

SEMARNAT

SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES



MANEJO DE ECOSISTEMAS DE DUNAS COSTERAS, CRITERIOS ECOLÓGICOS Y ESTRATEGIAS

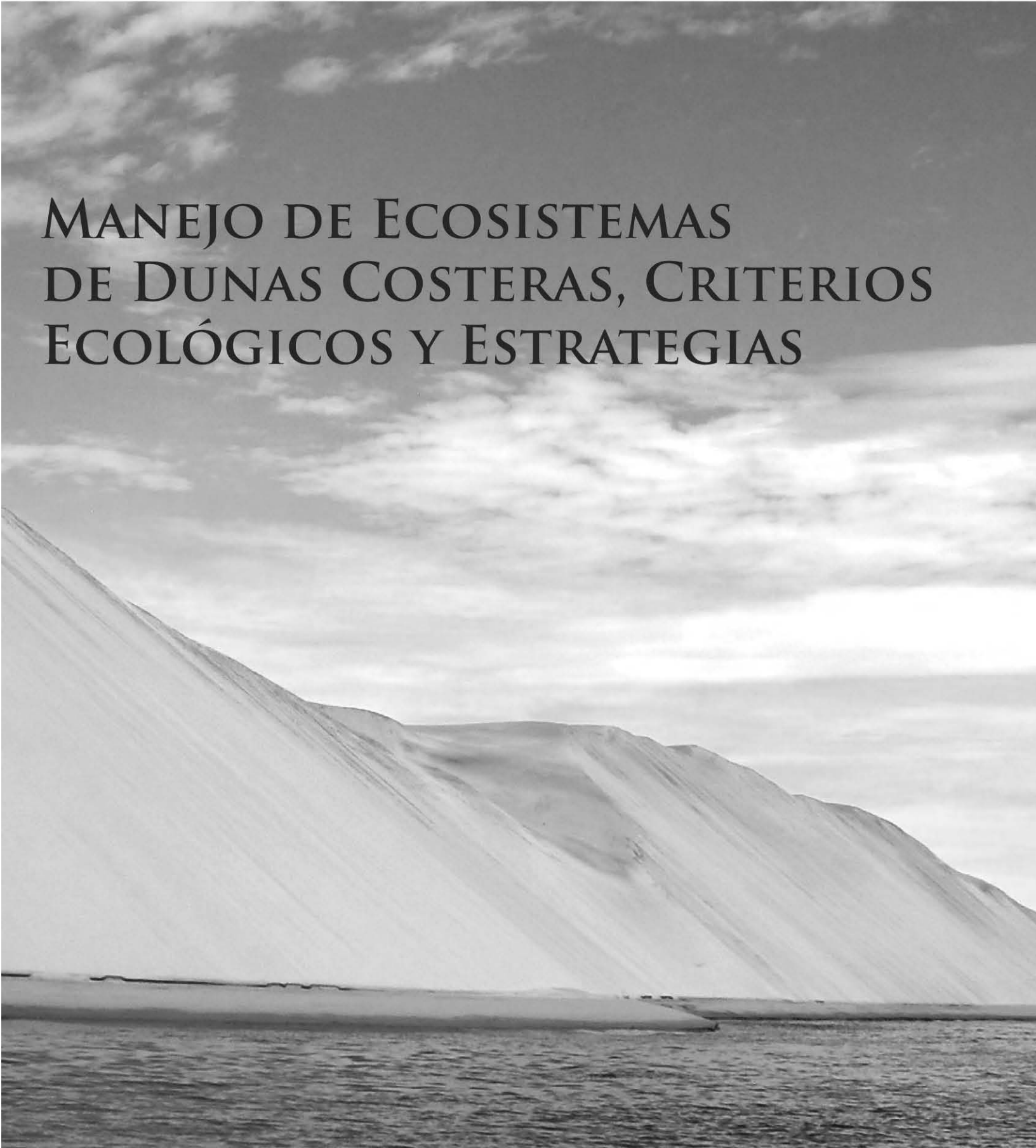


SEMARNAT

SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES



MANEJO DE ECOSISTEMAS DE DUNAS COSTERAS, CRITERIOS ECOLÓGICOS Y ESTRATEGIAS



Manejo de Ecosistemas de Dunas Costeras, Criterios Ecológicos y Estrategias

D.R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Blvd. Adolfo Ruiz Cortines 4209, Col. Jardines en la Montaña
C.P. 14210, Delegación Tlalpan, México, D. F.

Dirección de Política Ambiental e Integración Regional y Sectorial

Primera edición 2013

ISBN: 978-607-8246-59-5

Impreso en México

www.semarnat.gob.mx

CONTENIDO

PREFACIO	7
1. INTRODUCCIÓN	9
2. CARACTERIZACIÓN DE LAS DUNAS COSTERAS	13
2.1. FORMACIÓN	14
2.2. ESTRUCTURA DE LAS DUNAS COSTERAS	17
2.3. FLORA Y FAUNA DE DUNAS COSTERAS	22
2.4. SERVICIOS AMBIENTALES	25
2.5. AMENAZAS	26
2.5.1. CONSTRUCCIÓN EN DUNAS COSTERAS	27
2.5.2. EXTRACCIÓN DE MATERIALES	31
2.5.3. ACTIVIDADES RECREATIVAS	31
2.5.4. AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR	32
2.5.5. EFECTOS A DISTANCIA	34

3. MANEJO DE LAS DUNAS COSTERAS	35
3.1. ZONIFICACIÓN	36
3.2. RESTAURACIÓN	38
3.2.1. ESTABILIZACIÓN DE DUNAS	38
3.2.2. RECONSTRUCCIÓN DE DUNAS	39
3.2.3. RESTABLECIMIENTO DE CUBIERTA VEGETAL	40
3.2.4. RELLENO DEL SISTEMA PLAYA-DUNAS COSTERAS	41
3.2.5. CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN	44
3.3. REGULACIÓN DE OBRAS Y ACTIVIDADES	44
3.3.1. CRITERIOS ECOLÓGICOS	44
3.3.2. ESTRATEGIAS A IMPLEMENTAR POR EL GOBIERNO	58
3.3.3. CONSIDERACIONES PARA SU APLICACIÓN	61
4. GLOSARIO	65

5. ANEXO GRÁFICO	69
5.1. ECOSISTEMAS DE DUNAS COSTERAS CARACTERÍSTICOS DEL LITORAL MEXICANO	69
5.1.1. PACÍFICO NORTE	69
5.1.2. PACÍFICO SUR	74
5.1.3. MAR CARIBE	77
5.1.4. GOLFO DE MÉXICO	77
5.2. EJEMPLOS DE INCREMENTO DE CONSTRUCCIONES EN LA ZONA DE DUNAS	79
5.2.1. CANCÚN, QUINTANA ROO	79
5.2.2. BARRA DE NAVIDAD, JALISCO	81
5.2.3. PUERTO MARQUÉS, ACAPULCO	83
5.2.4. OTROS EJEMPLOS	83
6. LITERATURA RECOMENDADA PARA PROFUNDIZAR EN TEMAS TÉCNICOS	89
REFERENCIAS	91

PREFACIO

Los sistemas de dunas costeras proveen bienes y servicios ecosistémicos, como son la protección a eventos extremos, reservas sedimentarias, recreativos y hábitat de especies endémicas o en alguna categoría de riesgo. Estos sistemas resultan del balance sedimentario que obedece a una serie de procesos biofísicos complejos. El desarrollo no ordenado de obras y actividades altera estos procesos y conduce a menudo a la pérdida de dichos bienes y servicios ecosistémicos. El caso del huracán *Wilma* en 2005 es paradigmático. Sus efectos fueron devastadores en los lugares donde las dunas costeras habían desaparecido a causa de la construcción de infraestructura hotelera. Las consecuencias fueron la pérdida de las playas y la necesidad de substituir la aportación natural de arena por medios artificiales y con altos costos económicos. Otros efectos son igualmente importantes y quizá más difíciles de cuantificar en términos económicos, aunque con evidentes impactos sociales y ecológicos.

En este documento se hace una compilación de los elementos técnicos y científicos más relevantes que sustentan la regulación de obras y actividades en dunas costeras. Asimismo, recoge la experiencia y el conocimiento de un grupo de expertos y funcionarios públicos en ecología, ingeniería, procesos costeros y política de sistemas costeros.

La intención es identificar y organizar las buenas prácticas que deben seguir las obras y actividades que se pretendan realizar en sistemas de dunas costeras y evitar daños ambientales de difícil y costosa reparación. De esta forma, esta publicación constituye una herramienta útil dirigida, en primer término, a funcionarios de los tres órdenes de gobierno que tengan bajo su responsabilidad la custodia de estos importantes ecosistemas. De igual manera, sirve a los consultores ambientales y los miembros de la sociedad civil en cuanto que provee un conjunto de elementos fundamentales para orientar sus actividades en las dunas costeras.

Para ello, se presenta una propuesta de criterios y estrategias para la regulación de las obras y actividades que se desarrollan en las dunas costeras en cuatro capítulos. En el capítulo introductorio se expone la importancia de las dunas costeras y el alcance del documento. En el capítulo de caracterización, se explica la formación y la estructura de las dunas costeras, así como la flora y la fauna que forma parte de este ecosistema. También se describen los servicios ambientales que proveen y las amenazas a las que están sujetas. Esta caracterización se complementa con un anexo fotográfico que muestra ejemplos de dunas costeras representativas del litoral mexicano, así como los

daños derivados de su eliminación. En el tercer capítulo se exponen las principales acciones de conservación y restauración de dunas costeras aplicables al país. En el capítulo final, se presenta el conjunto de criterios y estrategias para regular las obras y actividades que se desarrollan en estos ecosistemas.

Dirigimos nuestros esfuerzos a representar la heterogeneidad geográfica de México. La generalidad de las descripciones y las recomendaciones pueden ser discutibles para resolver problemas particulares y locales. Los vacíos de información y conocimiento los subsanamos con las propuestas de investigación pertinentes. En muchos casos, nos limitamos a proponer estrategias generales hasta que se cuente con información fidedigna. A pesar de todo ello, los autores están convencidos de que, aún en tales circunstancias, este documento podrá orientar las políticas y las decisiones que inciden sobre la permanencia de los beneficios de los sistemas de dunas costeras al largo plazo.

1. INTRODUCCIÓN

Las dunas costeras forman parte de un sistema de intercambio dinámico de arena y son interdependientes con la playa arenosa, lo que conforma al sistema playa-dunas costeras (Martínez *et al.*, 2004; Psuty, 2004). Esta interdependencia provoca que las alteraciones en las playas arenosas afecten a las dunas costeras y viceversa. En consecuencia, para que el manejo de los ecosistemas de dunas costeras sea efectivo, se debe considerar al sistema playa-dunas costeras como unidad de funcionamiento.

Las dunas costeras son sistemas altamente dinámicos que dependen principalmente del transporte de sedimentos por el viento y, en menor grado, del efecto combinado de la marea de tormenta, de la marea astronómica, y del oleaje, por lo tanto, son vulnerables a las variaciones de cualquiera de estos elementos o procesos. Tanto los procesos naturales como las actividades humanas que se desarrollan en estos sistemas pueden alterar el equilibrio dinámico que los caracteriza. Con frecuencia, el efecto de estos cambios no es visible de inmediato, por lo que las consecuencias de modificar o interrumpir el flujo del viento, del agua o el aporte de los sedimentos no son visibles hasta que fenómenos hidrometeorológicos extremos y/o geotectónicos (tsunamis) ponen a prueba la resiliencia (capacidad de recuperar su estructura y funcionalidad en el corto plazo, después de la perturbación) y resistencia de estos sistemas.

La estabilidad de la línea de costa, en particular la de las playas arenosas, depende en gran medida de la presencia de las dunas costeras. Éstas funcionan como reservas de sedimentos ya que reciben, proveen y almacenan arena transportada de y hacia playas adyacentes (Ranwell y Boar, 1995). El suministro periódico de arena de la duna a la playa es un ciclo de retroalimentación que reduce la erosión costera debido a que disipa la energía del oleaje. La interrupción o disminución del balance de arena puede provocar la desaparición de las playas (Nordstrom *et al.*, 1990).

Asimismo, las dunas costeras funcionan como barreras naturales de protección que actúan como defensa ante fenómenos hidrometeorológicos extremos e inundaciones; son ecosistemas clave para la recarga de acuíferos y para amortiguar la intrusión salina. Además, son hábitat de especies endémicas o en alguna categoría de riesgo y tienen un valor estético y cultural (Ranwell y Boar, 1995; Alcamo y Bennett, 2003; Martínez *et al.*, 2004; Seingier *et al.*, 2009).

La estructura de un ecosistema de dunas costeras se compone de diversos elementos cuyas características dependen de la dinámica del transporte

de sedimentos y de la presencia y composición de la cubierta vegetal. Esta diversidad obliga a que en la gestión y el manejo de las dunas se deban establecer consideraciones específicas para cada elemento. Sin embargo, actualmente no existe en el marco legal mexicano una regulación específica sobre dunas costeras, por lo que su manejo se lleva a cabo a través de diversos instrumentos que no están articulados y no siempre consideran las particularidades de cada elemento del ecosistema. Estos instrumentos son la Evaluación de Impacto Ambiental, el Ordenamiento Ecológico del Territorio, el Programa de Desarrollo Urbano, la Administración de la Zona Federal Marítimo Terrestre y las Áreas Naturales Protegidas, entre otros.

En este documento se describen los elementos que componen el ecosistema de dunas costeras y se identifican los principales factores que lo deterioran. Con base en ello, se presenta una propuesta de criterios y recomendaciones que deben cumplir las obras y actividades que pretendan desarrollarse en este ecosistema, así como las estrategias que deben implementar las autoridades para su manejo y gestión (ver Figura 1). De esta manera, el documento está dirigido a las autoridades de los tres órdenes de gobierno y a los usuarios del ecosistema de dunas costeras, incluyendo la sociedad civil y los sectores productivos que cuenten con conocimientos técnicos y participen en su conservación y aprovechamiento sustentable.



El objetivo es proporcionar el sustento técnico para que el manejo y la regulación de las obras y actividades que se desarrollan en las dunas costeras permitan el mantenimiento de los bienes y los servicios ambientales que proporciona este ecosistema.

El documento integra información proveniente de documentos científicos y de difusión, así como la experiencia de los expertos que participaron en su elaboración.

El alcance que se busca es que, con base en la información disponible, las autoridades competentes adopten las recomendaciones propuestas y las apliquen a través de los instrumentos de planeación y gestión existentes. Asimismo, que reconozcan que de no considerar estas recomendaciones, se podría alterar o perder la función del ecosistema, lo cual tendrá altos costos ambientales, sociales y económicos, difíciles de revertir.

Este documento representa una contribución a la gestión de dunas costeras. No obstante, hay que reconocer que para alcanzar el manejo integral de la zona costera se debe considerar la conectividad que existe entre los ecosistemas costeros. Por ello se recomienda complementar la información con documentos que aborden procesos costeros a diversas escalas, incluyendo así ecosistemas vecinos tanto marinos como terrestres.

2. CARACTERIZACIÓN DE LAS DUNAS COSTERAS

Las dunas costeras forman un sistema funcional con las playas arenosas. Las playas arenosas se delimitan en la parte terrestre por dunas o acantilados y en la parte marina, hasta la profundidad donde el oleaje y las corrientes no son capaces de mover al sedimento que se encuentra en el fondo del mar. Desde el punto de vista morfodinámico son el resultado del equilibrio de múltiples procesos, sean de origen natural y/o inducidos por el hombre, en el cual intervienen: a) los procesos marinos -oleaje, viento, mareas, tormentas, descarga de ríos-; b) el clima -temperatura, precipitación, evaporación-; c) el acarreo de sedimentos -modificaciones en la disponibilidad de sedimentos de origen marino y terrestre, descarga de los ríos, erosión costera, azolve de la costa, etc.-; d) variaciones relativas del nivel del mar -eustáticas, tectónicas, variación climática- y; e) actividades humanas -obras de dragado, estructuras costeras, mantenimiento de playas, entre otras-. La estabilidad de este sistema depende, entre otros, de su morfología, presencia de estructuras naturales o artificiales, vegetación, calidad del sedimento y de la dinámica marina.

La formación de una playa normalmente está antecedida por una historia muy compleja y es altamente dependiente de su entorno local y, en ocasiones, de condiciones de ciertos patrones que pueden tener un origen muy lejano (por ejemplo la presencia de presas). En el entorno local, las alteraciones en las playas afectan al sistema de dunas costeras y viceversa. Esta interdependencia entre las dunas y las playas hace necesario que se deba establecer la condición de estabilidad de las playas adyacentes para abordar como una unidad de funcionamiento los sistemas playa-dunas y el manejo de los ecosistemas de dunas costeras sea efectivo.

Las dunas costeras se pueden desarrollar a lo largo de cualquier tipo de costa arenosa (abierta, semicerrada o en bahía), estuarios y lagunas costeras (Hesp 2002). Su altura varía desde unos centímetros hasta 130 m (al sur de la boca en Alvarado, México) y 100 m (por ejemplo en Chile y Francia), mientras que su extensión puede alcanzar varios kilómetros tierra adentro (Moreno-Casasola *et al.*, 2006; Moreno-Casasola, 2010).

El sistema playa-dunas costeras es el resultado de la tendencia a la auto-organización que lo mantiene en, o con más frecuencia, alrededor de un estado de equilibrio estático o dinámico. Este estado depende de las condiciones que retroalimentan al sistema, las cuales pueden cambiar en función de las variaciones en el régimen de mareas, oleaje y viento, así como del flujo de los ríos. Dichas variaciones ocurren en diferentes escalas de tiempo y espacio.

Cuando el sistema playa-dunas costeras tiene la capacidad de mantener su estado ante cualquier cambio en el entorno, se dice que existe un estado de equilibrio. Cuando dicho cambio supera un umbral, el sistema ya no es capaz de auto-ajustarse y se desestabiliza.

El sistema playa dunas-costeras se encuentra en equilibrio estático cuando su forma y comportamiento no presenta modificaciones a lo largo del tiempo y se encuentra en equilibrio dinámico cuando exhibe cambios cíclicos. Un tercer tipo de equilibrio es el denominado metaestable o hiperestático, que sucede cuando el sistema playa-dunas costeras se adapta, en tiempos relativamente cortos, a cambios en el entorno y alcanza un nuevo estado de equilibrio (Woodroffe, 2003).

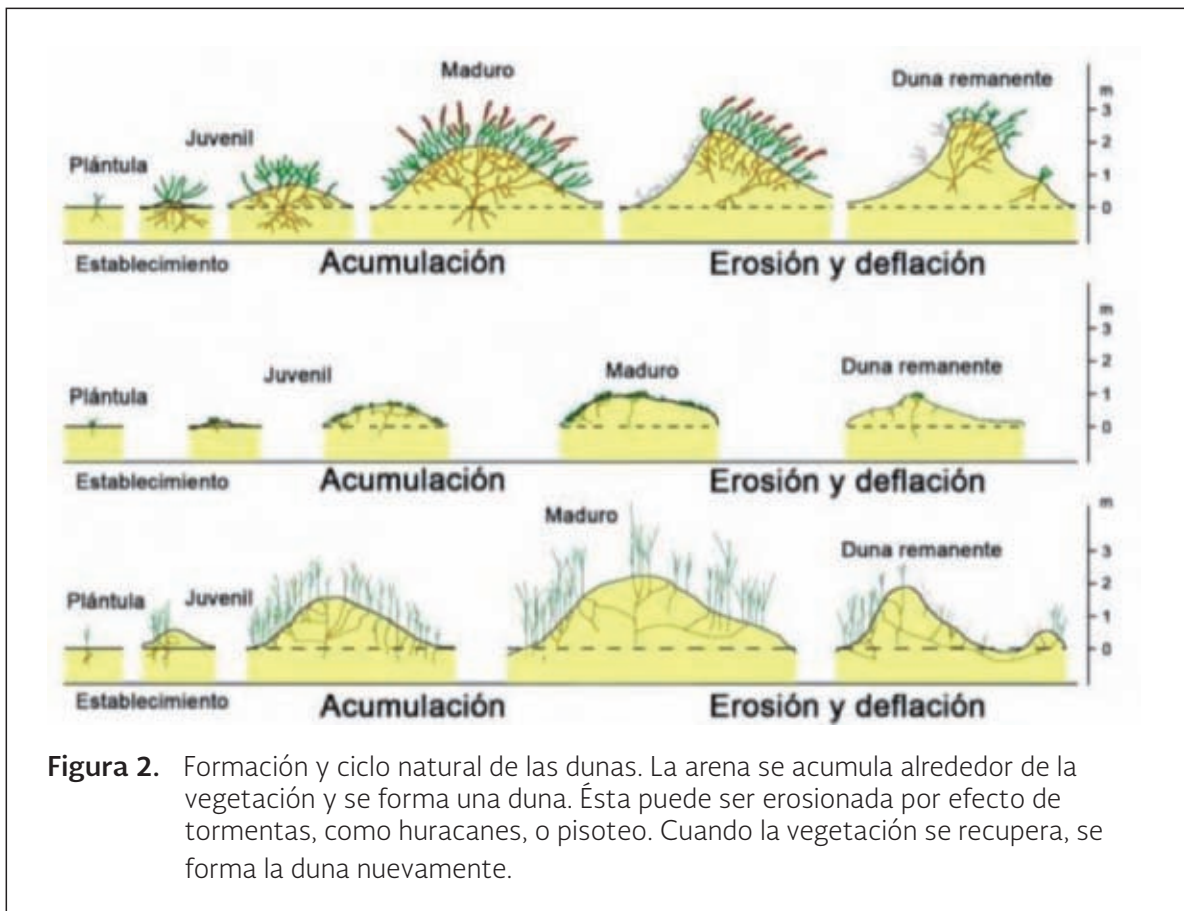
A la fecha la única forma de poder establecer el estado de equilibrio del sistema playa-dunas costeras es por medio de un monitoreo de largo plazo, tanto de la evolución del sistema playa-dunas costeras, como de las diferentes variables ambientales. Esto, debido a que pequeños cambios en el tiempo pueden dar la percepción de ser parte de un equilibrio dinámico, o bien grandes cambios puntuales ser parte de un equilibrio dinámico de largo plazo y considerarse como erosiones permanentes.

