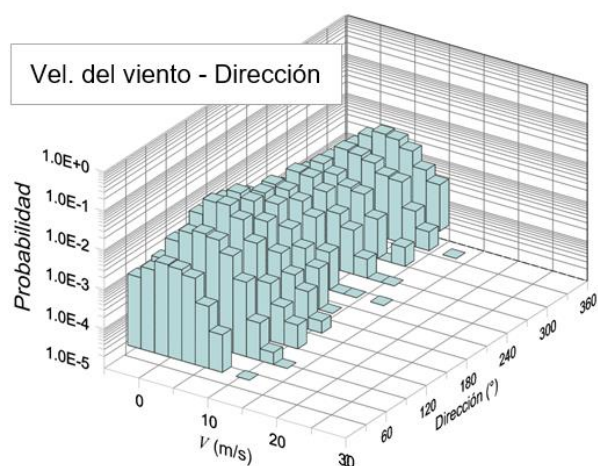


Figura 143. Probabilidad conjunta de vientos sostenidos y dirección de incidencia para Isla Andros - Anual

## VII.5.2 Caracterización ecológica

### Tipos de ecosistemas y estado de conservación

#### Humedales

Los manglares son los ecosistemas dominantes en el sitio de estudio. Entre las especies de manglar, domina el manglar rojo (*Rhizophora mangle*). Sin embargo, se pueden encontrar mangle negro (*Avicennia germinans*), mangle blanco (*Laguncularia racemosa*) y mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*). Estos manglares están siendo perturbados por fuerzas naturales (eventos extremos) como por la tala, desecación, interrupción de flujos

hidrosedimentarios, entre otros. Se estima que en las últimas dos décadas se ha perdido alrededor del 20% de los manglares del país. La implementación de estrategias de conservación y recuperación de manglares en las Bahamas son actividades de gran relevancia dada la alta dependencia de las comunidades de bienes y servicios provistos por estos ecosistemas.

A pesar de que los manglares no se encuentran protegidos por ley, distintas instancias hacen esfuerzos por lograr su conservación. Entre estas actividades destaca el involucramiento de escuelas locales en programas de reforestación.

### Playas y dunas

Las playas de Andros están experimentando tasas de erosión aceleradas. Dicha erosión ha estado asociada a eventos hidrometeorológicos extremos, el deterioro de la barrera coralina así como la interrupción de flujos hidrosedimentarios por infraestructura de protección como rompeolas, marinas y hoteles sobre dunas. En la Figura 144 se pueden observar un gran número de áreas en color rojo que representan aquellas con erosión.