2.1. FORMACIÓN

El principal aporte de sedimento para la formación de las dunas costeras es la arena de la playa, la cual al estar expuesta suficiente tiempo, se seca y es transportada por el viento tierra adentro (Ranwell, 1972; Martínez *et al.*, 2004). Además, puede haber transporte de arena en condiciones de tormenta. Cuando el aporte de arena es suficiente y el viento se encuentra con un obstáculo (como una planta, un cúmulo de algas depositadas en la playa, una roca, un tronco o incluso basura), se empieza a formar un montículo, el cual acumula cada vez más arena hasta formar una duna (Moreno-Casasola, 2010). Es importante señalar que los accidentes geográficos costeros a menudo condicionan la velocidad y la forma del transporte de sedimentos.

Los primeros montículos son los más inestables y carecen de cubierta vegetal en un inicio, aunque es frecuente que se formen alrededor de las plantas que ya se encontraban en la playa y cuyas semillas son dispersadas por el mar como *Ipomoea-pescaprae* o que llegan a nuevas playas como trozos de ramas que enraizan como forman *Sesuvium portulacastrum*. Ambas se distribuyen en todas las costas tropicales y *Abronia maritima* o el pasto *Uniola pittieri* en el Pacífico (ver proceso en la Figura 2). En un proceso de interacción recíproca, las dunas posteriores a los primeros montículos se forman y son colonizadas por especies pioneras, las cuales tienen la capacidad de mantenerse sobre la superficie de la

arena y evitar ser cubiertas por ésta (Ranwell y Boar, 1995; Martínez y Moreno-Casasola, 1996; Martínez, 2009). Las plantas contribuyen a la formación de otras dunas o dunas de mayor altura. Frecuentemente, estas plantas son herbáceas, aunque en el Golfo de México son arbustos de baja estatura y son endémicos de México (*Chamaecrista chamaecristoides* y *Palafoxia lindenii*). Con el desarrollo de vegetación el sustrato se estabiliza, permitiendo un proceso de sucesión, en el que inicialmente predomina una cubierta herbácea o de arbustos bajos, la cual lentamente es colonizada por pequeños manchones de arbustos y vegetación arbórea (Moreno-Casasola, 2006).



Aunque el viento es el factor predominante en la formación de dunas costeras, el tipo de plantas, el oleaje junto con la marea, tanto la astronómica como la de tormenta, pueden influir en su formación y evolución (Martínez, 2008; Martínez, 2009).

En la Figura 3 se ilustra el proceso de evolución, destrucción-regeneración, de una duna ante el embate de una tormenta. Siguiendo el orden desde el panel superior hacia el panel inferior: a) el aspecto de un sistema playa-duna costera en condiciones reinantes cuando el viento solo es capaz de mover la arena seca

sobre la playa y la vegetación retiene el material que conforma la duna; (b) ante el efecto de una tormenta la desaparición de la duna incipiente y el efecto de fricción de la vegetación disminuye la velocidad de transporte de sedimentos; (c) después de la tormenta, debido al colapso de la base de la duna primaria, la presencia de escarpes suele ser común, y; (d) el proceso de recuperación del sistema en el cual la arena que deposita el oleaje sobre la playa y que logra secarse es transportado por el viento e inicia un proceso de estabilización del sistema playa-duna costera.

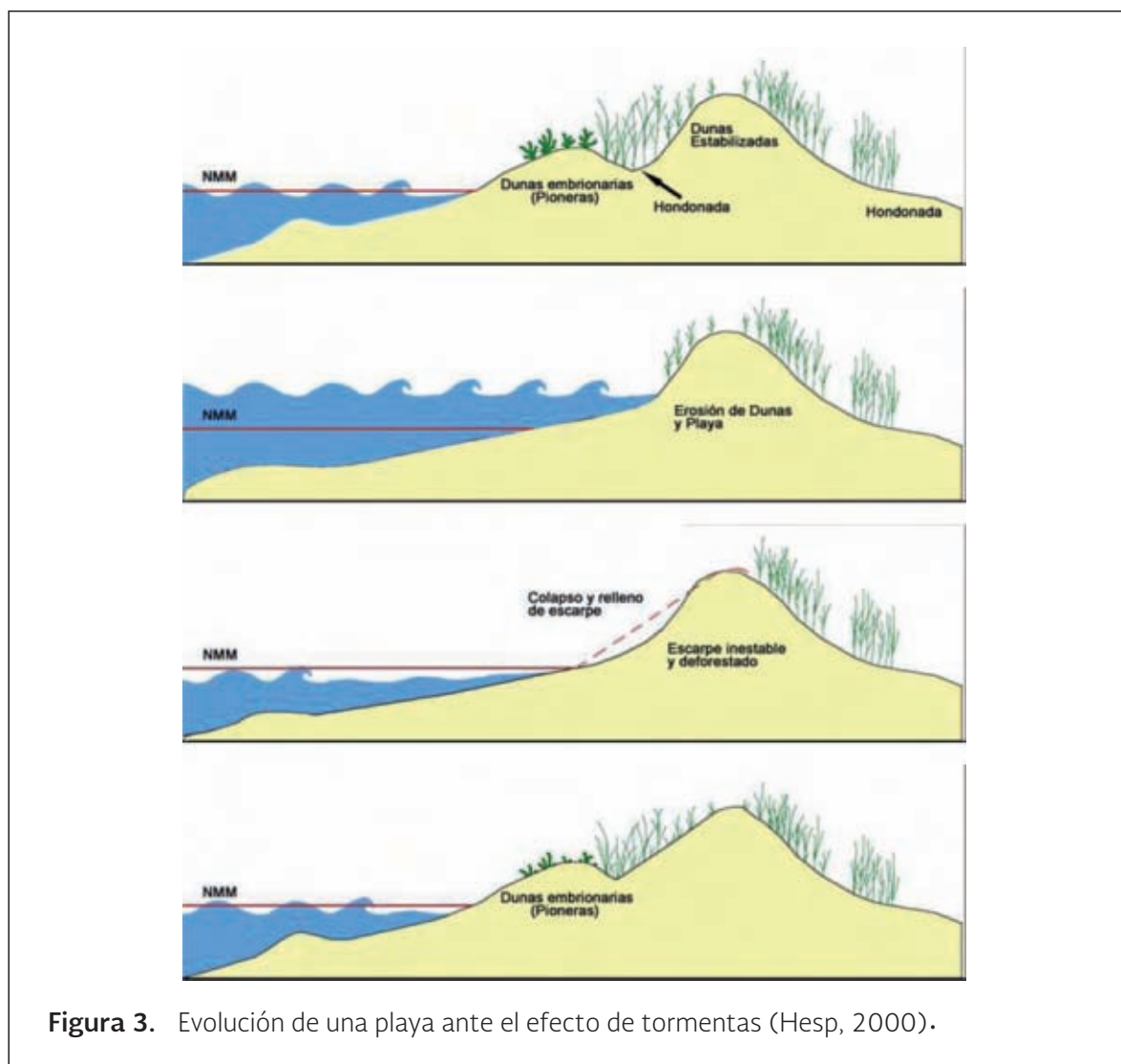


Figura 3. Evolución de una playa ante el efecto de tormentas (Hesp, 2000).

Las dunas costeras pueden variar en cuanto al origen, composición y características de los sedimentos que las conforman. Existen diferentes sistemas que clasifican a las dunas costeras de acuerdo con sus características físicas;

su geología u origen (Camacho-Valdéz y Murillo-Jiménez, 2008); el origen y la composición mineral de los sedimentos que las conforman (Geissert, 1999; Hernández *et al.*, 2007; Sewell y Johnson, 2007; Kasper-Zubillaga y Acevedo-Vargas, 2008; Emhoff y Johnson, 2012); su geomorfología (Hesp *et al.*, 2011) y su vegetación (INEGI, 2005).

Con base en las características morfodinámicas, las dunas costeras pueden ser totalmente móviles, semimóviles o estabilizadas. Las dunas se consideran activas o móviles cuando hay posibilidad de que la arena expuesta, seca y sin vegetación, sea susceptible a ser movida por la acción del viento, oleaje y mareas. Cuando la arena de las dunas móviles o semimóviles se mueve con el viento provoca el enterramiento o desenterramiento de plantas. La arena se mueve en el sentido del viento dominante y ello provoca que la duna en su conjunto avance. En estos sistemas una duna puede moverse más de 15 metros en un año, cubriendo lo que está a su paso. Las dunas fijas, estabilizadas o relictas están cubiertas por vegetación y no presentan transporte de sedimentos (Moreno-Casasola, 2006). Cuando las dunas fijas pierden su cubierta vegetal, retornan a una condición activa o móvil.

Utilizando una combinación de criterios de dinámica costera y vegetación, en este trabajo se emplea una clasificación con base en los elementos que conforman la estructura de un sistema de playa-dunas costeras.

2.2. ESTRUCTURA DE LAS DUNAS COSTERAS

En la zona costera se puede distinguir un gradiente que va de la playa hacia tierra adentro, en el cual las condiciones ambientales cambian. A medida que disminuye el movimiento de arena, la aspersion salina, el efecto del oleaje y el pH del suelo, se incrementa el contenido de materia orgánica y de nutrientes (Martínez *et al.*, 1993; Martínez, 2009).

La vegetación del extremo más cercano al mar representa etapas iniciales de colonización, con especies típicas de playa, mientras que tierra adentro, al formarse un suelo desarrollado, se pueden establecer especies herbáceas, arbustivas o arbóreas, que constituyen una transición a las comunidades terrestres (Martínez, 2009). A lo largo de este gradiente de vegetación, las dunas se van estabilizando conforme se alejan del mar.

El perfil del sistema playa-dunas costeras se conforma de varios elementos: la playa, las dunas embrionarias o incipientes, las primarias, las secundarias y las terciarias (Martínez, 2009) (ver Figura 4). Las dunas que se forman en el fondo

de la playa, siguiendo una orientación paralela a la línea de costa, se conocen como dunas embrionarias, las cuales constituyen los primeros montículos que eventualmente se forman por la sedimentación eólica de la arena alrededor de la vegetación (Hesp y Walker, 2013). Éstas son las que reciben el impacto directo del oleaje asociado al efecto de la marea astronómica y de las marejadas de las tormentas, como las asociadas a frentes fríos y ciclones tropicales (Moreno-Casasola, 2006).

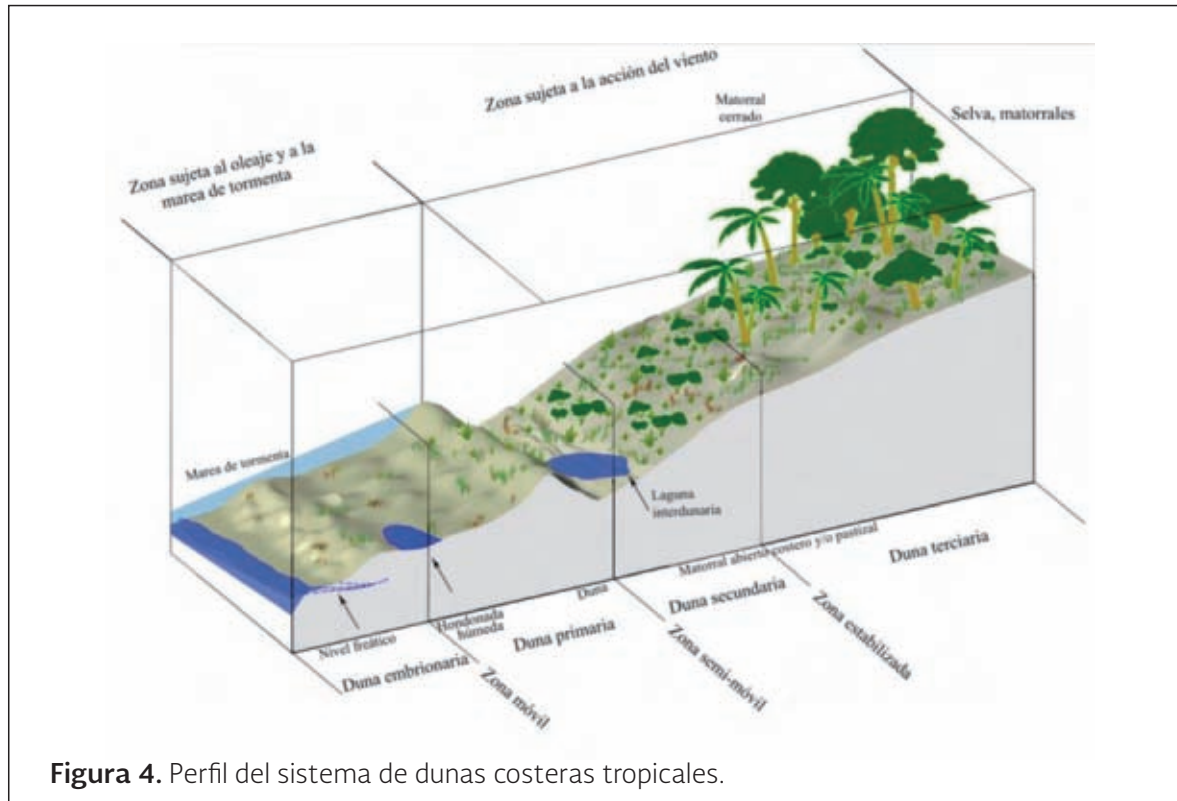


Figura 4. Perfil del sistema de dunas costeras tropicales.

Las dunas embrionarias están formadas por arena no consolidada y carecen de materia orgánica, por lo que no presentan un suelo desarrollado. Su vegetación puede ser monoespecífica o bien contener varias especies. Usualmente, esta vegetación no es homogénea, aunque puede también ser muy densa. Existen otros tipos de dunas que se pueden presentar en el fondo de playa aparte de las dunas embrionarias; por ejemplo, en las costas erosivas o cuando las dunas están migrando a lo largo de la costa y no hacia tierra adentro es posible observar dunas parabólicas (Hesp y Walker, 2013).

En latitudes tropicales las plantas rastreras son más comunes, y generalmente están dominadas por especies como *Ipomoea pes-caprae* y *Canavalia rosea* (Hesp 2004), mientras que en las zonas más templadas o desérticas del

noroeste *Abronia maritima* y *Scaevola plumieri* son las especies más comunes y en el noreste lo es *Uniola pittieri*.

Atrás de las dunas embrionarias se forman las dunas primarias, que pueden formar uno o más cordones (Psuty, 2004) y que bajo condiciones de tormenta sirven como reservas para el suministro de arena a la playa.

Las dunas secundarias y terciarias se ven afectadas principalmente por el efecto del viento (Hesp, 2002). Pueden constituir campos de dunas transgresivas y dunas parabólicas (Hesp y Walker, 2013).

En latitudes tropicales, conforme se van estabilizando las dunas costeras, en la duna secundaria predomina primero un pastizal o una cubierta herbácea que va siendo colonizada por arbustos. Gradualmente la vegetación se va extendiendo sobre la duna terciaria que es más estable y presenta vegetación más desarrollada, hasta formar matorrales, selvas o bosques (Moreno-Casasola, 2006). En las costas del Golfo de México y el Mar Caribe, esta vegetación consiste en selvas bajas a medianas, dependiendo de la precipitación. En el Pacífico Centro y Sur predominan las selvas bajas caducifolias (Martínez *et al.*, 1993; Moreno-Casasola *et al.*, 1998), mientras que en las zonas desérticas del Pacífico Norte y del Golfo de California se distribuyen matorrales, especies crasas o suculentas como las cactáceas típicas de desierto y árboles como mezquites (Figura 5).

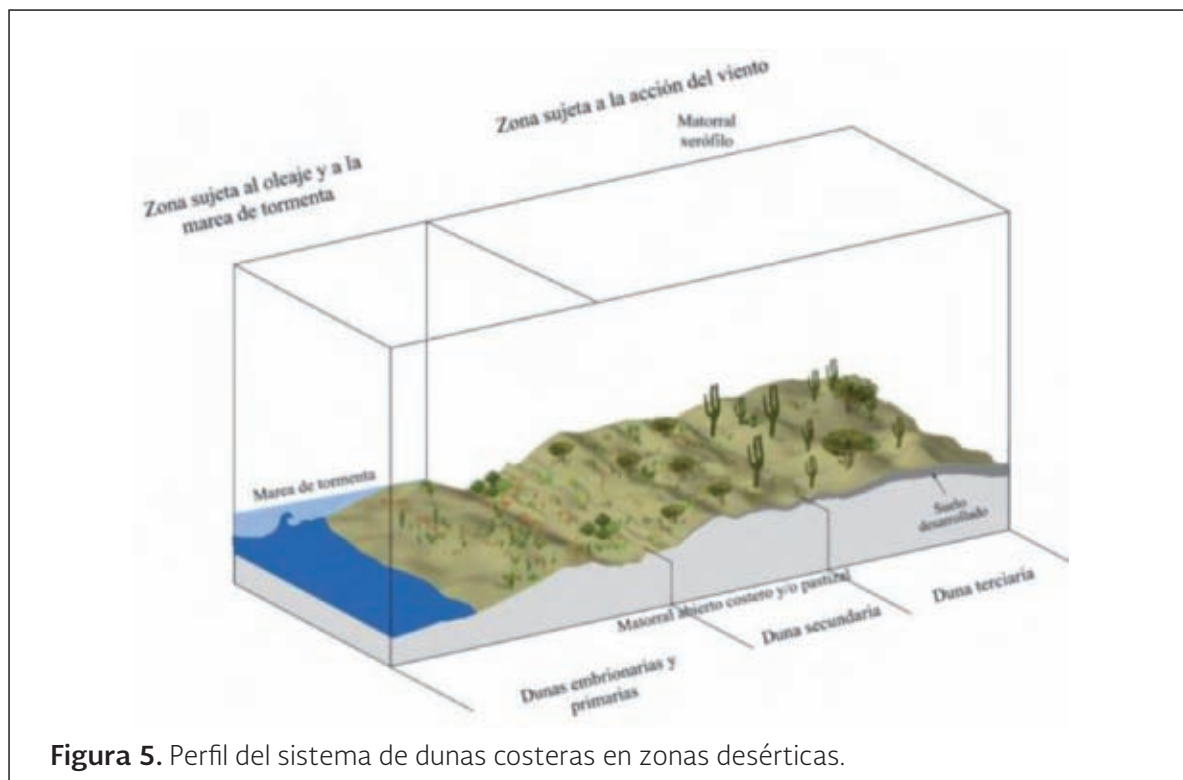


Figura 5. Perfil del sistema de dunas costeras en zonas desérticas.

En zonas desérticas en la costa occidental de la Península de Baja California y en el Desierto del Altar, Sonora (Jímenez, 2013) las dunas costeras pueden encontrarse adyacentes a dunas de desierto, las cuales no presentan cobertura vegetal (Hesp, 2004).

En las dunas costeras se pueden observar depresiones llamadas hondonadas húmedas (Ranwell y Boar, 1995) o lagos interdunarios (Peralta-Peláez y Moreno-Casasola, 2009; Moreno-Casasola, 2010). Las hondonadas húmedas generalmente presentan un mayor contenido de humedad y materia orgánica debido a que el viento ha acarreado la arena hasta dejar expuesto el sustrato húmedo por la cercanía del manto freático (Moreno-Casasola, 2006). Su permanencia varía dependiendo del régimen local de lluvias y las fluctuaciones del nivel del manto freático (Martínez *et al.*, 2004; Yetter, 2004). Los lagos interdunarios se forman cuando el manto freático aflora y se mantiene la inundación todo el año, formando un espejo de agua.

Las dunas costeras que se localizan en barras arenosas o islas de barrera asociadas a lagunas costeras son de los rasgos costeros más dinámicos de la playa, y las únicas zonas estables son los macizos rocosos consolidados. Las zonas más inestables son aquellas que se caracterizan por un estrechamiento de la barra y nivel de coronamiento más bajo, como los sitios de apertura temporales de brechas o bocas, los puntales o salientes de arena, p.e. en esteros o desembocaduras de ríos (p.e. Figura 6). Las zonas más angostas de una isla de barrera son susceptibles a su rompimiento en eventos de tormentas intensas, como las asociadas por huracanes.



Figura 6. Vista aérea de la desembocadura y barra arenosa en el frente costero Río Papagayo, Guerrero.

2.3. FLORA Y FAUNA DE DUNAS COSTERAS

La vegetación de dunas costeras es un componente vital de las mismas, debido a que desempeña un papel importante en la acumulación y consolidación de la arena y genera nuevas condiciones ambientales al proporcionar materia orgánica y sombra, lo cual facilita el establecimiento de otras especies (de M Luna *et al.*, 2011; Rodrigues *et al.*, 2011). Las plantas que se desarrollan en las dunas presentan adaptaciones que les confieren resistencia a la movilidad del sustrato, a condiciones de temperaturas extremadamente altas, de sequías, de inundaciones, de alta salinidad y de limitación de nutrientes (Martínez *et al.*, 2004).

Con base en Espejel *et al.*, (2012), la flora vascular de playas y dunas de México consta de 163 familias, 921 géneros y 2,219 especies. Las 163 familias representan el 50% del total de las familias de plantas vasculares registradas para México. Las familias con más registros son Asteraceae, Fabaceae y Poaceae. Los 921 géneros representan el 32.5% de los géneros de plantas vasculares de México. Los géneros con más registros y especies son *Euphorbia*, *Ipomoea* y *Atriplex*. Las especies más frecuentes son *Sesuvium portulacastrum*, *Ipomoea pes-caprae*, *Sporobolus virginicus*, *Abronia maritima*, *Jouvea pilosa* y *Scaevola plumieri*. Esta riqueza se debe a que las zonas más estabilizadas de las dunas frecuentemente están en contacto con comunidades vegetales que se establecen tierra adentro y que abarcan desde bosques y selvas, hasta pastizales y matorrales.

La vegetación de playas y dunas se diferencia en cinco regiones florísticas: Pacífico Norte, Golfo de California, Pacífico Sur, Golfo de México y Mar Caribe (Moreno-Casasola *et al.*, 1998). Las regiones del Pacífico Norte y el Golfo de California tienen más de la mitad (64%) de las especies de playas y dunas. Los estados con más especies son Veracruz, Baja California Sur, Sonora y Quintana Roo. 18 especies son comunes a todas las costas del país, mientras que 1,681 sólo se encuentran en una región. De éstas, 490 son exclusivas al Golfo de California, 461 al Golfo de México, 371 al Caribe, 208 al Pacífico Norte y 151 al Pacífico Sur (Tabla 1).

TABLA 1. RELACIÓN DE ESPECIES VEGETALES ASOCIADAS A DIVERSOS ELEMENTOS DEL SISTEMA PLAYA-DUNA COSTERA POR REGIÓN FLORÍSTICA

Elemento del sistema playa-dunas costeras	Zonas áridas		Zonas tropicales		
	Pacífico Norte	Golfo de California	Pacífico Sur	Golfo de México	Mar Caribe
Playa y dunas embrionarias (pioneras)	<i>Abronia maritima</i> , <i>Atriplex barclayana</i> y <i>Ambrosia dumosa</i>	<i>Prosopis spp.</i> , <i>Atriplex barclayana</i> y <i>Ambrosia dumosa</i>	<i>Ipomoea pes-caprae</i> , <i>Sporobolus virginicus</i> , <i>Distichlis spicata</i>	<i>Uniola paniculata</i> , <i>Ipomoea imperatii</i> , <i>Canavalia rosea</i> , <i>Chamaecrista chamaecristodes</i>	<i>Sporobolus virginicus</i> , <i>Sesuvium portulacastrum</i>
Crestas (dunas primarias y secundarias)	<i>Nemacaulis denudata</i> .		<i>Canavalia rosea</i> , <i>Pectis arenaria</i>	<i>Croton punctatus</i> , <i>Schizachyrium littorale</i> , <i>Pectis arenaria</i> , <i>Commelina erecta</i> , <i>Coccoloba uvifera</i>	<i>Croton punctatus</i> , <i>Tournefortia gnaphalodes</i> , <i>Suriana maritima</i> , <i>Scaevola plumerii</i> , <i>Chrysobalanus icaco</i> (no siempre juntas, ni en todas las playas)
Dunas estabilizadas (terciarias)	<i>Ephedra californica</i> , <i>Croton californicus</i> , <i>Encelia californica</i> , <i>Hazardia squarrosa</i> , <i>Lycium californicum</i> , <i>Atriplex julacea</i> , <i>Astragalus magdalanae</i> , <i>Ambrosia dumosa</i> , <i>Diospyros intricata</i> , <i>Oenothera drummondii</i> , <i>Atriplex barclayana</i> , <i>Atriplex julacea</i> , <i>Atriplex leucophylla</i> , <i>Marina maritima</i> , <i>Jouvea pilosa</i> y <i>Jatropha cuneata</i> .	<i>Caesalpinia bonduc</i> , <i>Prosopis juliflora</i> , <i>Pithecellobium dulce</i> , <i>Guaiacum coulteri</i> , <i>Opuntia excelsa</i> , <i>Bumelia celastrina</i> , <i>Thevetia peruviana</i> , <i>Bursera linanoe</i> , <i>Jacquinia macrocarpa</i> y <i>Chrysobalanus icaco</i> .	<i>Diphysa robinoides</i> , <i>Bursera simaruba</i> , <i>Enterolobium cyclocarpum</i> , <i>Astrocaryum mexicanum</i> , <i>Ficus insipida</i> , <i>Quercus oleoides</i> , <i>Coccoloba barbadensis</i> , <i>Karwinskia humboldtiana</i> , <i>Nectandra salicifolia</i> , <i>Capparis flexuosa</i> , <i>Chrysobalanus icaco</i>	<i>Thrinax radiata</i> , <i>Coccothrinax readii</i> , <i>Pseudophoenix sargentii</i> , <i>Caesalpinia vesicaria</i> , <i>Pithecellobium keyense</i> , <i>Bravaisia berlandieriana</i> , <i>Coccoloba uvifera</i> , <i>Cordia sebestena</i> , <i>Metopium brownei</i> .	
Hondonadas húmedas y lagos interdunarios	<i>Hydrocotyle bonarensis</i> , <i>Cyperus ariculatus</i> , <i>Lippia nodiflora</i> , <i>Scirpus pungens</i> , <i>Cyperus ligularis</i> , <i>Typha domingensis</i> , <i>Phragmites comunis</i> , <i>Juncus acutus</i> , entre otras menos comunes. En aguas salobres (marismas): <i>Salicornia subterminalis</i> , <i>Salicornia virginica</i> , <i>Monanthochloe littoralis</i> , <i>Batis maritima</i> , <i>Allenrolphea occidentalis</i> y <i>Suaeda nigra</i>				
Total especies	208 spp.	490 spp.	151 spp.	461 spp.	371 spp.

En la figura 7 se presentan fotografías de algunos ejemplos de especies de la flora de dunas costeras.

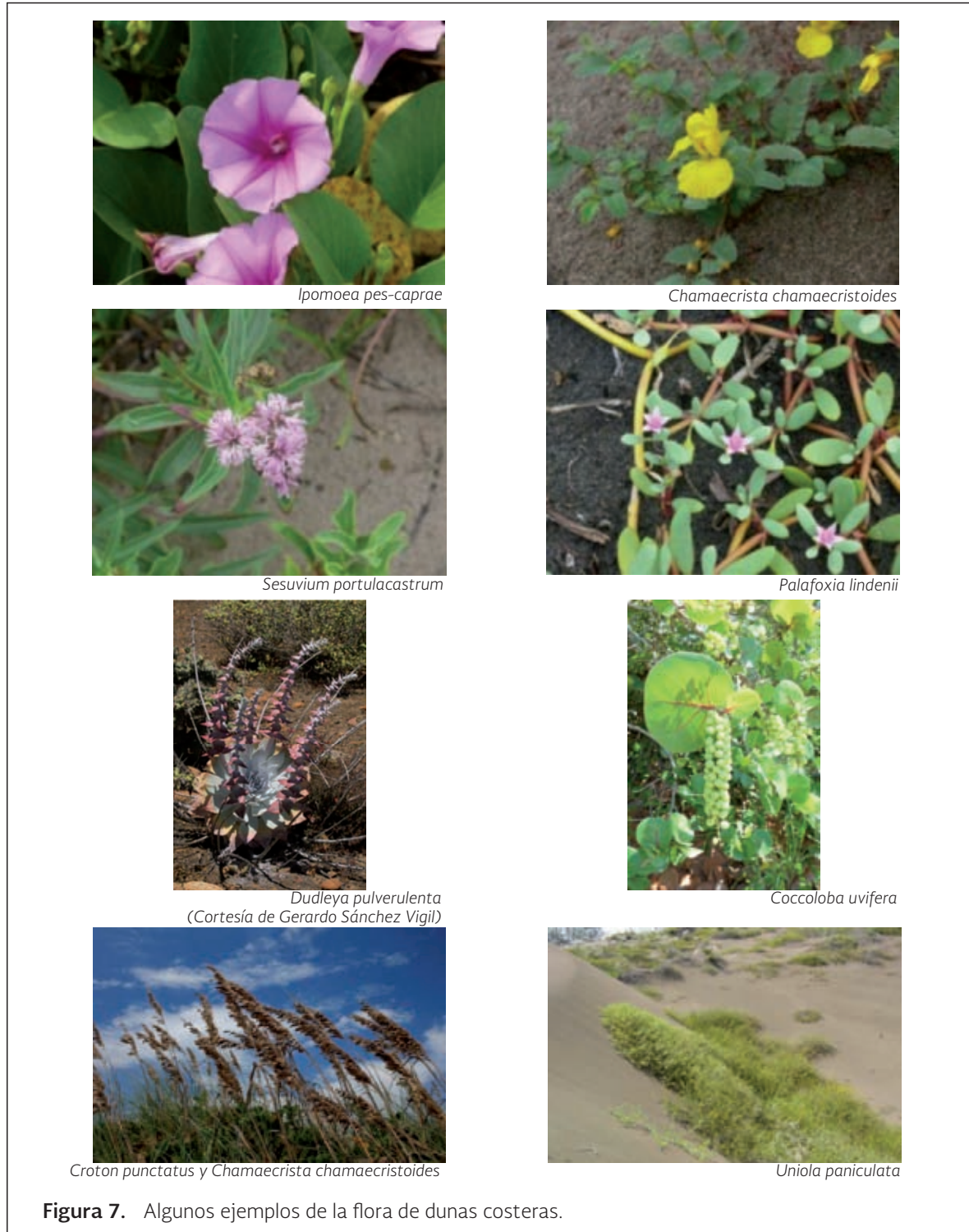


Figura 7. Algunos ejemplos de la flora de dunas costeras.

En relación a la fauna asociada al sistema playa-dunas costeras, se tienen registros de invertebrados como los cangrejos *Gecarcinus lateralis* y *Oxypode quadrata* y los moluscos *Donax variabilis roemeri* y *D. texasiana*. Entre los vertebrados se encuentran reptiles como las tortugas de agua dulce que habitan las hondonadas, *Kinosternon* spp., *Trachemys* spp. y *Rhynoclemys* spp.; las tortugas marinas *Lepidochelys olivacea*, *L. kempii*, *Chelonia mydas*, *C. mydas agassizi*, *Caretta caretta*, *Dermochelys coriacea* y *Eretmochelys imbricata*; las lagartijas *Aspidoscelis* sp, *Nemidoforus* sp., *Ameiva ameiva*; la iguana de peine *Iguana iguana*; la víbora boca de algodón *Agkistrodon piscivorus*; las culebras *Drymarchon corais*, *Salvadora lemniscata*, *Manolepis putnami*, *Nicrurus distans* y *nauyacac Bothrops* spp. Cuando existe un humedal asociado puede encontrarse el caimán *Caiman crocodilus* y el lagarto *Crocodylus acutus* (Martínez et al., 1993; Martínez et al., 2004; Moreno-Casasola, 2010).

Las aves que se han registrado son zopilotes *Cathartes aura*, halcones *Falco sparverius* y *Accipiter cooperii*, gaviotas *Larus fuscus*, pájaros burlones *Mimus gilvus*, águilas pescadoras *Pandion haliaetus* (Berlanga et al. 2008; Martínez, 2004), los colibríes *Amazilia yucatanensis*, *A. candida* y *A. violiceps*, y matracas como *Campylorhynchus zonatus*, *C. brunneicapillus*, *C. rufinucha* (Martínez et al., 2004; Berlanga et al., 2008) y el águila real *Aquila chrysaetos*, el halcón peregrino *Falco peregrinus*; el halcón mexicano *F. mexicanus*, aguililla cola roja *Buteo jamaicensis*, la aguililla de Swainson *Buteo swainsoni* (Jiménez-Pérez et al., 2009). En las dunas y playas del noroeste de México el chorlito nevado *Charadrius alexandrinus*, el chorlito piquigrueso *Charadrius wilsonia*, el vuelvepedras *Arenaria interpres*, el playero rojizo *Calidris canutus*, la limosa canela *Limosa fedoa* y el costurero *Limnodromus* sp., el playerito blanco *Calidris alba*, playero rojizo *Calidris canutus* (Moreno-Casasola, 2010). Los mamíferos que se pueden encontrar en un sistema playa-dunas costeras son tlacuaches *Didelphis virginiana* y *Marmosa canescens*, murciélagos *Glossophaga soricina*, *Sturnira lilium* y *Myotis californicus*, la zorra gris *Urocyon cinereoargenteus*, el ocelote *Leopardus pardalis*, el venado cola blanca *Odocoileus virginianus* y el pecarí de collar *Pecaritiajacu* (Martínez et al., 1993), así como el ratón *Dipodomys gravipes*, endémico de las dunas en Baja California.

2.4. SERVICIOS AMBIENTALES

Las dunas son ecosistemas clave en la zona costera, pues actúan como una barrera de protección que contrarresta el efecto del viento, del oleaje y de las inundaciones (Ranwell y Boar, 1995; Alcamo y Bennett, 2003; Seingier et al., 2009). Asimismo, funcionan como reservorio de sedimentos porque reciben, proveen y almacenan arena, y de ello depende en gran medida la flexibilidad

y resiliencia del mismo ecosistema. La reserva sedimentaria que representan las dunas es lo que mantiene la integridad del sistema playa-dunas costeras después de eventos de tormenta o tsunamis.

Estos ecosistemas son zonas de recarga de acuíferos y, al filtrar el agua (Yetter, 2004), actúan como atenuantes contra la intrusión de agua salada a los acuíferos y a los humedales (Martínez *et al.*, 2004).

Mucha de la salinidad que el viento acarrea proveniente de la aspersión marina queda atrapada en la vegetación de las dunas, evitando su penetración tierra adentro, donde podría afectar cultivos o infraestructura (Moreno-Casasola, 2006). También son zonas de gran valor paisajístico, de esparcimiento para la sociedad y donde se desarrollan actividades económicas (Moreno-Casasola, 2006) relacionadas al turismo, la agricultura y la ganadería.

Las dunas costeras albergan una alta diversidad de especies de flora y fauna, que incluye especies endémicas y amenazadas. Asimismo, son sitios de alimentación y de anidación de diversas especies de aves migratorias y de tortugas marinas, entre otras (Alcama y Bennett, 2003). Dentro de las especies enlistadas en alguna categoría de riesgo en la NOM-059-SEMARNAT-2010 se encuentran el playero rojizo *Calidris canutus*, la tortuga verde *Chelonia mydas*, la tortuga prieta, *Ch. mydas agaziisi*, la tortuga golfina *Lepidochelys olivacea*, la tortuga caguama *Caretta caretta*, la tortuga laúd *Dermochelys coriacea*, la tortuga carey *Eretmochelys imbricata*, la tortuga lora *Lepidochelys kempii*.

2.5.AMENAZAS

Debido al efecto de los fenómenos naturales y de las amenazas antropogénicas, alrededor del 70-80% de las playas a nivel mundial están sujetas a procesos erosivos (Bird, 1996).

El desarrollo de obras y actividades sobre el sistema playa-dunas costeras puede alterar su estructura y función. La magnitud de las alteraciones dependerá de la zona que se afecte, del tipo de obra o actividad, así como de las condiciones ambientales del sitio en el que se desarrollen.

La pérdida o deterioro de las dunas costeras conlleva a la pérdida de los servicios ambientales que ofrecen estos sistemas a la sociedad y que son de interés económico (Mendoza-González *et al.*, 2012).

2.5.1. CONSTRUCCIÓN EN DUNAS COSTERAS

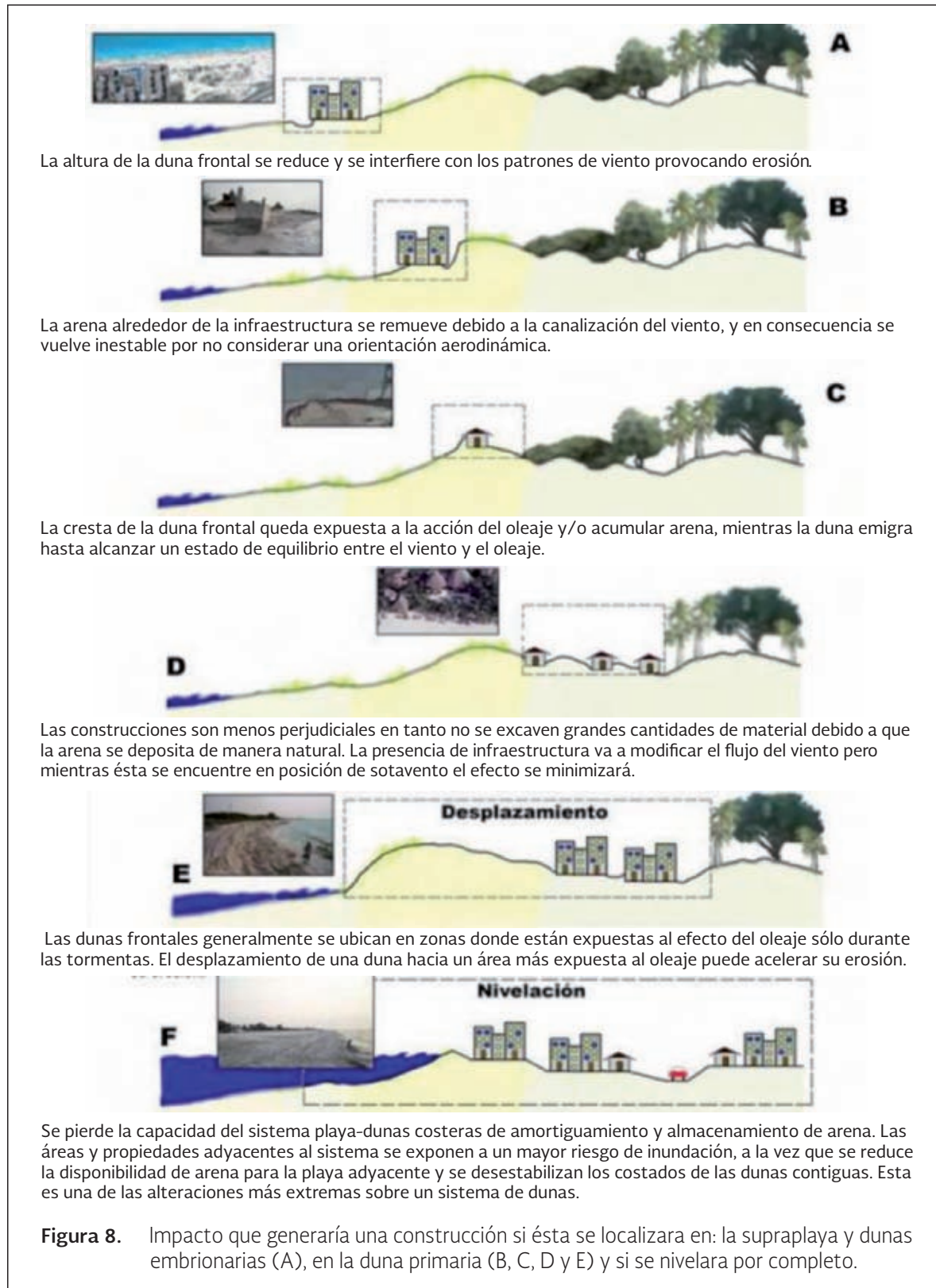
La infraestructura urbana, industrial, residencial, turística, acuícola, vial y portuaria que se construye en el sistema playa-dunas costeras, genera diversos impactos que pueden variar en intensidad, desde la alteración de una parte de su estructura, hasta su pérdida total, dependiendo de sus características constructivas y el lugar en el que se establece.

Las construcciones son obstáculos que interrumpen o desvían el flujo de agua y sedimentos, lo que modifica el balance sedimentario (Alcamo y Bennett, 2003; Martínez, 2009). La disminución de la disponibilidad de sedimento y la interrupción del transporte natural entre las dunas costeras y la playa favorece procesos de erosión y retroceso de la línea de costa.