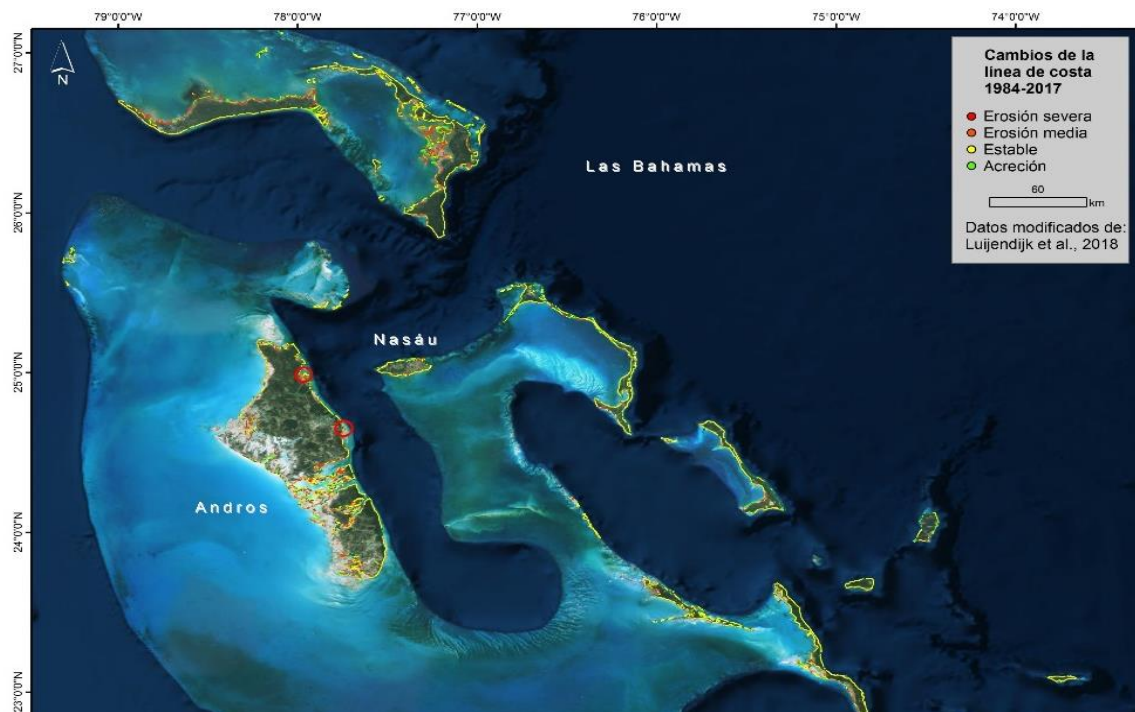


Figura 144. Estado de las playas de Bahamas, se muestra en rojo aquellas zonas con erosión (198 a 2017), en amarillo las zonas estables y en verde aquellas zonas con acreción.

### Arrecifes de coral

La barrera arrecifal de Andros mide 225 km y ocupa el sexto lugar a nivel mundial en tamaño. Se han registrado más de 200 especies de peces y corales. La barrera de Andros es reconocida por su alta biodiversidad. Los corales han experimentado eventos de degradación importantes como blanqueo y huracanes. Además, se presenta sobrepesca, turismo mal manejado, descargas de agua residuales, entre otros factores.

## Principales amenazas a los ecosistemas

Las principales amenazas están relacionadas con efectos globales como el Cambio Climático y locales como el desarrollo turístico con planeación deficiente, la sobrepesca, entre otros. Debido a la alta dependencia de las comunidades del turismo y la pesca, así como su establecimiento en zonas expuestas a eventos extremos, deben hacerse esfuerzos por recuperar manglares, playas y arrecifes.

No obstante, el país ha mostrado interés en la protección de sus ecosistemas marinos, está haciendo esfuerzos para lograr proteger el 20% de su territorio marino para el 2020 como parte de los compromisos firmados en el Caribbean Challenge Initiative (CCI).

### VII.5.3 Caracterización socioeconómica

La isla Andros cuenta con aproximadamente 8 000 habitantes. La mitad de estos habitantes se encuentran en North Andros (4 471), seguido por South Andros (1465), Mangrove Cay (892) y Central Andros (662). En North Andros, las localidades más pobladas son Nicholls town y Mastic Point (825 y 694 personas, respectivamente).

La principal actividad económica es el turismo, se estima que más de la mitad del Producto Interno Bruto (PIB) de las Bahamas depende de esta actividad. También de importancia son la pesca y la agricultura.

### VII.5.4 Problemática y selección de alternativas: Small Hope bay, Andros

De acuerdo a la caracterización realizada, las condiciones identificadas en el sitio son (Figura 145):

- Estructuras fijas sobre el primer cordón de dunas
- Disminución de la resiliencia de la playa por la fijación artificial de la duna con una especie exótica e invasora (Casuarina).
- Modificación del flujo hidrosedimentario por construcción de infraestructuras de protección y un palafito con pasarela.



Figura 145. Condiciones actuales en Small Hope bay, Andros (imagen satelital tomada de Google Earth, fotografías: Casuarina (Walter Erb), estructura (Dogs Garage)).

Como solución se propone una alternativa híbrida: Basada en Ecosistemas y Retiro/reubicación de estructuras (Tabla 18).

Tabla 18. Alternativas seleccionadas para Small Hope bay, Andros.