Un sistema playa-dunas costeras cuyo balance sedimentario ha sido modificado tiende a estabilizarse en una configuración diferente, que normalmente conlleva a la pérdida de la playa. Estos cambios no se observan de inmediato porque se ocultan entre las fluctuaciones de corto plazo, por consiguiente reducen la capacidad del sistema playa-dunas para resistir cambios estacionales y recuperarse después de un evento hidrometeorológico extremo.

En un sistema playa-dunas costeras, las zonas más dinámicas y vulnerables son la supraplaya, las dunas embrionarias, las dunas primarias y las que se localizan en las islas de barrera. La construcción de infraestructura permanente sobre las dunas embrionarias y primarias genera cambios en la estructura y función de las dunas y, en consecuencia, éstas pueden dejar de funcionar como reservorios de arena y como barreras naturales de defensa litoral contra el efecto de tormentas (viento, oleaje, corrientes e inundaciones, principalmente) y tsunamis. Dado que estas dunas son móviles, lo que se construya sobre ellas eventualmente se verá afectado por el oleaje y las mareas y en consecuencia se puede perder la playa por erosión. Los efectos también podrán variar dependiendo de la ubicación específica de la infraestructura en estas dunas. Los impactos más severos se presentan cuando se realiza una nivelación de estas dunas, con lo que se pierde la capacidad del sistema de almacenamiento de arena y amortiguamiento (Figura 8). Cuando se elimina la cubierta vegetal que mantiene estabilizada las dunas, la arena puede empezar a moverse y las dunas pueden entonces migrar tierra adentro afectando a todo el sistema playa-dunas.

Considerando lo anterior, en aquellas zonas donde ya existen construcciones sobre las dunas, la playa o estructuras en el mar, se debe establecer un programa de monitoreo para registrar la generación de procesos de erosión o sedimentación y, si es el caso, implementar un plan de restauración del sistema playa-dunas.



La construcción de infraestructura en el sistema playa-dunas costeras puede generar procesos de erosión, cuya atención cíclica tiene altos costos económicos. Un ejemplo de esto, es el caso de la erosión de las playas que se encuentran entre Chuburná Puerto y Yucalpetén, en el municipio de Progreso, Yucatán, las cuales tuvieron que ser rehabilitadas como una medida de mitigación social, con sustentos técnicos que no garantizan la recuperación de la resiliencia perdida por el efecto de la construcción sobre las dunas costeras. El proyecto se llevó a cabo de junio a diciembre de 2010 y en él participaron el Instituto de Infraestructura Carretera de Yucatán (INCAY), la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y la Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio ambiente (SEDUMA), con una aportación total de cerca 2.5 millones de pesos, para el bombeo de poco más de 42 mil metros cúbicos de arena provenientes de las inmediaciones de la escollera oriental de la dársena de Chuburná (www.seduma.yucatan.gob.mx).

Las playas presentan ciclos de erosión y depósito de sedimento asociados a las características del oleaje y la marea que se producen en determinadas épocas del año. Por lo general, los episodios de erosión corresponden a periodos de oleaje de mayor energía combinado, en algunas ocasiones, con mareas altas; mientras que los episodios de depósito de sedimentos ocurren en condiciones de oleaje de menor energía.

Durante una tormenta el nivel del mar aumenta y se intensifica el flujo de retorno del oleaje. En este proceso una gran cantidad de arena es removida de la superficie de la playa y transportada mar adentro, donde es depositada en aguas relativamente profundas en forma de barras de arena. A medida que la barra de arena crece, la zona de rompientes se traslada en dirección al mar. Este proceso provoca que las olas rompan cada vez más lejos de la costa y disipen una cantidad considerable de energía antes de llegar a la playa, lo cual disminuye la acción erosiva sobre la superficie de la playa. Después de la tormenta, parte de la arena de las barras que se forman mar adentro, eventualmente vuelve a la playa, lo cual permite su recuperación (Silva-Casarín y Mendoza-Baldwin, 2013).

En condiciones de tormenta, los daños son mayores en zonas donde las dunas han sido eliminadas o modificadas, porque las construcciones actúan como ‘muros’ donde se produce el fenómeno de reflexión del oleaje, lo que a su vez promueve la concentración de energía sobre la playa y aumenta la erosión al pie de las construcciones (ver en el Anexo gráfico los ejemplos de daños ambientales y en la infraestructura por su construcción sobre las dunas primarias y fósiles).

En México se han registrado diversos desastres por eventos hidrometeorológicos extremos durante los últimos 20 años, que han generado daños con altos costos socioeconómicos y ambientales, que se estima ascienden a un total acumulado de 4,537 millones de dólares (Bitrán, 2001).

La costa del Caribe mexicano es la zona con mayor peligrosidad ante la presencia de huracanes; en las últimas décadas han impactado huracanes de intensidad de 1 a 5 en la escala Saffir-Simpson con relativa frecuencia (Silva et al., 2003). El huracán *Gilbert* (1988) generó olas de hasta 14 metros de altura y movió 130,000 m³ de arena (Diez et al., 2009). El resultado fue devastador, ya que la fuerza erosiva de la marejada aumentó y destruyó 200,000 viviendas, además de calles y hoteles, causando daños económicos que ascendieron a 76 millones de dólares (Bitrán, 2001). Posteriormente, el huracán *Wilma* en 2005, con oleaje de hasta 20 m de altura (Silva-Casarín et al., 2009), provocó la desaparición de casi 13 kilómetros de playas en la zona donde habita alrededor de 75% de la población de Quintana Roo y se ubica 98% de la infraestructura hotelera. Los costos totales del huracán *Wilma* fueron de 18 mil millones de pesos (García et al., 2006; Mendoza et al., 2013). Y, para atenderlos, ocuparon casi todo el fondo de atención a desastres del país.

Los problemas de erosión costera en Cancún se hicieron evidentes por primera vez después del huracán *Gilbert*, pero en realidad el origen debe atribuirse a la ocupación de la isla de barrera por infraestructura turística, que inició en la década de 1970. Posteriormente, los huracanes *Ivan* (2004), *Emily* (2005) y *Wilma* (2005) generaron procesos de erosión que ocasionaron la pérdida de la supraplaya y el oleaje alcanzó los edificios (Mendoza et al., 2013). Con cada nuevo huracán, la posibilidad de recuperación es cada vez más remota debido a que las construcciones no han cesado y la resiliencia del sistema playa-dunas costeras disminuye conforme el aporte de arena se reduce (Diez et al., 2009; Gonzalez-Leija et al., 2013).

El efecto de los fenómenos hidrometeorológicos extremos en la costa del Pacífico es igual que en la del Golfo de México y del Mar Caribe. La población costera y los desarrollos turísticos (Huatulco, Altata, La Cruz de Elota, Nuevo Vallarta, Peñasco, Los Cabos, entre otros) continúan creciendo y repitiendo los mismos errores de Cancún. En 1997 el huracán *Paulina* generó pérdidas económicas por 300 millones de pesos en Oaxaca y Guerrero (Matías-Ramírez, 1998).

En ocasiones después del impacto de un huracán se emprenden acciones de recuperación, como el relleno de playas, para contrarrestar la reducción de la reserva sedimentaria del sistema playa-dunas. En el caso particular de Cancún, el relleno de playa que tuvo lugar en 2006 costó aproximadamente 650 millones de pesos (Mendoza et al., 2013). La recuperación de playas es una actividad que no termina con una sola acción, ni en un solo año, por lo que se torna una actividad constante y los costos son muy altos tanto para el empresario, como para el gobierno y finalmente para todos los mexicanos que pagan impuestos.

2.5.2. EXTRACCIÓN DE MATERIALES

La extracción de materiales es una de las amenazas que actualmente requieren de mayor atención. Esta actividad incluye la remoción de arena y su filtrado para extracción de minerales (Ranwell y Boar, 1995).

La remoción de arena de las dunas costeras genera una erosión continua y provoca la pérdida de vegetación, con lo que las dunas estabilizadas se vuelven móviles y vulnerables a las corrientes costeras y el viento. Dependiendo de la topografía local, de las condiciones de oleaje y de la cantidad de material, la erosión de las dunas costeras por la pérdida de arena puede formar una brecha que permite un aumento en la incursión del mar tierra adentro (Ranwell y Boar, 1995).

La extracción de minerales implica el filtrado de la arena y su restitución al sistema. Con ello, se modifica la composición, la distribución granulométrica, el peso específico y la compactación natural de la arena. Asimismo, se altera la disponibilidad de nutrientes, lo cual inhibe el crecimiento de vegetación y en consecuencia, reduce la estabilidad de las playas y afecta a la biodiversidad del sistema.

Ante la falta de información sobre la magnitud del impacto que puede tener la extracción de materiales en la estabilidad de las playas y dunas costeras en México, se debe aplicar el principio precautorio en la regulación de dónde y cómo se realiza la actividad, con el fin de asegurar su conservación.

2.5.3. ACTIVIDADES RECREATIVAS

El tránsito de personas es la actividad que ejerce uno de los impactos negativos más comunes sobre la vegetación de dunas costeras. La mayoría de las personas llega a la playa a través del sistema de dunas costeras y concentra la presión sobre las rutas de acceso. La playa y las dunas costeras son zonas de alta movilidad y relativamente resilientes al pisoteo. No obstante, el incremento de presión de los visitantes compacta la arena, lo que provoca la reducción de la densidad vegetal, su capacidad de regeneración y la tasa de crecimiento de la duna costera.

En el caso del ganado, el pisoteo y ramoneo de la vegetación retrasa la regeneración de la duna costera, al eliminar la cubierta vegetal, lo que representa una pérdida de materia orgánica (Ranwell y Boar, 1995). El tránsito de vehículos, por su parte, tiene un impacto mucho mayor, ya que reduce la altura y densidad de la vegetación y compacta la arena mucho más, lo que provoca la degradación de hábitat (Brown y McLachlan, 2002), áreas de anidación, de refugio y alimentación.

La compactación de arena además disminuye el oxígeno accesible a las raíces, junto con la porosidad, permeabilidad y capacidad de infiltración del suelo.

El uso de los vehículos en la playa también produce el fenómeno de trituración de la arena, fragmentándola en trozos aún más pequeños, lo cual favorece más la pérdida de arena de las playas (Bird, 1996), además de que el ruido afecta los patrones de comportamiento de las especies que ahí anidan.

2.5.4. AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR

Uno de los efectos del calentamiento global es la elevación potencial del nivel del mar, debido a la expansión térmica de los océanos. Este fenómeno provoca que zonas costeras bajas sean cada vez más vulnerables a las inundaciones.

Frente al aumento del nivel del mar, las costas de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán, Quintana Roo, Nayarit y Chiapas serían las más afectadas (Magaña y Gay-García, 2004).

El cambio en el nivel del mar determina el nivel local de embate del oleaje y puede provocar la re-distribución de la arena a otras playas (Nordstrom *et al.*, 1990). El ancho de la playa se podría reducir en una cantidad significativa dependiendo de la pendiente de la playa y de la distancia de transgresión del nivel del mar (Hesp, 2002).

Los efectos de cambios en el nivel del mar sobre las dunas costeras consistirían en la erosión de las dunas embrionarias y primarias, que a su vez implicaría la pérdida de la barrera de protección y mayor movilidad de la arena en dirección tierra adentro. En el caso de dunas en islas de barrera, se espera que con un aumento en el nivel del mar las olas circulen libremente por las islas, aplanando la cima de la barrera, con lo que aumenta el riesgo de que sean destruidas por el mar (Villatoro *et al.*, 2010).

La calidad del agua de las hondonadas húmedas de agua dulce podría cambiar a condiciones salobres o saladas, lo que conlleva a que las especies típicas de las hondonadas sean sustituidas por plantas que toleren la salinidad del agua.

Debido al incremento en el nivel medio del mar asociado a la variabilidad climática y al posible efecto del cambio climático, todavía en estudio (Weinkle *et al.*, 2012; Kunkel *et al.*, 2013), el grado de exposición de las dunas será mayor

y su importancia relativa aumentará. Asociado al aumento del nivel del mar, la generación de oleaje y marea de tormenta por huracanes de alta intensidad tienen mayor capacidad de afectar zonas más elevadas de la playa. En este escenario, las especies de plantas de las dunas costeras que están adaptadas a los embates de los huracanes podrán resistir y reproducirse en las nuevas dunas que se formen, pero será necesario tener el germoplasma (semillas) de dichas especies y el espacio físico disponible para que se dé la readaptación del sistema.

PÉRDIDA DE VEGETACIÓN DE DUNAS COSTERAS EN MÉXICO

Los ecosistemas de dunas costeras están bajo una fuerte presión ocasionada por el cambio de uso del suelo, las actividades recreativas, la extracción de arena, la subsidencia y el aumento del nivel del mar, que alteran el balance sedimentario favoreciendo fenómenos de erosión y el retroceso de la línea de costa (Alcamo y Bennett, 2003; Martínez, 2009).

A nivel nacional, la pérdida de vegetación de dunas costeras se ha estimado en 14.2% (259 km²), desde 1976 hasta el 2000 (Seingier *et al.*, 2009). El Golfo de México fue la región que perdió más vegetación con 77 km², que representaron el 18.1% del total que tenía en 1976. Lo anterior se debe principalmente a las actividades agropecuarias, como la ganadería en Veracruz, así como la urbanización para turismo de sol y playa. La región del Pacífico sur presentó una pérdida del 18.9% (58 km²) debido a la construcción de la infraestructura turística y los cocotales de la Riviera del Pacífico. En el Golfo de California se ha perdido el 14.2% (56 km²) por la acuicultura en Sonora y en Baja California Sur por el crecimiento de la zona turística, que se concentra en las costas de la porción continental y en la punta de la península, como en Los Cabos. El 28.4% (44 km²) se perdió en la península de Yucatán por el cultivo de cocotales, las salineras y la expansión de los poblados costeros de Yucatán, especialmente por el crecimiento de nuevas ciudades turísticas en Quintana Roo como Cancún. Finalmente, se perdió el 4.6% (25 km²) en el Pacífico norte principalmente por la construcción (Moreno-Casasola *et al.*, 1998; Martínez, 2009; Seingier *et al.*, 2009).

En las últimas décadas se ha presentado un aumento en población en las zonas costeras de México, con lo cual se ejerce una mayor presión sobre los ecosistemas costeros como las dunas.

2.5.5. EFECTOS A DISTANCIA

Adicionalmente a las amenazas descritas, existen otras que son indirectas y de origen distante, por el desarrollo de obras y actividades y el establecimiento de asentamientos humanos, en las partes altas y medias de las cuencas hidrográficas que provocan la alteración o interrupción de los patrones de circulación de agua, del aporte de nutrientes y de transporte de sedimentos (CONABIO-PNUD, 2009). Estas alteraciones repercuten en el proceso de formación y desarrollo del sistema de dunas, aunque por lo general, sus efectos no son tan evidentes ni inmediatos, pero si pueden llegar a ser de gran magnitud.

Por ejemplo la pérdida de costa en el Delta del Misisipi en los últimos 80 años es de 1,899 km² como consecuencia de la retención de sedimento por presas y por el encausamiento de ríos; el proyecto de rehabilitación propuesto es a 50 años con un costo de 50 mil millones de dólares (<http://www.coastalmasterplan.louisiana.gov/2012-master-plan/final-master-plan/projects-included-in-draft-plan/>).

Otro ejemplo se pudo observar en 2010, cuando hubo un tsunami en Chile y en Cabo Pulmo, BCS. se erosionó la playa y subió el nivel del mar, destruyendo e inundando la primera franja de casas construidas sobre dunas (Franco, 2012).

3. MANEJO DE LAS DUNAS COSTERAS

El manejo de las dunas costeras abarca un conjunto amplio de actividades con las que se pretende mantener la integridad y la funcionalidad de estos ecosistemas dentro de un marco de manejo integral de zona costera. El manejo de las dunas como ecosistemas aislados, ha sido visualizado como la construcción de dunas artificiales, la estabilización de dunas, y el relleno de playas, sin embargo, las prácticas de manejo han cambiado durante las últimas décadas dependiendo del uso al que está sujeto este ecosistema (Moreno-Casasola, 2010). Incluso el conservar las dunas también es una forma de manejo y hoy en día, en muchas partes de México, el manejo que se debe hacer es simplemente conservar lo que funciona adecuadamente.

En general, un buen plan de manejo de dunas debe mantener los elementos y procesos que intervienen en su formación y dinámica natural (Moreno-Casasola, 2004). Además se debe considerar que un ecosistema de dunas que presenta la secuencia completa de etapas sucesionales, albergará mayor diversidad de especies y de hábitat y tendrá una mayor resiliencia (Martínez *et al.*, 2004). Así, por ejemplo, se pueden tener prácticas de manejo que tienen actividades contrastantes, que van desde fomentar un incremento en la cubierta vegetal para estabilizar las dunas, hasta eliminar parcialmente parte de la cubierta vegetal para aumentar el dinamismo del sistema y recuperar la biodiversidad (Martínez *et al.*, 2013). Por otra parte, dado que las dunas forman parte de un sistema de intercambio dinámico de arena con la playa, para asegurar su manejo sustentable es imprescindible que tanto la caracterización del sistema playa-dunas costeras como las estrategias de manejo se hagan al menos a escala de celda litoral, donde se considere el balance sedimentario neto anual del sistema. La celda litoral es una unidad de funcionamiento, ya que una acción que se lleve a cabo en una parte de la celda, repercutirá en otra. Por ejemplo la construcción de un espigón afectará los procesos de sedimentación/erosión en toda la celda.

El balance sedimentario permite predecir los cambios morfológicos que el sistema sufrirá con el tiempo, así como su posible comportamiento en respuesta a las diferentes actividades a las que esté sujeto. El manejo de las dunas costeras debe involucrar la participación de los gobiernos federal, estatal y municipal, en el marco de sus atribuciones, quienes deben promover que se desarrolle bajo procesos participativos e incluyentes, que consideren los intereses de los usuarios de la zona costera y fomenten la apropiación del plan de manejo y su implementación por parte de la comunidad (Moreno-Casasola, 2004).

Sin embargo, uno de los problemas en el manejo de las dunas es que, a diferencia de los manglares que cuentan con regulaciones particulares, las dunas

y las playas aún carecen de instrumentos específicos para su manejo y protección. Comúnmente, se les ve como áreas poco productivas para usos agropecuarios, con suelos pobres en nutrientes, y difícilmente se puede involucrar a las comunidades locales en esquemas de conservación para estos ambientes (Moreno-Casasola, 2004). Con el fin de reconocer su importancia dentro de los ecosistemas costeros dependientes de la sucesión generada por mantener contacto entre el mar y la tierra, se hace necesario que se conjunte el diseño de mecanismos participativos y de educación ambiental específicos con la inclusión de esquemas de fortalecimiento de las comunidades locales (Moreno-Casasola, 2004).

Los programas o acciones de manejo deben iniciar con una caracterización de la estructura y delimitación del ecosistema y de su estado de conservación, así como con un diagnóstico de los agentes de deterioro a nivel regional. Una vez que se han identificado las principales amenazas y estado de degradación del sistema de dunas, es necesario desarrollar una visión a corto, mediano y largo plazo. Un plan de manejo debe contener objetivos, metas, estrategias específicas y acciones para alcanzar dichos objetivos y mantener los resultados. Asimismo, es necesario considerar evaluaciones periódicas de la efectividad del plan (NSW Department of Land and Water Conservation, 2001).

Es importante resaltar que la composición florística y la biodiversidad asociada a las dunas costeras varía de una región a otra (Moreno-Casasola *et al.*, 1998), por lo que en el caso de dunas que presenten características únicas en términos de singularidad paisajística, geomorfológica, biodiversidad y endemismos, el plan de manejo deberá considerar medidas particulares que aseguren su protección.

Las acciones de manejo deben iniciar con la zonificación, mediante la cual se identifican las áreas que se pueden aprovechar, las que se deben proteger y las que requieren ser restauradas. Posteriormente, el desarrollo de actividades y obras deberá regularse a través de criterios específicos para cada zona y para cada elemento del ecosistema de dunas costeras.

3.1. ZONIFICACIÓN

Con base en la caracterización y el diagnóstico iniciales se establece una zonificación del sistema playa-dunas costeras (Moreno-Casasola, 2004).

En un primer paso, se deberán identificar las zonas frágiles, que incluyen las dunas más dinámicas donde son evidentes los procesos de sucesión, las que funcionan como reservas sedimentarias, las que son hábitat de especies endémicas o en alguna categoría de riesgo o las que representan un sitio único

en términos de biodiversidad, singularidad paisajística o geomorfológica. Estas zonas deberán protegerse, aplicando el mayor nivel de restricción para el desarrollo de actividades e infraestructura.

En las zonas más estables con alta capacidad de auto-organizarse, se podrán desarrollar más actividades e infraestructura. Sin embargo, para asegurar el aprovechamiento sustentable de estas dunas se deberá cumplir con regulaciones que permitan mantener la estructura y función de todos los elementos (playa, duna embrionaria, primaria, secundaria y terciaria y la presencia y temporalidad de las lagunas interdunarias), dado que la afectación o pérdida de uno de los elementos tendrá repercusiones en todo el ecosistema.