Tipo de alternativa		Descripción
<div>Basada en ecosistemas</div> <div>+</div> <div>Desmantelamiento/reubicación de estructuras</div>		
<div>Conservación</div> <div>Restauración</div>	<div>Desmantelamiento</div> <div>Reubicación</div>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Revisión del estado de los ecosistemas, principalmente duna frontal. Eliminación de vegetación exótica (casuarinas) y recuperación de vegetación nativa (herbáceas)</li> <li>2. Posible reorientación de las estructuras de protección</li> </ol>

## VIII. Conclusiones

La implementación de proyectos de infraestructura verde es una gran oportunidad para la mitigación del riesgo costero en el Caribe. Este tipo de proyectos están anclados en los principios del Manejo Basado en Ecosistemas por lo que ofrecen la oportunidad de mitigar el riesgo costero a través de intervenciones capaces de integrar las distintas realidades socioeconómicas y políticas de cada país mientras favorecen la recuperación del capital natural de la región. En este proyecto se incluye una amplia gama de tipos de infraestructura verde que abarcan desde la restauración de un sitio hasta el desmantelamiento y/o reubicación de estructuras. Además, se propone un proceso que permite la elección del tipo adecuado de actuación. Dicha selección depende del nivel de urgencia, tiempo, espacio y recursos disponibles. De esta manera, la elección del tipo de infraestructura verde está estrechamente relacionada con las necesidades, estado de degradación y disponibilidad de recursos (sedimento, vegetación, mano de obra) del sitio de interés.

La disponibilidad de tiempo es un elemento clave de decisión y hace referencia al nivel de urgencia de una intervención. De esa manera, el proceso de evaluación de la viabilidad del uso de infraestructura verde reconoce que en casos donde existan vidas en riesgo debe implementarse una actuación inmediata que permita controlar la emergencia. No obstante, se recomienda ampliamente que dicha intervención sea fácilmente removible para poder ser sustituida o integrada paulatinamente por una infraestructura verde cuando las circunstancias lo permitan.

El espacio disponible en el sitio a intervenir es otro factor determinante para la selección de infraestructura verde. En casos donde el espacio es una limitante, se propone evaluar la posibilidad de obtenerlo hacia tierra o hacia mar. El espacio hacia tierra puede ser generado, por ejemplo, reubicando infraestructura que esté obstruyendo la dinámica natural del sitio.

La disponibilidad de recursos locales como el sedimento, la vegetación nativa y la mano de obra están relacionados con la factibilidad de implementar una alternativa verde, así como con la capacidad de generar beneficios ecológicos (Ej. recuperando conectividad entre ecosistemas) y socioeconómicos (Ej. empleos locales). Además, la existencia de estos recursos disminuye el costo de la implementación.

El diagnóstico y el monitoreo del sitio son de vital importancia para el éxito de un proyecto de infraestructura verde. Estas actividades permiten la evaluación de la urgencia de la intervención, la selección de alternativas adecuadas, así como su adaptación en caso necesario. Además, están estrechamente relacionadas con la capacidad para identificar y controlar los factores de estrés que han llevado a la degradación del sitio. La incapacidad de eliminar o controlar los factores de degradación, podrían comprometer el éxito de la infraestructura implementada.

A largo plazo, la infraestructura verde necesita menos inversión que la infraestructura tradicional porque tiende a ser auto-sustentable. Además, proporciona beneficios adicionales como la recuperación del funcionamiento de los ecosistemas naturales. Propicia la comunicación intersectorial e interdisciplinaria, la cual es la base para un manejo costero



integral. La implementación de proyectos de infraestructura verde costera en el Caribe debe afrontar grandes retos como la generación de capacidades técnicas locales, búsqueda de recursos económicos, así como el establecimiento de puentes de comunicación intersectoriales que permitan asegurar el éxito de los proyectos. Si bien este es un reto mayúsculo, los casos aquí expuestos demuestran la viabilidad y oportunidad que representan este tipo de proyectos para la región.

## IX. Referencias

Agardy, T., Alder, J., Dayton, P., Curran, S., Kitchingman, A., Wilson, M., Catenazzi, A., Restrepo, J., Birkeland, C., Blaber, S. Saifullah, S., Branch, G., Boersma, D., Nixon, S., Dugan, P., Davidson, N., & Vorosmarty C., (2010). Coastal Systems. En: Hassan, R.M., Scholes, R., Ash, N. (Eds.), *Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends*, vol. 1, Island Press, Washington, DC pp. 513–549T.

Aguilar, V., Kolb, M., Hernández, D., Urquiza, T., & Koleff, P. (2008). Prioridades de conservación de la biodiversidad marina de México. *CONABIO. Biodiversitas*, 79, 1-15.

Antón, D. (2016). Diseño y puesta en funcionamiento de un humedal artificial a escala de laboratorio para el tratamiento de aguas contaminadas. Facultad De Ciencias Experimentales. Universidad Miguel Hernández De Elche. Tesis de licenciatura.

Aronson, J., Blatt, C., & Aronson, T. (2016). Restoring ecosystem health to improve human health and well-being: physicians and restoration ecologists unite in a common cause. *Ecology and Society*, 21(4).

Baldera, A., Hanson, D. A., & Kraft, B. (2018). Selecting indicators to monitor outcomes across projects and multiple restoration programs in the Gulf of Mexico. *Ecological indicators*, 89, 559-571.

Barragán, J.M. (2014). Política, gestión y litoral. Una nueva visión de la Gestión Integrada de Áreas Litorales, 978-8473605182., Madrid, UNESCO, Tébar, 685p.

Bartholomew, D.J., Steele, F., Galbraith, J., & Moustaki, I. (2008). Analysis of multivariate social science data. Chapman and Hall/CRC.

Bell, J., & Lovelock, C. E. (2013). Insuring mangrove forests for their role in mitigating coastal erosion and storm-surge: an Australian case study. *Wetlands*, 33(2), 279-289.

Bernal, G. (1996). Caracterización geomorfológica de la Llanura Deltaica del Río Magdalena, con énfasis en el sistema lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *Bol. Invest. Mar. Cost*, 25, 19-48.

Bernal, G. & Betancur, J. (1994). El sistema lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta en el contexto deltaico del río Magdalena, Colombia. *Mem. IX Congr. Nal. Ciencias Tecnol. Mar*, CCO, Bogotá.

Bolongaro, A. (2014). Sección IV Vulnerabilidad del destino turístico Riviera Maya. Estudio de la vulnerabilidad y programa de adaptación ante la variabilidad climática y el cambio climático en diez destinos turísticos estratégicos, así como propuesta de un sistema de alerta temprana a eventos hidrometeorológicos extremos. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-Secretaría de Turismo. Cuernavaca, Morelos, México.

Bourrouilh-Le Jan, F. G. (2007). Very high energy sedimentation (supratidal hurricane deposits) and Mid-Holocene highstand on carbonate platforms, Andros, Bahamas: An alternative view. *Sedimentary Geology*, 199(1-2), 29-49.

Capobianco, M., & Stive, M.J. (2000). Soft intervention technology as a tool for integrated coastal zone management. *Journal of Coastal Conservation*, 6(1), 33-40.

Caraballo-Cobas, E. (2018). La Educación Ambiental en el uso de los recursos por las comunidades desde la perspectiva del Manejo Integrado de Zonas Costeras. *Revista electrónica Santiago*, 111, 101-114.

Carrero de Blanco, A., & García Tovar, M. (2008). Impacto de un programa Educativo Ambiental aplicado para promover la participación ciudadana en la Zona Costera del Estado Miranda. *Revista de investigación*, 32(64), 103-134.

Castillo, S.A., & Moreno-Casasola, P. (1996). Coastal sand dune vegetation: an extreme case of species invasion. *Journal of Coastal Conservation*, 2(1), 13-22.

Colls, A., Colls, A., Ash, N., & Ikkala, N. (2009). *Ecosystem-based Adaptation: a natural response to climate change* (Vol. 21). Gland: Switzerland: IUCN. 16pp.

Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., Van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., Farber, S., & Turner, R. K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global environmental change*, 26, 152-158.

Davies, C., & Laforteza, R. (2017). Urban green infrastructure in Europe: Is greenspace planning and policy compliant?. *Land use policy*, 69, 93-101.

De Andrés, de Andrés, M., & Barragán, J. M. (2016). Desarrollo Urbano en el Litoral a Escala Mundial. Método de Estudio para su Cuantificación. *Revista de Estudios Andaluces*, 33, 64-83.

Domínguez A. (2017). Manglares: el impacto humano y sus consecuencias. México sostenible. <https://ecoosfera.com/2017/07/manglares-el-impacto-humano-y-sus-consecuencias/>

Durán R. & M. Méndez (Eds). 2010. Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán. CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. 496 pp.

Escalona, I., Franco, P., Cortéz, B., Ruiz, M., Polumbo, J., & López, C. (2009). La reforestación de los manglares en la costa de Oaxaca. México, Comisión Nacional Forestal.

Flores-Balbuena, P.A. (2016). Evaluación de la opresión costera en la costa de Veracruz, México. Instituto de Ecología (INECOL), México: Tesis de Maestría.

Gómez, J. F., Byrne, M. L., Hamilton, J., & Isla, F. (2017). Historical coastal evolution and dune vegetation in Isla Salamanca national park, Colombia. *Journal of Coastal Research*, 33(3), 632-641.

García-Hoyos, L.M., Franco-Herrera, A., Ramírez-Barón, J.S., & López-Cerón, D.L. (2010). Dinámica océano-atmósfera y su influencia en la biomasa fitoplanctónica, en la zona costera del departamento del Magdalena, Caribe colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost*, 39(2), 307-335.

Gómez-Pina, G., Fages-Antiñolo, L., Román-Sierra, J., Navarro-Pons, M., Gimenez-Cuenca, M., Ruiz, J. A., & Muñoz-Perez, J.J. (2007, January). An example of Integrated Coastal Management in Punta Candor (Co. Rota, Spain). ICCD.

Grafals-Soto, R. (2010). Understanding the effects of sand fence usage and the resulting landscape, landforms and vegetation patterns: a New Jersey example (Doctoral dissertation, Rutgers University-Graduate School-New Brunswick).

Grafals-Soto, R., & Nordstrom, K. (2009). Sand fences in the coastal zone: intended and unintended effects. *Environmental Management*, 44(3), 420-429.

Henry, E. B. (1990). *Climate Variability and Climate Change - the Role of Small Island State, Trinidad and Tobago*. Trinidad and Tobago Climate Meteorological Division (p. 20). Ministry of Planning and Development, GORTT

Hesp, P.A. (2008). Transverse dune trailing ridges and vegetation succession. *Geomorphology*, 99(1-4), 205-213.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC] (2007) El cambio climático en México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Disponible en:

<http://cambioclimatico.inecc.gob.mx/comprendercc/qpodemoshacerparamitigar/comoindividuos.html>

Kneebone, S., Smith, L., & Fielding, K. (2017). The Impact-Likelihood Matrix: A policy tool for behaviour prioritisation. *Environmental Science & Policy*, 70, 9-20.

Knöchelmann, N. (2018). Experimental investigations on erosion and wave damping at reinforced dunes. Tesis de Maestría, Universidad Técnica de Braunschweig. Alemania.

Kramer, P. A., Kramer, P. R., & Ginsburg, R. N. (2003). Bahamas. Assessment of the Andros Island Reef System, Bahamas (Part 1: Stony Corals and Algae).

Landgrave, R., & Moreno-Casasola, P. (2012). Evaluación cuantitativa de la pérdida de humedales en México. *Investigación ambiental Ciencia y política pública*, 4(1).

Lara-Lara, J.R., Arreola-Lizárraga, J. A., Calderón-Aguilera, L.E., Camacho-Ibar, V.F., De la Lanza-Espino, G., Escofet-Giansone, A., Espejel-Carbajal, I., Guzmán-Arroyo, M., Landah, L.B., López-Hernández, M. & Meling-López, E.A. (2008). Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. *Capital natural de México*, 1, 109-134.