Cada elemento de las dunas costeras tiene características particulares y juega un papel en la estructura y función del ecosistema. Por ello, es importante considerar que el impacto de las actividades que se desarrollen en cada uno de los elementos va a ser diferente y requiere recomendaciones específicas para su conservación.

Posteriormente, en esta zona de aprovechamiento sustentable se deberá definir la distribución espacial de las actividades, designando áreas específicas para el desarrollo de las diferentes actividades económicas, de recreación y de conservación. Esta zonificación también deberá considerar el gradiente ambiental del perfil de dunas (ver sección de estructura de las dunas costeras) y las condiciones de cada elemento, así como los intereses de los usuarios.

Es necesario recordar que las repercusiones también se producen a lo largo del litoral afectando a los terrenos vecinos. De esta manera, si una obra o actividad que se realice sobre algún elemento de la duna desestabiliza el sistema, las zonas vecinas que se encuentran en la dirección hacia donde corre el viento, se verán afectadas en el corto plazo.

Por último, en la zonificación también deberán identificarse las dunas que presentan un estado de degradación ambiental y que requieren de un proceso de restauración.

La zonificación ayuda a distribuir y regular las actividades humanas conforme a las características, función y condiciones de las dunas, con el objeto de disminuir los impactos, a tener un control de los usuarios, a facilitar el monitoreo de los impactos para poder tomar medidas de mitigación a tiempo y sobre todo, a conservar el ecosistema de dunas costeras (Martínez *et al.*, 2004). Lo anterior es especialmente importante para la conservación en zonas con fuerte presión por el desarrollo turístico, agropecuario (Moreno-Casasola, 2004), urbano y minero.

3.2. RESTAURACIÓN

La restauración de dunas puede tener diversos objetivos, pero el más común es la recuperación de la dinámica costera y del sistema playa-dunas costeras. Las medidas de restauración dependen del nivel y del tipo de degradación y van desde la estabilización, la reconstrucción, el restablecimiento de la cubierta vegetal y la alimentación de arena al sistema playa-dunas costeras, hasta la construcción de las denominadas estructuras de protección (NSW Department of Land and Water Conservation, 2001; Martínez *et al.*, 2013). En ocasiones, con la finalidad de restablecer la dinámica natural del sistema y las especies nativas de dunas, puede ser necesario reactivar el movimiento de la arena eliminando especies sobre-abundantes, con lo cual se incrementa la diversidad y se recuperan todas las etapas sucesionales (Martínez *et al.*, 2013).

La restauración puede requerir mucha inversión y tiempo, especialmente por los estudios necesarios para identificar los problemas o amenazas que afectan el área y seleccionar las acciones y la aplicación de los métodos. Para lograr el éxito del proyecto en el tiempo, se debe asegurar que existe un aporte de arena a la playa por medio del oleaje y mareas y que el aporte de arena por corrientes paralelas a la costa no esté obstruido por espigones o escolleras los cuales generalmente tienen una orientación perpendicular a la línea de costa alterando la dinámica del movimiento de sedimentos. De otra manera, si predomina la erosión, las dunas restauradas tendrán un periodo de vida sumamente corto y será necesario llevar a cabo programas permanentes para mantenerlas, utilizando fuentes externas de sedimentos, y el costo se elevará.

En el caso de las dunas que se forman en los deltas de ríos, estuarios, islas de barrera y en cabos, no se recomienda realizar acciones de restauración debido a que son altamente dinámicas y pueden desaparecer durante una tormenta o inundación, de manera que no existe garantía de que perduren las acciones para estabilizarlas o restaurarlas (NSW Department of Land and Water Conservation, 2001). Sin embargo, cada caso debe ser analizado en particular y valorar lo que se busca proteger o recuperar a través de la restauración.

3.2.1. ESTABILIZACIÓN DE DUNAS

Cuando la arena de la duna llega a invadir infraestructura, como caminos o edificaciones, se utilizan medidas de estabilización para detener el movimiento de la arena. Una práctica común es hacerlo mediante el incremento de la cubierta vegetal que puede combinarse con la instalación de una empalizada para disminuir la velocidad del viento. No obstante, con base en experiencias a

nivel internacional, se recomienda que la fijación de dunas se limite a las dunas primarias, que está dominada por el oleaje y mareas (astronómica y de tormenta), y se realice mayoritariamente con barreras de ramas o pasto nativo (Martínez *et al.*, 2004). No se recomienda el uso de materiales sintéticos (enrejados, cemento o geotextiles) porque a largo plazo pueden generar problemas de erosión y depósito de arena (Martínez *et al.*, 2004; Martínez *et al.*, 2013).

La estabilización de dunas debe realizarse solamente cuando sea necesario (para la protección de infraestructura de interés público), ya que es muy costosa y puede modificar el balance sedimentario.

3.2.2. RECONSTRUCCIÓN DE DUNAS

Cualquier proyecto de restauración requiere un sustrato que permita el establecimiento y sobrevivencia de pastos, arbustos y árboles. En áreas muy degradadas, la restauración puede requerir la reconstrucción física de las dunas, la cual debe considerar las características (formas, tamaño, pendiente y ubicación) de la duna original o la remanente, así como la disponibilidad de arena y las condiciones de los patrones de viento.

En el caso de que exista un aporte natural suficiente de arena, se usa una mezcla de plantas y enrejados paralelos a la costa para que disminuyan la velocidad del viento, sin interrumpir por completo su flujo, lo cual permite la formación de una duna. Si no se cuenta con una reserva sedimentaria, se tendría que usar maquinaria para transportar la arena y construir la duna (Moreno-Casasola *et al.*, 2008). Es importante considerar que hay dunas fósiles cuyo aporte sedimentario puede ya no existir o viene de muy lejos (Rodríguez-Revelo *et al.*, En revisión). También es importante reconocer que si se trata de costas con intensos procesos erosivos, sin aportes de sedimentos, no será posible que las dunas artificiales perduren, ya que eventualmente serán erosionadas.

La presencia de infraestructura construida paralela a la línea de costa sobre parte del ecosistema de dunas costeras puede limitar la reconstrucción sólo a la parte anterior de la duna primaria. En contraste, en áreas donde no existe infraestructura cercana, es posible reconstruir el sistema de dunas completo.

En zonas circunvecinas a la infraestructura de puertos y marinas se recomienda la reconstrucción y fijación de dunas para evitar en lo posible el azolvamiento.

3.2.3. RESTABLECIMIENTO DE CUBIERTA VEGETAL

Para el restablecimiento de la cubierta vegetal, en otros países de latitudes templadas comúnmente se utiliza la especie pionera *Ammophila arenaria* por su gran eficiencia para fijar arena. Sin embargo, en regiones en las que no era originaria, esta planta se ha convertido en especie invasora, provocando la desaparición de especies nativas y la disminución de la diversidad vegetal. Además, al establecerse en la duna primaria, interrumpe el transporte de arena desde la playa a las dunas secundarias y terciarias (Martínez *et al.*, 2004). Lo mismo sucede con *Carpobrotus edulis* conocida como “deditos” en el noroeste de México, cuya erradicación es muy difícil y costosa. Ante estos resultados negativos, en diferentes países se ha optado por utilizar especies nativas para los programas de fijación y estabilización de arena móvil. En el caso del sur de México se recomienda *Canavalia rosea* e *Ipomoea pes-caprae* porque son fáciles de germinar, crecen con un follaje denso relativamente rápido y son formadoras de dunas. También, se ha encontrado que *Abronia maritima* es una fijadora común de dunas del Pacífico, además de *Scaevola plumieri* y *Uniola pittieri*, entre otras.

EJEMPLOS DE ESPECIES FIJADORAS DE DUNAS EN MÉXICO

Sur de México

Canavalia rosea

Ipomoea pes-caprae

Pacífico

Abronia maritima

Scaevola plumieri

Uniola pittieri

Para reforestar es necesario producir una gran cantidad de plantas, de las cuales poco se sabe sobre sus necesidades fisiológicas particulares. Por ello, es necesario que de manera paralela a la restauración, se lleven a cabo experimentos para producir plantas tanto por medio de clonación, como por germinación en viveros *in situ*.

3.2.4. RELLENO DEL SISTEMA PLAYA-DUNAS COSTERAS

La restauración de un sistema playa-dunas costeras por medio de relleno es otra alternativa cuando se tienen problemas de erosión crónica, que provocan la pérdida de playa. El volumen propuesto de relleno, la fuente de sedimentos, el tamaño de grano, la pendiente y las características del oleaje son cinco de los aspectos más importantes que deben ser considerados en una propuesta de relleno. La arena que se utiliza puede provenir de fuentes terrestres, del sistema litoral o de obras de dragado para la construcción y mantenimiento de puertos y restauración de lagunas (llamada también arena de oportunidad). Un problema con esta solución es que se afecta el área que funciona como fuente de material, por lo que es importante que no se utilicen áreas sensibles o de importancia ecológica y económica para extraer la arena y que se establezcan medidas de manera que no se destruya una zona para componer otra.

En todos los casos, la arena deberá presentar características similares a las de la playa a rellenar (en cuanto al tamaño, forma, densidad y composición de los sedimentos) y deberá estar libre de contaminantes (California Department of Boating and Waterways and State Coastal Conservancy, 2002). Por lo anterior, se recomienda realizar los estudios de granulometría, mecánica del sedimento, de concentración de metales pesados, niveles de nutrientes, retención de humedad, salinidad, pH y sulfatos antes de considerar utilizar cualquier tipo de arena para relleno (NSW Department of Land and Water Conservation, 2001). En el relleno de un sistema playa-dunas costeras se recomienda colocar el sedimento en la supraplaya, en las dunas embrionarias y en las primarias; de manera que se cubra desde la base de la duna primaria hasta la profundidad de cierre.

En un relleno de playa, la arena va a ser redistribuida hasta que se alcance un estado estable. Dependiendo de las condiciones locales, una playa que ha sido sujeta a relleno puede tardar desde varios meses hasta años para alcanzar un estado de equilibrio.

Cabe señalar que estas playas generalmente requieren mantenimiento periódico (que implica volver a rellenar), ya que esta medida de restauración no atiende la causa de la erosión, sino que provee una solución temporal. El mantenimiento se puede necesitar en un intervalo que va de dos a diez años (NSW Department of Land and Water Conservation, 2001; California *Department of Boating and Waterways and State Coastal Conservancy, 2002*). La estimación del balance sedimentario neto anual permite establecer las tasas de avance o retroceso de la línea de costa y saber cuándo se requiere el mantenimiento de una playa sujeta a relleno. Por tanto, desde el punto de vista económico se debe pensar en un presupuesto de mantenimiento permanente.

El balance sedimentario anual depende del transporte de sedimentos a la costa; si es negativo, representa erosión del sistema, por lo que eventualmente se presentará un retroceso de la línea de costa (Kamphuis, 2001). Si es positivo existe una ganancia neta de material y existe acreción del sistema. En el caso de que la erosión y la tasa de retroceso de la línea de costa sean muy altas, lo más eficiente es acompañar el relleno con estructuras de protección duras en los extremos de la celda litoral para evitar la pérdida de sedimento hacia el mar. Esto aumentará la eficiencia del relleno, ya que requerirá de menos mantenimiento. Sin embargo, debe considerarse que, al tratarse de sistemas dinámicos complejos, estas estructuras de protección duras pueden resolver el problema de erosión en una zona de la costa, pero como consecuencia de intensificar la erosión en otra costa cercana. Por tanto, los estudios previos a la obra deberán extenderse más allá de la zona de afectación directa, para poder contar con la información necesaria de áreas aledañas que incluyan toda la celda litoral y así poder evaluar el impacto y afectación que se tendría en zonas vecinas.

En la Figura 9 se ilustran cuatro técnicas de reconstrucción de dunas.



El mantenimiento debe venir acompañado de monitoreo, que permita documentar y evaluar si el proyecto de restauración se desempeña conforme a su diseño y objetivos; identificar las necesidades de mantenimiento, y evaluar los impactos del proyecto, incluyendo los producidos en las áreas de préstamo (zona donde se obtiene el sedimento para la alimentación o relleno). El monitoreo debe incluir una evaluación de la estabilidad del relleno a lo largo de todo el perfil (playa-dunas). Éste se debe iniciar antes del relleno, de manera que se documenten las condiciones previas y se establezca una línea base. Después del relleno, el monitoreo debe realizarse periódicamente registrando las estaciones de invierno y verano, además de los efectos por eventos extremos. También debe realizarse un monitoreo de la vegetación para determinar el éxito del programa de restauración, ya que como se dijo con anterioridad, un sistema de dunas costeras saludable incluye la dinámica mutuamente interactiva del binomio vegetación-duna-playa (Martínez *et al.*, 2013).

MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE BALANCE SEDIMENTARIO

Existen varios métodos para determinar el balance sedimentario neto anual en una zona, tales como el monitoreo de la posición de la línea de costa mediante imágenes satelitales, el análisis volumétrico y la medición o modelación numérica de las tasas de transporte. El monitoreo mediante imágenes consiste en la comparación de imágenes satelitales de diferentes años, en las que la línea de costa generalmente se identifica entre la duna frontal y la supraplaya (Peynador y Méndez-Sánchez, 2010). Si la costa avanza hacia el mar, existe una ganancia neta de sedimento del sistema; si retrocede, entonces hay una pérdida neta de sedimento (aunque este método no permite realizar una estimación cuantitativa). El análisis volumétrico, por otra parte, consiste en comparar datos de perfiles de playa y dunas, los cuales permiten estimar con mayor detalle, el volumen de sedimento que se gana o se pierde en la zona. Es importante, que en este último caso, se comparen perfiles medidos en la misma época del año, pues el perfil de playa (incluyendo la duna frontal) cambia dependiendo de la época del año; es más abrupto en temporada de tormentas y de pendiente más suave durante temporada de calma (Silva-Casarín y Mendoza-Baldwin, 2013). Finalmente, a partir de la medición o modelación de las tasas y dirección de transporte, se puede estimar el transporte neto anual, lo cual puede ser un indicador de la ganancia o pérdida sedimentaria del sistema. Este último método conlleva mayores incertidumbres, que están asociadas a las técnicas de medición (que consideran solamente el transporte paralelo a la costa) y a las limitaciones de los modelos, respectivamente (Kamphuis, 2001; US Army Corps Of Engineers, 2002).

3.2.5. CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN

Cuando se presentan problemas de erosión y se tiene pérdida de playa y/o dunas costeras pueden construirse estructuras de protección duras como solución remediativa para reducir la energía del oleaje (velocidad de la corriente) y permitir la sedimentación de arena, como rompeolas y espigones. Sin embargo, éstas deben considerarse como el último recurso para la restauración de un sistema playa-dunas, debido a que pueden acelerar los procesos erosivos en playas adyacentes y provocar la pérdida de oportunidades para desarrollar actividades recreativas. Por lo anterior, sólo se recomienda el uso de estas estructuras en el caso de que se encuentre en riesgo la seguridad de la población o de la infraestructura de interés público o alguna actividad esencial de la actividad económica general de la localidad. En estos casos, se deberá contar con estudios de corrientes marinas para evaluar si se interrumpe el flujo de sedimentos paralelos a la línea de costa y con un programa de mantenimiento que contemple el trasvase de sedimentos periódico.

En condiciones específicas, para la recuperación de la biodiversidad y/o de generación o restablecimiento de condiciones de seguridad costera, puede ser recomendable eliminar la cubierta vegetal, véase por ejemplo (Arens *et al.*, 2012; Martínez *et al.*, 2013). Este tipo de acciones se recomienda cuando sea necesario: (1) eliminar vegetación invasora, (2) estimular el crecimiento de comunidades vegetales con mayor riqueza y/o densidad de especies y/o (3) realizar el relleno de una playa para modificar la configuración física de la(s) duna(s).

3.3. REGULACIÓN DE OBRAS Y ACTIVIDADES

3.3.1. CRITERIOS ECOLÓGICOS

Con base en el contenido de las secciones anteriores, a continuación se presentan disposiciones que servirán como base para que las autoridades federales, estatales y municipales regulen las obras y los proyectos en los ecosistemas de dunas costeras.

Se proponen criterios generales para el manejo del ecosistema de dunas costeras, particulares para cada elemento del ecosistema y específicos para la restauración de un ecosistema de dunas costeras.

CRITERIOS ECOLÓGICOS GENERALES

Criterio ecológico	Sustento técnico
<p>Toda obra o actividad deberá mantener el flujo de sedimento entre las dunas costeras y la playa, así como la cobertura de vegetación nativa que forme dunas, que las colonice y que mantenga la dinámica natural del sistema, incluyendo las dunas móviles, semimóviles y las dunas estabilizadas.</p>	<p>Las dunas costeras son ecosistemas dinámicos que dependen del transporte de sedimentos por el viento y por el efecto combinado de la marea de tormenta, la marea astronómica, y el oleaje. Si se modifican o interrumpen estos procesos naturales se puede alterar el equilibrio dinámico y puede cambiar la estructura y función del ecosistema, afectando la provisión de servicios ambientales.</p> <p>La vegetación es la protección más efectiva para formar, fijar y estabilizar las dunas costeras, por lo que, cualquier actividad que se realice en ellas debe tomar todas las precauciones para mantener la cobertura de vegetación nativa que asegure la estabilidad del sistema.</p>
<p>Cuando se pretenda realizar cualquier obra o actividad en un ecosistema de dunas costeras, se deberán generar estudios regionales que permitan identificar si se trata de un sitio único en términos de biodiversidad y singularidad paisajística o geomorfológica.</p> <p>En caso de tratarse de un ecosistema único a nivel regional, se deberán buscar sitios alternativos para el desarrollo del proyecto, con el fin de mantener estos centros únicos de concentración de especies y sus características paisajísticas o geomorfológicas.</p>	<p>Las dunas (incluyendo las fósiles) con características únicas por ser centros de concentración de especies y por su singularidad paisajística o geomorfológica deben ser protegidas.</p>
<p>Las obras y actividades que son susceptibles de ser desarrolladas en las dunas costeras deberán evitar la afectación de zonas de anidación y de agregación de especies, en particular aquellas que formen parte del hábitat de especies enlistadas en la NOM-059-SEMARNAT-2010. También se recomienda evitar la afectación de los sitios Ramsar, las Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves (AICAS) y las Áreas Naturales Protegidas.</p>	<p>Las dunas costeras proveen de alimento y hábitat de anidación a diversas especies de fauna silvestre, que incluyen aves migratorias (Alcama y Bennett, 2003; Martínez <i>et al.</i>, 2004; Berlanga <i>et al.</i>, 2008; Jiménez-Pérez <i>et al.</i>, 2009) y tortugas marinas.</p> <p>En particular, las especies incluidas en la NOM-059-SEMARNAT-2010 están sujetas a protección especial para propiciar su recuperación y conservación, por lo que es indispensable llevar a cabo acciones para evitar la destrucción, fragmentación o degradación de las condiciones biológicas, químicas y físicas de su hábitat.</p>

	<p>Los sitios RAMSAR y las ANP son sitios de alta prioridad para la conservación, que están sujetos a un manejo especial, con base en lo establecido en el marco legal. Por su parte, las AICAS han sido identificadas por los expertos como sitios prioritarios para las aves en México y son un marco de referencia para atender aquellos ecosistemas que por su importancia deben ser protegidos de impactos y amenazas.</p>
<p>En las playas de anidación de tortugas marinas se deben realizar las siguientes medidas precautorias, conforme a la NOM-162-SEMARNAT-2012:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evitar la remoción de la vegetación nativa y la introducción de especies exóticas en el hábitat de anidación. • Favorecer y propiciar la regeneración natural de la comunidad vegetal nativa y el mantenimiento de la dinámica de acumulación de arena del hábitat de anidación. • Retirar de la playa, durante la temporada de anidación, cualquier objeto movable que tenga la capacidad de atrapar, enredar o impedir el paso de las tortugas anidadoras y sus crías. • Eliminar, reorientar o modificar cualquier instalación o equipo que durante la noche genere una emisión o reflexión de luz hacia la playa de anidación o cause resplandor detrás de la vegetación costera, durante la época de anidación y emergencia de crías de tortuga marina. • Orientar los tipos de iluminación que se instalen cerca de las playas de anidación, de tal forma que su flujo luminoso sea dirigido hacia abajo y fuera de la playa, usando alguna de las siguientes medidas para la mitigación del impacto: <ol style="list-style-type: none"> a) Luminarias direccionales o provistas de mamparas o capuchas. b) Focos de bajo voltaje (40 watts) o lámparas fluorescentes compactas de luminosidad equivalente. c) Fuentes de luz de coloración amarilla o roja, tales como las lámparas de vapor de sodio de baja presión. 	<p>Las tortugas marinas que anidan en las costas de México están incluidas en la NOM-059-SEMARNAT-2010 como especies en peligro de extinción.</p> <p>Las tortugas marinas anidan exclusivamente en playas y son vulnerables en las distintas fases de su proceso de reproducción. El deterioro de las condiciones ecológicas de las playas utilizadas para la anidación y reproducción constituye una amenaza. Entre los principales factores de amenaza se encuentran:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La compactación del suelo que afecta el proceso de anidación. • Las interferencias físicas en playas de anidación que afectan tanto a las hembras reproductoras, como a las crías. • La luz artificial que puede desorientar a las tortugas y las hace vulnerables a la depredación. • La depredación por humanos y por animales domésticos. • La erosión generalizada de las playas, la cual se ve agravada por la extracción diaria de arena o pedazos de coral como consecuencia de las acciones mecánicas y manuales de limpieza de playas. • Los incrementos continuos del ruido antropogénico que pueden causar estrés, sufrimiento, traumatismo y dolor.