Ley, C., Gallego Fernández, J.B. & Vidal, C. (2007). *Manual de restauración de dunas costeras*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 251 pp.

Lirman, D., & Schopmeyer, S. (2016). Ecological solutions to reef degradation: optimizing coral reef restoration in the Caribbean and Western Atlantic. *PeerJ*, 4, e2597.

Lithgow, D., Martínez, M. L., Gallego-Fernández, J. B., Hesp, P. A., Flores, P., Gachuz, S., Rodríguez-Revelo, N., Jiménez-Orocio, O., Mendoza-González, G. & Álvarez-Molina, L. L. (2013). Linking restoration ecology with coastal dune restoration. *Geomorphology*, 199, 214-224.

López, F., Sánchez, L.E., Moreno-Casasola, P. & López, H. (2009). Diseño de restauración ecológica y servicios ambientales. En: Moreno-Casasola, P. & B. Warner (Eds.) *Breviario para describir, observar y manejar humedales*. Serie Costa Sustentable no 1. Instituto de Ecología A.C., Xalapa, Ver. México.

Luque, A., Hueso González, P., & Martínez-Murillo, J.F. (2018). *Gobernanza y planificación de la infraestructura verde en España*. Universidad de Málaga, España.

Marín, J.L. & Hernández, M.E. (2013). Los humedales y su papel en el almacenamiento de carbono atmosférico. Instituto de Ecología.

Martínez, J.O. & Molina, L.H. (1992). Geomorfología y aspectos erosivos del litoral Caribe colombiano, sector Bocas de Ceniza - Parque Tayrona. Inf. Proy, Ingeominas, Bogotá.

Martínez, M.L., Intralawan, A., Vázquez, G., Pérez-Maqueo, O., Sutton, P., & Landgrave, R. (2007). The coasts of our world: Ecological, economic and social importance. *Ecological Economics*, 63(2), 254-272.

Martínez, M.L. (Ed.). (2014). Diagnóstico de las dunas costeras de México. Comisión Nacional Forestal.

Mendoza, A.D., & Ramos, C.G. (2012). Diseño y construcción a escala piloto de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales porcícolas. Apaxtla de Castrejón, Guerrero. UNAM. Tesis de Licenciatura.

Millenium Ecosystem Assessment (MEA) (2005). Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and water. Synthesis. UNEP-UN, 68 p.

Miththapala, S. (2008). Mangroves. Coastal Ecosystems Series, 2. Ecosystems and Livelihoods Group Asia, IUCN. 1-28.

Mitsch, W.J., & J.G. Gosselink. (2000). Wetlands. John Wiley y Sons Inc. Nueva York. 920p.

Mittermeier, R.A., Myers, N., Thomsen, J.B., Da Fonseca, G.A., & Olivieri, S. (1998). Biodiversity hotspots and major tropical wilderness areas: approaches to setting conservation priorities. *Conservation biology*, 12(3), 516-520.

Moreno-Casasola, P. (2009). Propuesta de extrapolación de una experiencia de restauración de humedales. Restauración experimental de un popal invadido por el zacate alemán (*Echinochloa pyramidalis*, POACEAE) en el sitio Ramsar No. 1336 La Mancha y El Llano. CONABIO-INECOL.

Moreno-Casasola, P. (2010). La educación ambiental como un instrumento hacia la creación de un desarrollo costero sustentable. En: Castillo, A. & González-Gaudio, E. (Eds.). Educación ambiental y manejo de ecosistemas en México. SEMARNAT, 265p.

Múner, J.C., Vélez, J., Poveda, G., Posada J.J., Montoya J.D., & Coadrona, Y.M. (2003). Dinámica hidrológica de la Ciénaga Grande de Santa Marta. *Avances en Recursos Hidraulicos* (10). pp. 47-62. ISSN 0121-5701

NOAA (2018). NWW3 Product Viewer. Recuperado en 2018 de: [http://polar.ncep.noaa.gov/waves/viewer.shtml?multi\\_1-NW\\_atlantic-](http://polar.ncep.noaa.gov/waves/viewer.shtml?multi_1-NW_atlantic-)

Nordstrom, K. F. (2003). Beaches and dunes of developed coasts. Cambridge University Press, Cambridge, 338 p.

ONU, México. Las personas y los océanos. Hoja informativa. 2017. Disponible en: <http://www.onu.org.mx/las-personas-y-los-oceanos/>

Ortiz, A. (2005). Los arrecifes de coral. Programa de Colegios Sea Grant de la Universidad de Puerto Rico. ISBM- 1-881719-06-5

Ortiz, L.D., Arceo Briseño, P., Granados Barba, A., Salas Moreal, D., y Jiménez Badillo, M. D. L. (2010). Zona costera. Patrimonio Natural, Universidad Veracruzana, 146p.



Perrow, M. R., & Davy, A. J. (Eds.). (2002). *Handbook of ecological restoration* (Vol. 2). Cambridge University Press.

PNUMA: Annual Report Empowering People to Protect the Planet. 2016. Disponible en: <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/12/UN-Environment-2016-Annual-Report.pdf>

Quiroz, D. (2018). Implementación de infraestructura verde como estrategia para la mitigación y adaptación al cambio climático en ciudades mexicanas, hoja de ruta. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU). Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 65p.

Ranwell, D.S. y Board, R. (1986). Coast dune management guide. Institute of Terrestrial Ecology, Londres, UK, 105p.

Rodríguez, J., & Reul, A. (2011), Biodiversidad y servicios de los ecosistemas marinos. Uciencia, 5, 1-4.

Rojas, J., & Vidal, R. (2008). Catálogo tipológico de humedales lacustres y costeros del estado de Chiapas. Pronatura Chiapas A.C., CONAGUA, SEMARNAT

Rosselli, L., van der Hammen, T., Stiles, F., Chisacá, L., Camargo, G., Guillot-Monroy, G. & Useche, Y. y Rivera, D. (2008). Protocolo de recuperación y rehabilitación ecológica de humedales en centros urbanos. Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, 126-170pp.

Roy R Robin Lewis III & Ben Brown, (2014). Rehabilitación ecológica del manglar. Manual de Campo para rehabilitadores. Primera edición. Disponible en: [www.mangroverestoration.com](http://www.mangroverestoration.com).

Ruckelshaus, M.H., Guannel, G., Arkema, K., Verutes, G., Griffin, R., Guerry, A., Silver, J., Faries, J., Brenner, J. y Rosenthal, A. (2016). Evaluating the benefits of green infrastructure for coastal areas: location, location, location. Coastal Management, 44(5), 504-516.

Ruiz, G., Mendoza, E., Silva, R., Posada, G., & Mariño, I. (2010). La geomorfología como herramienta para el análisis de las formaciones costeras y sus alteraciones de largo plazo. Aplicación a la Península de Yucatán. CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO, 125.

Ruiz-Martínez, G., Silva-Casarín, R., & Posada-Vanegas, G. (2013). Comparación morfodinámica de la costa noroeste del estado de Quintana Roo, México. Tecnología y ciencias del agua, 4(3), 47-65.

Rustagi, J. S. (2014). Optimization techniques in statistics. Elsevier.

Schoonees, T., Mancheño, A. G., Scheres, B., Bouma, T. J., Silva, R., Schlurmann, T., & Schüttrumpf, H. (2019). Hard Structures for Coastal Protection, Towards Greener Designs. Estuaries and Coasts, 1-21.

Sealey, N. E. (2011). Casuarina-induced beach erosion revisited. In Proceedings of the 13th Symposium on the Natural History of The Bahamas. San Salvador (pp. 52-58).