- Tomar medidas para mantener fuera de la playa de anidación, durante la temporada de anidación, el tránsito vehicular y el de cualquier animal que pueda perturbar o lastimar a las hembras, nidadas y crías. Sólo pueden circular los vehículos destinados para tareas de monitoreo y los correspondientes para el manejo y protección de las tortugas marinas, sus nidadas y crías.
- En caso de utilizar vehículos para hacer recorridos de monitoreo, éstos deben tener un peso bruto vehicular máximo de 300 kg, la velocidad máxima de circulación debe ser de 20 km/h y utilizar llantas de baja presión (menor a 5 libras por pulgada cuadrada o 35 kPa). La circulación del vehículo debe ser por fuera de la zona de anidación o, en su caso, en una zona donde no se perturbe la integridad de los nidos.

Evitar que la emisión de ruido proveniente de fuentes antropogénicas en las playas o cercanas a las playas sobrepase los siguientes niveles

Horarios	Límites máximos permisibles (dB)
7:00-13:59	58
14:00-19:00	60
19:00-6:59	55

Se deberá evitar la construcción de infraestructura temporal o permanente que interrumpa el aporte de agua a hondonadas húmedas y lagos interdunarios. También se deberá evitar rellenar estas hondonadas con arena, ya sea con fines de nivelación de terreno o para incrementar la superficie de terreno de un predio.

En aquellos terrenos en que las hondonadas son usadas como ojos de agua para dar de beber al ganado, se deberán construir accesos para el ganado, para evitar el deterioro de todo el borde de la hondonada o lago.

Entre las dunas costeras se pueden observar hondonadas húmedas y lagos interdunarios. Ambos se caracterizan por presentar pocos nutrientes y una riqueza de especies alta de anfibios, reptiles y aves acuáticas y especies endémicas de crustáceos en el noroeste de México. Estos humedales dependen del aporte de agua proveniente de la lluvia, de escorrentías y sobre todo del manto freático (Grootjans *et al.*, 2004; Yetter, 2004; Moreno-Casasola, 2006).

Las tuberías de obras de toma y descarga que deban atravesar un sistema de dunas costeras deben colocarse en las zonas de baja elevación y estar enterradas hasta la profundidad de cierre (profundidad a la cual el transporte de sedimentos es nulo) en la parte marina de la playa.

Las zonas adyacentes a las tuberías enterradas deberán restaurarse con vegetación nativa para fijar la arena que se coloca al enterrarlo.

La extracción de arena de las dunas costeras para obtener material de construcción (agregados como arena y grava) o minerales (metales pesados como titanio y ferrita, sílice y cuarzo) sólo se deberá permitir en aquellos casos donde el balance sedimentario neto anual del sistema sea positivo y se cuente con los permisos de las autoridades competentes.

Asimismo, la extracción deberá hacerse fuera de playas con valor ecológico o recreativo y ofrecer sistemas de compensación por daños durante la extracción, ya que las grandes cantidades de arena suelta pueden dispersarse con el viento y afectar terrenos agrícolas y urbanos circunvecinos, además de afectar la estabilidad de la playa.

En todos los casos, se deberá hacer un estudio económico que considere el costo de la pérdida de servicios ambientales por el deterioro del sistema, así como las medidas de mitigación y las de compensación particular para cada caso, ya que la gravedad de los daños es específica.

Se recomienda que la autoridad establezca cuotas, mediante las cuales se asegure que la cantidad que se extraiga no afecte el balance sedimentario neto anual, y que se establezcan periodos de no extracción para permitir la recuperación del sistema.

En ocasiones las tuberías de obras de toma y descarga asociadas al desarrollo de actividades e infraestructura en la zona costera se colocan a través de los sistemas de dunas hacia el mar. La dinámica de la zona costera puede provocar la exposición de las tuberías por efecto de la erosión y la trasgresión del nivel máximo del mar. Las tuberías expuestas pueden actuar como espigones y acelerar la erosión.

La ubicación de las tuberías enterradas hasta la profundidad de cierre reduce la suspensión de material, evita el azolvamiento de la boca de la tubería y aleja la descarga de la zona costera, hacia áreas marinas donde hay mejores condiciones para la dispersión y disolución.

La extracción de arena del sistema playadunas costeras genera erosión, modifica la composición de la arena y provoca la pérdida de vegetación, con lo que se reduce su estabilidad y se afecta a la biodiversidad que forma parte de este ecosistema.

<p>Desde el inicio del proyecto y como parte de la MIA se deben plantear las propuestas de restauración, el movimiento y resguardo de especies vegetales de valor (por ejemplo, las cactáceas) y una estimación de su costo. Una vez que hayan terminado las actividades de extracción, se deben implementar planes de restauración con especies nativas.</p>	
<p>Las playas y las dunas no deben ser utilizadas como depósitos de la arena o sedimentos que se extraen de los dragados que se realizan para mantener la profundidad en los canales de puertos, bocas de lagunas o lagunas costeras.</p> <p>El acceso a la playa con vehículos a través de un ecosistema de dunas deberá limitarse a los caminos ya existentes o a los definidos por la autoridad competente.</p> <p>El tránsito perpendicular a la línea de costa deberá realizarse en las partes bajas de las dunas (valles), evitando hondonadas húmedas o lagos interdunarios.</p> <p>El tránsito paralelo a la línea de costa deberá localizarse fuera de las dunas con vegetación, restringirse a la parte superior de la playa, comprendida entre el techo de la berma y la base de la duna embrionaria. El tránsito no debe alterar, modificar o interrumpir el desarrollo de dunas embrionarias y primarias (<i>NSW Department of Land and Water Conservation, 2001</i>).</p> <p>Se recomienda que el único tipo de vehículos con acceso permitido al sistema playa-dunas sea el de vigilancia, protección civil, investigación científica y conservación biológica, en cuyo caso se deberán utilizar vehículos ligeros con llantas de baja presión (<35kPa o 5.0 PSI; por ejemplo cuatrimotos).</p>	<p>El sedimento extraído por las dragas normalmente es de diferente textura al del sistema playa-dunas costeras. Además, puede contener metales pesados o compuestos tóxicos que se acumulan en el fondo de las lagunas y al quedar expuestos y secarse se dispersan en el sistema por efecto del viento.</p> <p>El tránsito de vehículos en el sistema playa-dunas costeras promueve la compactación de la arena, disminuye la permeabilidad y la capacidad de infiltración, ahuyenta a la fauna y en sitios de anidación, representa un riesgo tanto para los nidos, como para las crías. Asimismo, el tránsito constante de vehículos tritura la arena, fragmentándola en trozos aún más pequeños, lo cual favorece la pérdida de arena (Bird, 1996).</p> <p>El tránsito sobre dunas embrionarias y primarias destruye las geofomas creadas por el viento y las primeras dunas que sirven de protección (<i>NSW Department of Land and Water Conservation, 2001</i>).</p> <p>Un ecosistema de dunas costeras se encuentra estrechamente relacionado con la playa adyacente, por lo que el tránsito de vehículos tiene impactos ecológicos significativos entre la marca de pleamar máxima (supraplaya) y las dunas estabilizadas o terciarias. La actividad biológica es alta en esta área, por lo que el establecimiento y crecimiento de pioneras puede ser interrumpido por el tránsito. Lo anterior altera el desarrollo inicial de las dunas primarias o frontales, que son vitales para la dinámica de todo el sistema de dunas.</p>

<p>Para el desarrollo de actividades recreativas tipo off-road en dunas costeras será necesario que los vehículos se inscriban en el registro que establezca el municipio. Deben ser vehículos ligeros con llantas de baja presión (<35kPa o 5.0 PSI; por ejemplo cuatrimotos).</p> <p>La circulación deberá limitarse a los caminos definidos por la autoridad competente, específicamente para esa actividad.</p> <p>Los caminos para esta actividad deberán elegirse considerando estrategias que minimicen el daño a la vegetación nativa y el daño a la forma de las dunas. Asimismo, se deben evitar la alteración de zonas de anidación y agregación de fauna silvestre y de zonas de descanso para las aves.</p> <p>Para impulsar fondos para restauración de dunas, se deberán buscar pagos por compensación ambiental a los municipios cuyas dunas sean utilizadas para esta actividad.</p>	<p>El uso de vehículos en un sistema playa-dunas costeras provoca el desplazamiento de la arena en pendientes sin vegetación, lo que reduce el tamaño de cresta de las dunas y genera depresiones. Eventualmente, se generan brechas debido a la formación de profundos surcos producto del tránsito de vehículos sobre las crestas. El tránsito de vehículos también provoca la destrucción de la capa superficial que estabiliza al sedimento en las zonas carentes de vegetación.</p> <p>Los principales impactos del tránsito de vehículos en los ecosistemas de dunas, incluyen la perturbación de la vegetación, la afectación de fauna por modificación del hábitat y por generación de ruido y la compactación y trituración de la arena, lo que altera el transporte de sedimento.</p> <p>En el caso particular del uso recreativo de vehículos todo terreno, también se registran impactos asociados a la generación y mal manejo de residuos.</p>
<p>El acceso peatonal a las playas a través de las dunas costeras deberá ser por medio de andadores tipo armadura, de material degradable y prefabricado, piloteado y no cimentado. Los andadores y plataformas que se localicen sobre el sistema de dunas deben elevarse lo suficiente para permitir el crecimiento de la vegetación (al menos un metro de elevación) y el paso de sedimentos y de fauna.</p>	<p>El impacto del tránsito de peatones en dunas costeras es similar al que generan los vehículos, pero en menor magnitud.</p>
<p>En baja densidad, se permitirá la presencia de ganado en las zonas estabilizadas de las dunas costeras, siempre y cuando se mantenga la cobertura de vegetación nativa que asegure la estabilidad del sistema.</p> <p>La presencia de ganado y caballos deberá limitarse a las zonas definidas por la autoridad competente, específicamente para esa actividad.</p>	<p>El tránsito de ganado compacta la arena, destruye la flora nativa y las áreas de anidación de la fauna silvestre.</p> <p>No obstante, el ganado en baja densidad promueve la diversidad vegetal, sobre todo en ausencia de herbívoros, los cuales ya han desaparecido de la mayoría de los sistemas de dunas.</p> <p>Es importante evaluar la capacidad de carga del sistema y determinar la densidad máxima de herbívoros para promover la diversidad y no colapsarla por sobrepastoreo.</p>

CRITERIOS ECOLÓGICOS PARTICULARES A CADA ELEMENTO DE UN ECOSISTEMA DE DUNAS COSTERAS

DUNAS EMBRIONARIAS

Las dunas inmediatas a la playa se conocen como dunas embrionarias o incipientes. Constituyen los primeros montículos de arena y habitualmente carecen de vegetación o pueden presentar una cubierta vegetal no homogénea de especies pioneras y aunque parezcan simples, representan una de las principales fuentes de sedimentos de la playa. Además poseen un alto valor en los procesos de sucesión del ecosistema de dunas costeras y constituyen la primera protección terrestre que reduce la energía del oleaje y de las marejadas.

Criterio ecológico	Sustento técnico
La construcción de infraestructura permanente o temporal debe quedar fuera de las dunas incipientes o embrionarias.	En un sistema playa-dunas costeras, las zonas más dinámicas y vulnerables son las dunas embrionarias y las que se localizan en las islas de barrera. La construcción sobre las dunas embrionarias tiene como consecuencia la destrucción de éstas como reservorios de arena y como barreras naturales contra tormentas e inundaciones costeras. Todo lo que se construya sobre estas dunas eventualmente se verá afectado por el oleaje (marea astronómica y de tormenta), debido a que están en proceso de migración.

DUNAS PRIMARIAS O FRONTALES

Las dunas primarias o frontales se forman a partir de las dunas embrionarias (Psuty 2004). Este tipo de dunas está formado por arena no consolidada, no cuenta con un suelo formado (ya que casi no contienen materia orgánica) y recibe el impacto directo del oleaje asociado al efecto de la marea astronómica y de tormenta (Moreno-Casasola 2006).

Criterio ecológico	Sustento técnico
Con excepción de las dunas con alto valor ecológico y geomorfológico, las cuales deberán permanecer inalteradas por el establecimiento de infraestructura permanente o temporal o cualquier tipo de actividad que ponga en peligro su riqueza, en las dunas primarias podrá haber construcciones de madera o material degradable y piloteadas (p.e. casas tipo palafito o andadores), detrás de la cara posterior del primer cordón y evitando la invasión sobre la corona o cresta de estas dunas. El pilotaje deberá ser superficial (hincado a golpes), no cimentado y deberá permitir el crecimiento de la vegetación, el transporte de sedimentos y el paso de fauna, por lo que	La fragmentación de un ecosistema de dunas costeras limita su capacidad para proveer protección. En un sistema playa-dunas costeras, las zonas más dinámicas y vulnerables son la supraplaya, las dunas embrionarias, las dunas primarias y las que se localizan en las islas de barrera. El establecimiento de infraestructura permanente sobre las dunas embrionarias y primarias genera cambios en la estructura y función del sistema y, en consecuencia, éstas podrían dejar de funcionar como reservorios de arena y como barreras naturales contra tormentas e inundaciones. Dado que estas dunas son

se recomienda que tenga al menos un metro de elevación respecto al nivel de la duna. Esta recomendación deberá revisarse en regiones donde hay fuerte incidencia de huracanes, ya que en estas áreas constituyen un sistema importante de protección, por lo que se recomienda, después de su valoración específica, dejar inalterada esta sección del sistema de dunas.

Es importante recordar que en escenarios de erosión de playas y de cambio climático como los actuales, hay un avance del mar sobre la tierra, por lo que, mientras más atrás se construya la infraestructura, más tiempo tardará en verse afectada.

Se deberá evitar la construcción en zonas de: (1) riesgo para la población, (2) alta vulnerabilidad, y (3) donde se forman en los deltas de ríos, estuarios, islas de barrera y en cabos. Las zonas de riesgo para la población en ecosistemas de dunas costeras son aquellas susceptibles a inundarse por avenidas continentales donde las dunas funjan como barrera o dique que limite el drenaje.

móviles, lo que se construya sobre ellas, eventualmente se verá afectado por el oleaje y las mareas, debido a la pérdida de playa por erosión. Los efectos podrán variar también dependiendo de la ubicación específica de la infraestructura en estas dunas. Los impactos más severos se presentan cuando se realiza una nivelación de dunas primarias, con lo que se pierde la capacidad del sistema de almacenamiento de arena y amortiguamiento (Figura 7).

Las dunas que se forman en los deltas de ríos, estuarios, islas de barrera y en cabos, debido a que son altamente dinámicas pueden desaparecer durante una tormenta o inundación, de manera que no existe garantía de que las acciones para estabilizarlas o restaurarlas perduren (NSW Department of Land and Water Conservation, 2001).

DUNAS SECUNDARIAS

Tierra adentro, las dunas que se encuentran detrás de las dunas primarias o frontales se conocen como dunas secundarias (Hesp, 2002).

Criterio ecológico

Con excepción de las dunas con alto valor ecológico y geomorfológico, las cuales deberán permanecer inalteradas por el establecimiento de infraestructura permanente o temporal o cualquier tipo de actividad que ponga en peligro su riqueza, en las dunas secundarias que se ubiquen en sitios expuestos y tengan material no consolidado, las construcciones sólo podrán ser de madera o material degradable y piloteadas, ubicadas detrás de la cara posterior del primer cordón.

El pilotaje deberá ser superficial (hincado a golpes) y no cimentadas.

En toda construcción la orientación de las edificaciones deberá disminuir la superficie de choque del viento, con base en los estudios de vientos correspondientes.

Sustento técnico

Las construcciones pueden ser obstáculos que interrumpen o desvían el flujo de agua y sedimentos, lo que modifica el balance sedimentario (Alcamo y Bennett, 2003; Martínez, 2009). La disminución de la disponibilidad de sedimento y la interrupción del transporte natural entre las dunas costeras y la playa favorece procesos de erosión y retroceso de la línea de costa.

<p>En dunas secundarias que se encuentren en sitios protegidos físicamente, donde se presente suelo desarrollado, material consolidado y pendiente menor a 20° se permitirá la construcción de infraestructura permanente.</p> <p>En grandes dunas (mayores a 6 metros) con cobertura vegetal menor al 90% no se deberá permitir la construcción de infraestructura que ponga en riesgo su estabilidad.</p> <p>Siempre deben realizarse o analizarse estudios del sistema considerando los tipos de dunas y de vegetación para determinar la densidad y tipo de construcciones, ya que los impactos que se generen serán distintos en un sistema de dunas de 5 metros de alto y uno de médanos de 25 metros. En estos últimos, debido a la gran cantidad de arena, debe analizarse el impacto que puede tener la obra si desestabiliza el sistema y lo que se afectará en zonas vecinas.</p>	<p>En grandes dunas alimentadas esencialmente por el transporte eólico que no tenga suelo bien consolidado el riesgo de deslave es alto.</p> <p>Las dunas secundarias en sitios abrigados presentan una dinámica más estable y material más consolidado que en las primarias, por lo que la infraestructura que construya en este tipo de dunas tendrá menor riesgo de inundación costera y de interrumpir el transporte de sedimento.</p> <p>Cuando se elimina la cubierta vegetal la arena vuelve a estar en movimiento, poniendo en riesgo la infraestructura.</p>
--	---

DUNAS TERCIARIAS

Son los elementos más estables de las dunas costeras, ya que presentan suelo y vegetación más desarrollados. De esta manera, en las dunas terciarias de las zonas tropicales se pueden observar matorrales, selvas o bosques (Moreno-Casasola, 2006), mientras que en las zonas desérticas se encuentran matorrales densos o abiertos, árboles como los mezquites, y otras especies crasas o suculentas típicas de desierto. En algunos casos, en zonas desérticas puede haber grandes superficies que nunca se cubren por completo de vegetación.