Silva, R., & Mendoza, E. (2015). Capítulo A.2.17 Obras Marítimas: Tomo I al Tomo V, Sección A: Hidrotecnia, Tema 2: Hidráulica. Manual de Diseño de Obras Civiles. Comisión Federal de Electricidad. México

Silva, R., Martínez, M. L., Odériz, I., Mendoza, E., & Feagin, R. A. (2016a). The reduction of dune face erosion by vegetation. *Coastal Engineering*, 109, 53-62.

Silva, R., Mendoza, E., Mariño-Tapia, I., Martínez, M. L., & Escalante, E. (2016b). An artificial reef improves coastal protection and provides a base for coral recovery. *Journal of Coastal Research*, 75(sp1), 467-471.

Silva, R., Chávez, V., Bouma, T., van Tussenborek, B.I., Arkema, K.K., Martínez, M.L.; Oumeraci, O., Heymans, J.J., Osorio, A.F., Mendoza, E., Mancuso, M., Asmus, M. & Pereira, P. (2019). The incorporation of biophysical and social components in coastal management. *Estuaries and Coasts*, IN PRESS.

Silva, R., Lithgow, D., Esteves, L. S., Martínez, M. L., Moreno-Casasola, P., Martell, R., Pereira, P., Mendoza, E., Campos-Cascaredo, A., Winckler, P. & Osorio, A. (2017). Coastal risk mitigation by green infrastructure in Latin America. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Maritime Engineering* (Vol. 170, No. 2, pp. 39-54). Bournemouth University, Fern Barrow, Poole, Dorset, BH12 5BB, UK.

Silva, R., Martínez, M.L., Moreno-Casasola, P., Mendoza, E., López-Portillo, J. Lithgow, D., Vazquez, G. y Martínez, R., & Ibarra, R. (2018). Aspectos Generales de la Zona Costera. INECOL.

Society of Ecological Restoration (SER) (2004). Principios de SER Internacional sobre restauración ecológica. Disponible en:  
[www.ser.org/content/guidelines\\_ecological\\_restoration.asp](http://www.ser.org/content/guidelines_ecological_restoration.asp)

Spalding, M., Spalding, M. D., Ravilious, C., & Green, E. P. (2001). *World atlas of coral reefs*. Univ of California Press.

UNEP-WCMC (2011). *Servicios de los ecosistemas Marinos y costeros: Métodos de evaluación y sus aplicaciones*. UNEP-WCMC Series de Biodiversidad, 33, 46p.

van der Nat A, Vellinga P, Leemans R., & van Slobbe E (2016) Ranking coastal flood protection designs from engineered to nature-based. *Ecological Engineering* 87: 80–90.

van Katwijk, M. M., Bos, A. R., De Jonge, V. N., Hanssen, L. S. A. M., Hermus, D. C. R., & De Jong, D. J. (2009). Guidelines for seagrass restoration: importance of habitat selection and donor population, spreading of risks, and ecosystem engineering effects. *Marine pollution bulletin*, 58(2), 179-188.

Walker B, Carpenter S, Anderies J, Abel N, Cumming G, Janssen M, Lebel L, Norberg J, Peterson GD, & Pritchard R. (2002). Resilience management in social-ecological systems: a working hypothesis for a participatory approach. *Conservation ecology*, 6(1).

## Sitios web

<https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/praderasPastos.html>

<https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/arrecifes.html>

<https://www.gob.mx/semarnat/articulos/humedales-donde-la-vida-es-prodiga>

<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/467/sanchez.html>

[https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/manglares2013/pdf/Manglares\\_de\\_Mexico\\_Extension\\_y\\_distribucion.pdf](https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/manglares2013/pdf/Manglares_de_Mexico_Extension_y_distribucion.pdf)

<https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/2013-06-05-10-34-10/17-ciencia-hoy/417-manglares-humedales-costeros-que-no-hay-que-olvidar>

<https://www.epa.gov/wetlands>

<https://www.epa.gov/wetlands/constructed-wetlands>

<https://www.ramsar.org/es/acerca-de/la-importancia-de-los-humedales>

CONABIO 2012 <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/arrecifes.html>

SEMARNAT 2017 <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-humedales-inh>