Criterio ecológico	Sustento técnico
<p>Con excepción de las dunas con alto valor ecológico y geomorfológico, las cuales deberán permanecer inalteradas por el establecimiento de infraestructura temporal o permanente o cualquier tipo de actividad que ponga en peligro su riqueza, en las dunas terciarias podrá haber construcciones permanentes condicionadas a ocupar únicamente la zona donde se presenta material consolidado, suelo desarrollado y pendiente menor a 20°.</p> <p>La alteración máxima en estas áreas deberá garantizar la potencial recuperación del sistema.</p> <p>En grandes dunas (mayores a 6 metros) con cobertura vegetal menor al 90% no se deberá permitir la construcción de infraestructura que ponga en riesgo su estabilidad.</p> <p>La orientación de las edificaciones deberá disminuir la superficie de choque del viento, con base en los estudios de vientos correspondientes.</p>	<p>Las construcciones representan obstáculos que interrumpen o desvían el flujo de agua, viento y sedimentos, lo que modifica el balance sedimentario (Alcamo y Bennett, 2003; Martínez, 2009). Sin embargo, cuando éstas se encuentren en zonas protegidas el efecto sobre el balance sedimentario será menos significativo.</p> <p>En grandes dunas alimentadas esencialmente por el transporte eólico que no tenga suelo bien consolidado, el riesgo de deslave es alto.</p> <p>En estas zonas pueden desarrollarse ecosistemas como matorrales costeros, selvas tropicales y palmares, de gran importancia ecológica y con especies protegidas por la NOM-059-SEMARNAT-2010.</p>

<p>Las construcciones permanentes deberán localizarse detrás de las crestas de la duna. Siempre deben realizarse o analizarse estudios del sistema considerando los tipos de dunas y de vegetación para determinar la densidad y tipo de construcciones, ya que los impactos que se generen serán distintos en un sistema de dunas de 5 metros de alto y uno de médanos de 25 metros. Por tener un sustrato arenoso con susceptibilidad de ser movido por el viento, debe planificarse el tiempo de construcción procurando que se realice en secciones y se ejecute inmediatamente después del desmonte. Ello evitará que las áreas en las que se retiró vegetación se inicie el proceso de movimiento de arena. Deberá mantenerse la conectividad del sistema a través de corredores biológicos para animales, ya que éstos hacen uso de diversos ecosistemas costeros y requieren áreas de vegetación natural y conservada para trasladarse. Identificar especies protegidas y considerar el programa de rescate de fauna y flora.</p>	<p>Cuando se elimina la cubierta vegetal la arena vuelve a estar en movimiento, poniendo en riesgo la infraestructura humana. Una cubierta vegetal es lo que mantiene la duna estabilizada. Cuando ésta se altera y no se toman medidas, puede producirse un desbalance e iniciar un proceso de desestabilización.</p>
<p>La construcción de campos de golf en zonas con presencia de dunas costeras deberá aprovechar los rasgos naturales del paisaje. Se debe evitar la afectación de dunas embrionarias y primarias y la nivelación de dunas secundarias y terciarias. Los campos de golf deberán cumplir con los siguientes requerimientos:</p> <ol style="list-style-type: none"> Para mantener o en su caso reforestar las zonas adyacentes a las pistas (roughs) se deberán usar especies nativas Los lagos artificiales deberán estar totalmente aislados del manto freático, hondonadas húmedas y lagos interdunarios mediante la instalación de materiales impermeables fáciles de remover Deberán cumplir con los criterios generales del uso y protección establecidos en este documento <p>Además se recomienda considerar lo establecido en el proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-140-SEMARNAT-2005 que establece los requisitos ambientales generales para campos de golf y desarrollos inmobiliarios que los incluyan.</p>	<p>La construcción y operación de los campos de golf conlleva modificaciones irreversibles en la orografía o topografía del paisaje, tanto del terreno ocupado como de las áreas adyacentes. Esto puede provocar la pérdida de biodiversidad, por la degradación y/o destrucción de hábitat. Las especies vegetales nativas son sustituidas por especies introducidas, que en muchos casos son genéticamente modificadas. Las técnicas modernas de mejora al césped de las dunas costeras, con fertilizantes e irrigación destruyen la cubierta vegetal original de la duna costera y promueven el establecimiento de vegetación vulnerable a la inundación de agua salada y a la sequía. La infiltración de agua en la arena de las dunas es muy rápida, por lo que hay que considerar que existe el riesgo de que el agua con fertilizantes y agroquímicos provenientes del mantenimiento de campos de golf pueden llegar hasta el manto freático contaminándolo, por lo que deberán ubicarse los acuíferos y determinar</p>

	<p>el impacto que tendrá el campo de golf en la calidad del agua contenida en el acuífero, así como en los flujos subterráneos y en los ecosistemas de humedales adyacentes a las dunas.</p>
<p>DUNAS COSTERAS EN ISLAS DE BARRERA</p>	
<p>Las dunas costeras que se localizan en barras arenosas o islas de barrera son de los rasgos costeros más dinámicos de la costa, y las únicas zonas estables son los macizos rocosos consolidados.</p>	
<p>Criterio ecológico</p>	<p>Sustento técnico</p>
<p>No se recomienda la construcción de infraestructura permanente, ni estructuras de protección, en las zonas inestables de dunas costeras de islas de barrera. Toda construcción en las zonas estables (macizos rocosos) deberán observar los criterios propuestos en este documento, dependiendo del elemento del que se trate (duna embrionaria, primaria, secundaria y terciaria).</p>	<p>Las dunas costeras que se localizan en barras arenosas o islas de barrera son de los rasgos costeros más dinámicos de la costa.</p> <p>Las islas de barrera pueden tener sustrato rocoso consolidado en algunas zonas, lo que les da estabilidad. En estas zonas es donde se puede permitir la construcción. Las zonas más inestables son aquellas que se caracterizan por un estrechamiento de la barra y un nivel de elevación más bajo, como los sitios de apertura temporal de brechas o bocas y los puntales o salientes de arena (p.e. esteros). Las zonas más angostas de una isla de barrera son susceptibles a su rompimiento en eventos de tormentas, como ciclones tropicales muy intensos.</p> <p>En el caso de que no cuente con un sustrato rocoso, la barra es muy inestable y se mueve constantemente (barra migratoria), por lo que no se recomienda que se establezca infraestructura permanente en ellas.</p>
<p>No se recomienda la extracción de arena de cualquier ecosistema de dunas costeras en islas de barrera</p>	<p>El transporte litoral alimenta a la misma isla de barrera, por lo que si se altera la cantidad de sedimento se puede afectar a todo el sistema de dunas y lagunar.</p>

CRITERIOS ECOLÓGICOS ESPECÍFICOS PARA RESTAURACIÓN DE UN ECOSISTEMA DE DUNAS COSTERAS.

Criterio ecológico	Sustento técnico
<p>El restablecimiento o incremento de la cubierta vegetal con fines de restauración, solamente se podrá realizar con especies nativas y germoplasma de la región.</p> <p>La restauración también considera la necesidad de remover especies sobreabundantes (invasoras) que deterioran la biodiversidad del paisaje.</p> <p>La restauración puede requerir como primer paso la construcción o recuperación de la topografía y pendientes del sistema de dunas.</p>	<p>Una especie no originaria puede convertirse en especie invasora, desplazando a especies nativas. Además, por su crecimiento, reproducción y dispersión se puede extender en la duna frontal y puede interrumpir el aporte de arena desde la playa a las dunas traseras.</p> <p>El perfil topográfico de una duna responde a la dinámica entre las plantas, la arena y los vientos. Mientras más se parezca la duna que se está restaurando (en cuanto a su topografía y vegetación) a las que existieron previamente o a las vecinas, mayor probabilidad de éxito tendrá la restauración y más estable será el sistema en el tiempo.</p>
<p>La estabilización de dunas se deberá realizar solamente si se determina la necesidad de detener la arena en movimiento, para evitar una situación de riesgo para la población por la afectación a infraestructura de interés público. En caso de considerar necesaria la estabilización, ésta debe hacerse bajo las siguientes consideraciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Puede combinarse el restablecimiento o incremento de cubierta vegetal nativa con la instalación de una empalizada o valla, que disminuya la velocidad del viento. • Para la empalizada o valla solo podrán emplearse materiales naturales de la región y no se deberá permitir el uso de materiales sintéticos (enrejados o cemento) • La fijación de dunas se deberá limitar a las dunas primarias. • La reforestación de las dunas con especies leñosas deberá obedecer a necesidades de usos de las poblaciones rurales. Para incrementar la cobertura de especies leñosas deberán usarse especies nativas arbóreas de la zona, que ya habiten las dunas y siempre sobre zonas que ya están estabilizadas con especies herbáceas nativas. 	<p>La estabilización de dunas no es la estrategia de restauración más adecuada, ya que la movilidad es parte de la dinámica natural de la duna y su estabilización altera el movimiento del sedimento por el viento, los patrones de erosión y el balance sedimentario.</p> <p>La fijación de arena con barreras de ramas o pasto nativo no tiene consecuencias ecológicas negativas, mientras que el uso de materiales sintéticos puede generar a largo plazo más problemas de los que se pretenden resolver.</p> <p>La estabilización de las dunas primarias crea una reserva de arena que puede contribuir al restablecimiento del equilibrio sedimentario costero y a la recuperación de la formación natural que actuaba como protección frente a la acción del viento.</p>

<p>El relleno de playas deberá realizarse con arena que tenga una composición y granulometría similar a la de la playa que se va a rellenar. Por ello, se recomienda realizar análisis de concentración de metales pesados, niveles de nutrientes, retención de humedad, salinidad, pH y sulfatos, y de velocidad de infiltración de agua para asegurarse que la arena de relleno tiene la misma capacidad de infiltración que la arena del sitio.</p> <p>Preferentemente se deberá utilizar arena proveniente de fuentes terrestres o del sistema litoral, antes de considerar el uso de arena de oportunidad.</p> <p>Deben realizarse estudios para determinar el impacto de la remoción de arena.</p>	<p>La arena de oportunidad puede presentar un pH bajo, contenido potencial de sulfatos y minerales pesados, ser más duro en condiciones secas, no retener suficiente humedad para el crecimiento de plantas y ser químicamente infértil (NSW Department of Land and Water Conservation, 2001).</p> <p>Si se utiliza una arena más fina que la que tiene la playa a rellenar, ésta va a erosionarse más rápido que la arena original. Si se rellena con una arena más gruesa, la restauración de vegetación puede ser más difícil, debido a que el incremento en la porosidad aumenta el drenaje y puede causar problemas de retención de humedad y nutrientes.</p>
<p>Sólo se recomienda la construcción de estructuras de protección (muros, espigones, rompeolas) en los casos en que se encuentre en riesgo la seguridad de la población o de infraestructura de interés público. La protección de inversiones económicas particulares, derivadas de un mal manejo de la zona costera no debe considerarse de interés público, pues además afectarán a los vecinos y actividades colindantes.</p> <p>En caso que su construcción sea autorizada, el tipo, diseño y orientación de la estructura debe considerar la tasa de transporte litoral y eólico, así como la evaluación de la cotas de inundación asociada al efecto combinado del ascenso del nivel del mar por oleaje, marea de tormenta, marea astronómica y eventualmente de tsunamis.</p> <p>La construcción de estructuras de protección deberá favorecer la preferencia de estructuras paralelas a la playa separadas de la costa y sumergidas, que reduzcan la velocidad de la corriente y permitan la sedimentación de arena sin interrumpir su flujo, como rompeolas de geotextil o arrecifes artificiales de preferencia.</p> <p>Asimismo, se deberá contar con un programa de mantenimiento que contemple el trasvase periódico de sedimentos.</p>	<p>Las técnicas de retención de arena por medio de estructuras rígidas pueden tener efectos no deseados como la erosión acelerada en playas adyacentes y la consecuente pérdida de oportunidades para desarrollar actividades recreativas (California Department of Boating and Waterways and State Coastal Conservancy, 2002).</p> <p>Por lo anterior, sólo se recomienda su uso en caso en que se demuestre que, de no utilizarlas, está en riesgo la seguridad de la población o de infraestructura de interés público.</p> <p>Las estructuras costeras siempre se colocan en asociación a infraestructura terrestre, por lo que se debe de utilizar un enfoque integral al definir regulaciones.</p>

3.3.2. ESTRATEGIAS A IMPLEMENTAR POR EL GOBIERNO

En el proceso de elaboración de este documento se identificaron vacíos de información que limitan el manejo del ecosistema de playa-dunas costeras. Por ello, en esta sección se describen las estrategias y acciones que requiere emprender la autoridad para subsanar estos vacíos. En el desarrollo de las estrategias deberán participar los tres órdenes de gobierno, de acuerdo a sus atribuciones y competencias. Las estrategias se dividen en estudios específicos y en acciones de manejo.

3.3.2.1. ESTUDIOS ESPECÍFICOS

Las autoridades deberán realizar un inventario de sitios que presentan ecosistemas de dunas costeras en el territorio del municipio o estado, según corresponda. Esto permitirá el diseño de criterios más específicos que atiendan las particularidades locales y regionales.

- Identificación de celdas litorales en aquellas zonas de dunas, donde el aporte sedimentario por ríos y el transporte litoral tenga la probabilidad de ser interrumpidos por obras o actividades.
- Identificación de zonas donde ya se presentan problemas de erosión, donde el uso de estructuras costeras tiende a incrementarse con el tiempo.

En cada uno de los ecosistemas de dunas costeras identificados, las autoridades deberán realizar una caracterización y un diagnóstico, que incluya:

- La identificación y delimitación de sus elementos: duna embrionaria, primaria, secundaria, terciaria, hondonadas húmedas, lagos interdunarios, así como las actividades que se desarrollan en cada uno de ellos.
- El conocimiento de los procesos naturales y la dinámica particular del ecosistema, como el flujo de viento, el aporte de sedimento, el balance sedimentario y la dinámica de la vegetación. La identificación de dunas que, por sus características, representan centros únicos de concentración de especies.
- El listado de plantas señalando cuales se encuentran en la NOM-059-SEMARNAT-2010, así como una descripción de las comunidades vegetales por microambiente.
- La identificación de zonas de anidación y hábitat críticos de especies prioritarias, principalmente aquellas enlistadas en la NOM-059-SEMARNAT-2010.

- La identificación de los sitios prioritarios para la conservación establecidos por CONABIO-TNC-CONANP (2007) que incluyan ecosistemas de dunas costeras y aquellos que en otra escala resulten emergentes por la amenaza de una construcción o extracción minera.
- La identificación de barras arenosas o islas de barrera, delimitando la presencia de macizos rocosos, que son las zonas estables, así como las barras inestables que carecen de sustrato rocoso.

Es recomendable considerar la incorporación de este estudio en los programas o estrategias estatales y municipales de adaptación al cambio climático.

3.3.2.2. ACCIONES DE MANEJO

Como se señaló anteriormente, las acciones de un plan de manejo de ecosistemas de dunas costeras incluyen: 1) la zonificación y regulación de las actividades humanas y 2) la restauración. La primera tiene un carácter preventivo y su objetivo es el mantenimiento de los procesos naturales involucrados en el funcionamiento y estructura de estos ecosistemas. Además es la opción de manejo menos costosa, con resultados inmediatos y con permanencia a largo plazo, por ello siempre será preferible elegir esta opción de manejo.

Por su parte, la restauración tiene carácter correctivo y se realiza para recuperar la playa o las dunas costeras. Generalmente son opciones muy costosas y temporales, que se requieren como resultado de no haber implementado una zonificación y regulación de actividades que garantizaran la integridad del ecosistema. Una de las dificultades que se debe afrontar, es el escaso conocimiento de las formas de reproducción de las especies de dunas, por lo que cada proyecto debe experimentar con las especies nativas y generar conocimiento nuevo para fines de restauración. En los casos que se realicen acciones de restauración, es recomendable que se documente y así generar conocimiento biológico y ecológico básico de las especies.

Con base en el inventario y estudios de caracterización y diagnóstico, las autoridades competentes deberán desarrollar una visión a corto, mediano y largo plazo para diseñar el plan de manejo, considerando que las actividades que se desarrollen no deberán modificar significativamente o interrumpir los procesos naturales y la dinámica particular de los ecosistemas de dunas costeras. Es importante que en todo momento las autoridades competentes analicen el efecto acumulativo y sinérgico de las actividades que se realizan en los ecosistemas de dunas costeras inventariados y que queden reflejadas en la zonificación y el plan de manejo.

El plan de manejo deberá identificar y delimitar las zonas en las que, por su importancia ecológica, se deberán limitar el acceso y las actividades. Entre éstas se encuentran los sitios prioritarios para la conservación, las zonas de anidación, hábitats críticos de especies enlistadas en la NOM-059-SEMARNAT-2010, dunas que representen centros únicos de concentración de especies y reservas sedimentarias.

La cantidad de visitantes al ecosistema de dunas costeras deberá definirlo la autoridad competente por medio de estimaciones de capacidad de carga, para lo cual pueden emplearse métodos que se han utilizado para este fin en senderos turísticos.

Como parte del plan de manejo se deberán definir accesos y caminos para peatones, caballos y vehículos. En el caso de estos últimos, se deberán establecer límites de velocidad, horarios y cierres temporales al tránsito de vehículos. Asimismo, se deberá establecer a nivel estatal un programa que contemple la delimitación de las zonas donde se pueden realizar este tipo de actividades todo terreno y un programa para la divulgación de estas medidas y para el mantenimiento de señalamientos.

Con el fin de mantener un control de la intensidad del tránsito de vehículos todo terreno (*off-road*), el municipio deberá establecer las siguientes acciones:

- Expedir un reglamento de operación en ecosistemas de dunas.
- Definir el tipo de vehículos que pueden transitar por las dunas, los cuales en ningún caso deben superar a los establecidos en el Cuadro 1 “Criterios Ecológicos Generales”.
- Implementar un sistema de registro y expedición de permisos para vehículos utilizados en la prestación de servicios turísticos y uso recreativo.
- Definir caminos a los que deberá restringirse el tránsito.
- Implementar un plan de restauración de las zonas afectadas por el tránsito, que considere el uso de especies nativas.

Por otro lado, si existen varios proyectos de acuacultura, el municipio deberá recomendar el uso compartido de canales de alimentación, entre varias granjas, en vez de que cada granja construya el suyo.

Finalmente, las autoridades deberán diseñar una estrategia para dar a conocer a las instancias responsables de autorización de obras y actividades para su aplicación los resultados de los estudios, los nuevos criterios ecológicos que defina, así como las acciones que deriven de las estrategias anteriores.

3.3.3. CONSIDERACIONES PARA SU APLICACIÓN

El objetivo final de este documento es que los criterios y las estrategias sean aplicados por los tres órdenes de gobierno en el ejercicio de sus funciones, conforme a sus respectivas atribuciones.

Cabe señalar que el uso y la redacción de los criterios y las estrategias se deberán adaptar, dependiendo de las atribuciones de cada orden de gobierno de regular en ciertos territorios y materias.

A continuación se presenta un resumen general de algunas de las atribuciones asignadas a cada orden de gobierno en diversas materias relacionadas con la planeación y regulación de actividades y obras en las dunas costeras.

Federación	
<p>La evaluación del impacto ambiental de las siguientes obras o actividades, entre otras:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Exploración, explotación y beneficio de minerales y sustancias reservadas a la Federación. • Cambios de uso del suelo de áreas forestales, así como en selvas y zonas áridas. • Desarrollos inmobiliarios que afecten los ecosistemas costeros. • Obras y actividades en humedales, manglares, lagunas, ríos, lagos y esteros conectados con el mar, así como en sus litorales o zonas federales. • Obras y actividades en áreas naturales protegidas de competencia de la Federación. 	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y su Reglamento en Materia de Impacto Ambiental.
La regulación y el control de las actividades consideradas como altamente riesgosas, y de la generación, manejo y disposición final de materiales y residuos peligrosos.	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.
La regulación de las actividades relacionadas con la exploración, explotación y beneficio de los minerales, substancias y demás recursos del subsuelo que corresponden a la nación, en lo relativo a los efectos que dichas actividades puedan generar sobre el equilibrio ecológico y el ambiente.	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.
La formulación, expedición, ejecución y evaluación de los programas de ordenamiento ecológico marino.	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y su Reglamento en Materia de Ordenamiento Ecológico.

La reglamentación de la conservación y aprovechamiento sustentable de la vida silvestre y su hábitat.	Ley General de Vida Silvestre .
La identificación de las especies y poblaciones en riesgo y la determinación de especies y poblaciones prioritarias para la conservación.	Ley General de Vida Silvestre.
La atención de los asuntos relativos al manejo, control y remediación de problemas asociados a ejemplares y poblaciones que se tornen perjudiciales.	Ley General de Vida Silvestre.
La emisión de la concesión para la extracción de materiales pétreos localizados dentro de los cauces de las aguas nacionales y en sus bienes públicos inherentes.	Ley de Aguas Nacionales.
La definición y aplicación de las regulaciones del uso del suelo en terrenos forestales y preferentemente forestales.	Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable.
La expedición, por excepción, de las autorizaciones de cambio de uso del suelo de los terrenos forestales, así como controlar y vigilar el uso del suelo forestal.	Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable.
Expedir títulos de concesión y de asignación mineras, al igual que resolver sobre su nulidad o cancelación o la suspensión e insubsistencia de los derechos que deriven de las mismas.	Ley de Minas.
Lo relacionado a la delimitación uso, desarrollo, administración, control y vigilancia de las playas, la zona federal marítimo terrestre y los terrenos ganados al mar, o a cualquier otro depósito que se forme con aguas marítimas.	Reglamento para el uso y aprovechamiento del mar territorial, vías navegables, playas, zona federal marítimo terrestre y terrenos ganados al mar.
Estados	
El establecimiento, regulación, administración y vigilancia de las áreas naturales protegidas previstas en la legislación local.	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.
La regulación de los sistemas de recolección, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos e industriales que no estén considerados como peligrosos.	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.
La formulación, expedición y ejecución de los programas de ordenamiento ecológico del territorio regionales.	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

La evaluación del impacto ambiental de las obras o actividades que no se encuentren expresamente reservadas a la Federación, por la presente Ley y, en su caso, la expedición de las autorizaciones correspondientes, de conformidad con lo dispuesto por el Artículo 35 BIS 2 de la LGEEPA.	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.
La formulación, aprobación y administración del programa estatal de desarrollo urbano, así como evaluar y vigilar su cumplimiento.	Ley General de Asentamientos Humanos.
La emisión de autorizaciones para la exploración, explotación y beneficio de minerales o sustancias no reservadas a la federación (materiales pétreos y explotación cielo abierto de productos derivados de la descomposición de las rocas) .	Leyes ambientales estatales.
Municipios	
La prevención y control de los efectos sobre el ambiente ocasionados por la generación, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos e industriales que no estén considerados como peligrosos.	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.
La formulación y expedición de los programas de ordenamiento ecológico local del territorio.	Ley General del Equilibrio Ecológico y la .Protección al Ambiente
La formulación, aprobación y administración de los planes o programas municipales de desarrollo urbano, de centros de población y los demás que de éstos deriven, así como la evaluación y vigilancia de su cumplimiento.	Ley General de Asentamientos Humanos.
La regulación, control y vigilancia de las reservas, usos y destinos de áreas y predios en los centros de población.	Ley General de Asentamientos Humanos.
La expedición de las autorizaciones, licencias o permisos de uso de suelo, construcción, fraccionamientos, subdivisiones, fusiones, retotificaciones y condominios, de conformidad con las disposiciones jurídicas locales, planes o programas de desarrollo urbano y reservas, usos y destinos de áreas y predios.	Ley General de Asentamientos Humanos.

4. GLOSARIO

Balance sedimentario neto anual: es la cantidad de sedimento que se deposita y erosiona en una playa durante un ciclo anual. Éste permite estimar la tasa de retroceso de la línea de costa. Conocer el balance sedimentario permite predecir los cambios morfológicos que el sistema sufrirá con el tiempo, así como su posible comportamiento en respuesta a las diferentes actividades a las que esté sujeto.

Barján: duna con planta en C o de media luna. Son dunas que se dan en zonas de suministro de arena limitado y superficie dura, plana y carente de vegetación.

Berma: cambio en la pendiente o escalón de la supraplaya paralelo a la línea de costa, originado por el depósito de sedimentos producto de la acción de las olas.

Cambio eustático del nivel del mar: Cambio en el nivel medio mundial del mar provocado por una alteración del volumen de los océanos en todo el mundo, a raíz de cambios en la densidad del agua o de su masa total. Cuando se habla de cambios a escalas temporales geológicas, este término incluye a veces cambios en el nivel medio del mar causados por la alteración de la forma de las cuencas oceánicas

Celda litoral: compartimento de la costa que es independiente en términos de transporte sedimentario de los compartimentos adyacentes. La celda litoral se caracteriza por tener sus propias fuentes y sumideros de sedimento, así como por estar delimitada por rasgos geomorfológicos como puntas rocosas o bocanas.

Duna barjanoide: forma intermedia entre los barjanes aislados y extensiones de dunas transversales.

Duna en estrella o piramidal: colina aislada con varias crestas que parten de la cima. Se forman cuando hay direcciones del viento variables y grandes cantidades de arena.

Duna fósil: en términos geológicos, una duna antigua. Las cuales presentan cierto grado de consolidación.

Duna longitudinal: duna alargada y rectilínea formada más o menos paralela al viento predominante la cantidad de arena presente es abundante.

Duna parabólica: con forma de U, sus extremos apuntan en dirección contraria al viento (al revés que el barján). Típicas de las zonas de costa y donde la

vegetación cubre parcialmente la tierra en el interior de la media luna suele formarse una pequeña olla de depresión.

Duna transversal: largas crestas separadas por depresiones orientadas con ángulos rectos respecto al viento que posee dirección constante. Se dan en lugares donde la acumulación de arena cubre por completo el suelo y ésta es abundante.

Horizonte A.- capa del suelo formada en la superficie, con mayor porcentaje de materia orgánica (transformada) que los horizontes situados debajo. Típicamente de color gris oscuro, más o menos negro, pero cuando contiene poca materia orgánica (suelos cultivados) puede ser claro.

Infraestructura permanente: construcciones y desarrollos con cimientos de concreto

Infraestructura temporal: construcciones de material degradable no permanente como madera y palmas.

Isla de barrera: depósito sedimentario paralelo a la línea de costa que se forma cuando el sedimento que es transportado por el oleaje, vuelve a ser acarreado desde la rompiente hacia la zona del depósito que forma la isla de barrera.

Marea alta o pleamar: nivel de la playa en que el agua de mar alcanza su máxima altura dentro del ciclo de las mareas

Mareas de tormenta: es el aumento significativo en el nivel del mar en un área costera determinada provocado por un huracán o tormenta intensa

Médanos: campos de dunas sin vegetación

Microambiente: Un conjunto biótico característico, a menudo explotados por un nicho ecológico diferente.

Nivel de coronamiento: Cota vertical máxima de una duna

Profundidad de cierre: profundidad a la cual ya no se observa un cambio significativo en la batimetría y no existe transporte de sedimentos inducido por el

oleaje. Esta zona se ubica en la plataforma continental donde las características del oleaje no están controladas por la topografía del fondo marino.

Reserva sedimentaria: almacén de arena disponible que alimenta y mantiene la integridad del sistema playa-dunas costeras. La resiliencia de un ecosistema de dunas costeras depende en gran medida de la presencia de este almacén

Resiliencia: capacidad de un ecosistema para absorber o resistir el efecto de perturbaciones, manteniendo su estructura y funcionamiento básicos. Si la resiliencia es sobrepasada, el ecosistema se vuelve vulnerable a los efectos de una perturbación (por ejemplo, cambio climático), lo cual limita su capacidad de recuperación y generación de servicios y bienes ambientales.

Sitios protegidos: bahías, ensenadas y lagunas costeras.

Suelo desarrollado: caracterizado por presencia de materia orgánica (horizonte A), presencia de cobertura vegetal y sustrato estabilizado.

Supraplaya: zona de la playa que en condiciones normales se encuentra seca; en ella predominan los agentes eólicos sobre los acuosos, ya que el agua solo ocasionalmente llega a invadir esta zona, como en el caso de las mareas de tormenta o por olas extremadamente altas. En esta zona, el perfil de playa puede presentar una cresta de berma que es la parte alta de la berma, la cual es una porción casi horizontal de la playa que está formada por sedimentos depositados en la supraplaya debido al retroceso de las olas

Vegetación de dunas costeras: Vegetación halófila que se desarrolla en suelos con alto contenido de sales solubles, que puede asumir formas diversas, florísticas, fisonómicas y estructurales muy disímiles, que pueden estar dominadas por especies con formas herbáceas, arbustivas y arbóreas.

Zona costera baja: aquella que se encuentra por debajo de los dos metros a partir del nivel de pleamar máxima.

Zona de barrido (surf zone): zona donde, una vez que ha roto la ola, ésta avanza hacia la línea de costa formando un resalte o bore situado en el frente de ola.

5. ANEXO GRÁFICO

En este anexo se presentan imágenes de los diversos tipos de playas-dunas costeras que se encuentran en las diferentes regiones del país. Posteriormente, se presentan dos ejemplos que ilustran el incremento en la urbanización. El factor común de estos ejemplos es que las construcciones se hicieron sobre áreas ocupadas originalmente por dunas.

Finalmente, se presentan imágenes de impactos derivados de la falta de regulación en el sistema playas-dunas costeras. El objetivo es ilustrar las consecuencias que ha tenido la pérdida de servicios ambientales de las dunas costeras, para que se reconozca la importancia de aplicar las regulaciones que se proponen en el documento y evitar así costos ambientales, sociales y económicos. Existe un gran acervo de fotografías de este tipo de impactos en diversas partes del mundo, sin embargo, aquí se incluyen solo casos de México.

En términos generales los principales impactos son el retroceso de la línea de costa e inundación, que generan daño o pérdida de infraestructura y aumento de riesgo de la población ante eventos hidrometeorológicos extremos, debido a la pérdida de la protección que ofrecen las dunas.

5.1. ECOSISTEMAS DE DUNAS COSTERAS CARACTERÍSTICOS DEL LITORAL MEXICANO

5.1.1. PACÍFICO NORTE



Figura 10. Aspecto de la morfología y vegetación de dunas en la Península de Baja California (Cortesía de Paola Gómez Priego).



Figura 11. Duna El Socorro, El Pabellón, San Quintín, Baja California (Cortesía de Gerardo Sánchez Vigil).



Figura 12. Duna El Socorro, El Pabellón, San Quintín, Baja California (Cortesía de Gerardo Sánchez Vigil).



Figura 13. Zona de Cabo Cortés, Baja California Sur.



Figura 14. Aspecto general de la duna y costa del Golfo de California (Cortesía de Esteban García Peña).



Figura 15. Vista del frente costero en las inmediaciones de Punta Lobos (Bahía de Todos los Santos), Baja California Sur.



Figura 16. Aspectos de las dunas en la playa del Novillero, Nayarit 2012.



Figura 17. Dunas embrionarias de Tomatlán, Jalisco.



Figura 18. Dunas fijas por matorrales, Tomatlán, Jalisco.

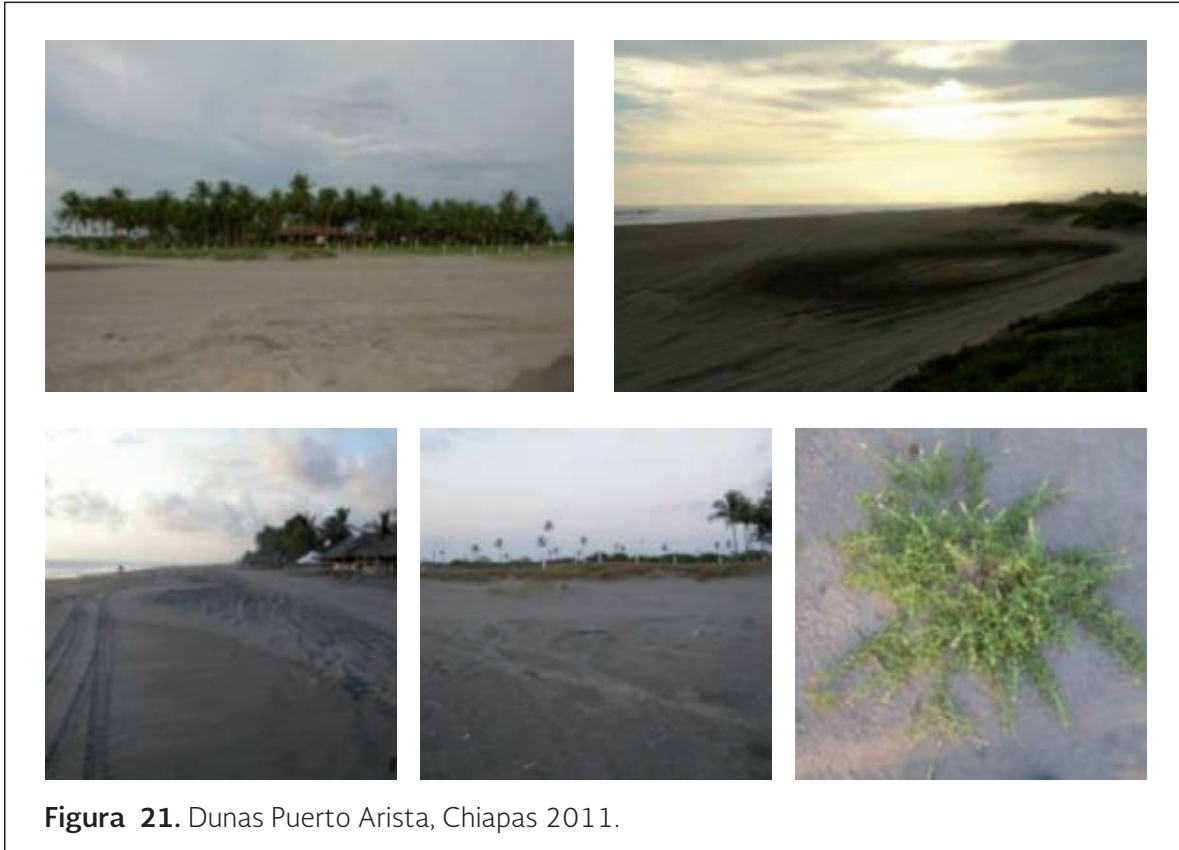
5.1.2. PACÍFICO SUR



Figura 19. Playas de canto rodado y dunas erosionadas, Guerrero.



Figura 20. Varias vistas de Playas en la costa de Oaxaca.



5.1.3. MAR CARIBE

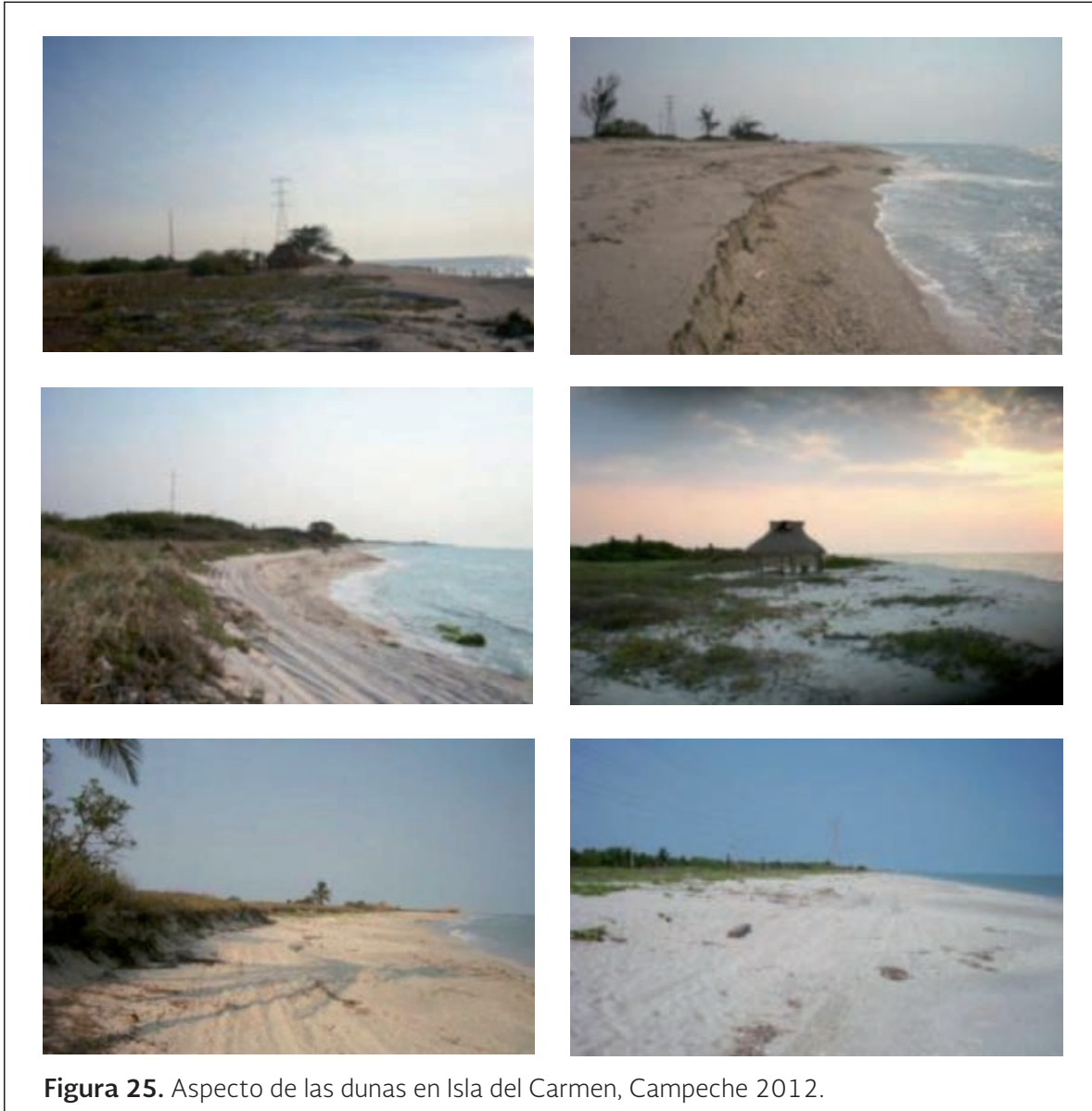


Figura 23. Aspecto de la zona playa-duna en el estado de Quintana Roo.

5.1.4. GOLFO DE MÉXICO



Figura 24. Aspecto de la zona playa-duna en el estado de Veracruz.



5.2. EJEMPLOS DE INCREMENTO DE CONSTRUCCIONES EN LA ZONA DE DUNAS

5.2.1. CANCÚN, QUINTANA ROO

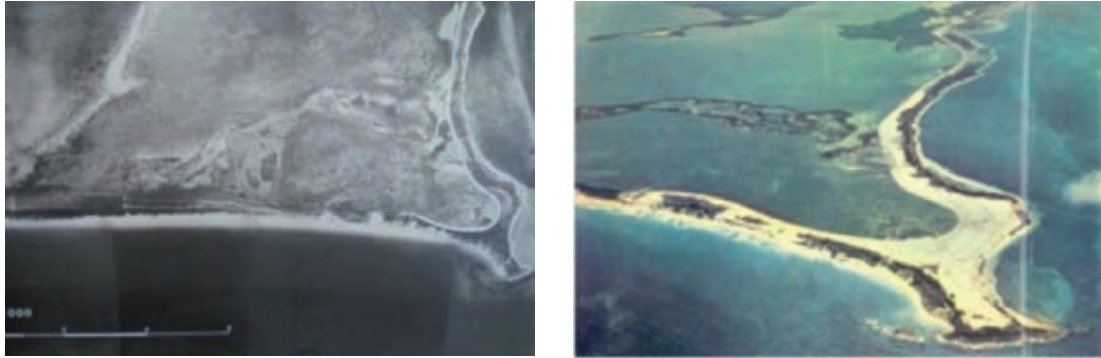


Figura 26. Punta Cancún. Durante la construcción del paseo Kukulcán a principios de 70s.



Figura 27. Aspecto en 2004 de dos segmentos de costa sin playa asociado a la ocupación de la zona de dunas.



Figura 28. En la zona de Punta Cancún todos los espacios de dunas ya estaban ocupados por la infraestructura turística antes del impacto del huracán *Wilma*.



Figura 29. Aspecto de la costa en Cancún, Quintan Roo, asociados a los efectos del huracán *Wilma* en octubre de 2005.

5.2.2. BARRA DE NAVIDAD, JALISCO



Figura 30. Barra de Navidad, Jalisco, en 1970-80 bajo una condición de equilibrio dinámico.



Figura 31. A mediados de los 80s inició la construcción de un espigón, una marina, entre otras modificaciones.



Figura 32. Ejemplo de daños por la reducción de resiliencia del sistema playa-duna.

5.2.3. PUERTO MARQUÉS, ACAPULCO



Figura 33. Daños ocasionado por la interrupción del transporte de sedimentos e intensificación del oleaje.

5.2.4. OTROS EJEMPLOS



Figura 34. Tuxpan, Veracruz. Playas después de un ciclón tropical (Cortesía de Esteban García Peña).



Figura 35. Limpieza de playa en el Caribe mexicano, retiran pedazos de coral que son los que forman la arena de la playa.



Figura 36. Erosión de playa en el Caribe mexicano.



Figura 37. Playas de Tabasco erosionadas, se muestra el Faro en el piso.



Figura 38. Construcción de infraestructura que interfiere con los procesos resilientes de dunas en un Playa turística, Oaxaca.



Figura 39. Playas de Puerto Madero, Tapachula, Chiapas. Erosión grave de playa ocasionada por escollera y espigones.



Figura 40. Cauce rectificando del Río Madre Vieja, Chiapas. El sedimento proveniente de la cuenca alta es atrapado entre los bordos del río, asolvando el cauce y evitando que la arena se disperse por la planicie costera, las dunas y la playa.



Figura 41. Ejemplo de lo que se puede evitar con una buena gestión de costas.

6. LITERATURA RECOMENDADA PARA PROFUNDIZAR EN TEMAS TÉCNICOS

En materia de construcción de infraestructura en dunas costeras:

- Silva, R. y Mendoza, E. 2013. Manual de Diseño de Obras Marítimas. Sección A. Hidrotecnia, Capítulo 2.13 Hidráulica Marina. Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Ingeniería de la UNAM. (en prensa)
- Molina, C., Rubinoff, P. y Carranza, J., 1998. Normas prácticas para el desarrollo turístico de la zona costera de Quintana Roo, México. 1a. ed. Amigos de Sian Ka'an A.C. y Centro de Recursos Costeros, Universidad de Rhode Island.

En materia de zona costera:

- Silva, R., Villatoro, M., Mendoza, E., Delgadillo, M. A., Escudero, M., Félix, D. y Ortíz, M. A. 2011. Caracterización de la Zona Costera y Planteamiento de Criterios de Regulación para su Manejo Sustentable. Financiado por la SEMARNAT. Instituto de Ingeniería-UNAM.
- Martínez M., P. Moreno Casasola, I. Espejel, D. Infante Mata O. Jiménez Orocio y Rodríguez Revelo, N. En preparación. Atlas de dunas de México. CONAFOR.

En materia de flora y vegetación de dunas costeras:

- Espejel, I., P. Peña Garcillán y O. Jiménez Orocio. 2012. Flora y vegetación de playas y dunas de México. Informe Técnico CONABIO. Publicación en preparación.
- Moreno-Casasola P., D. Infante Mata, A.C. Travieso-Bello y C. Madero V. 2010. Manual para la reforestación de los médanos. Instituto de Ecología, A. C., CONAFOR y CONACYT. Xalapa, Ver. México. 100 pp. ISSN: 978-607-7579-07-6 Formato electrónico: http://www1.inecol.edu.mx/inecol/libros/Manual_para_la_reforestacion_de_los_medanos1.pdf

Sitios de internet con información:

- <http://www.costasustentable.org>
- <http://www.conoceysobrevive.org>
- www.ecosteros.uabc.edu.mx

REFERENCIAS

- Alcamo, J. y Bennett, E.M., 2003. Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. Island Press.
- Arens, S.M., Mulder, J.P.M., Slings, Q.L., Geelen, L.H.W.T. y Damsma, P., 2012. Dynamic dune management, integrating objectives of nature development and coastal safety: Examples from the Netherlands, *Geomorphology*.
- Berlanga, H., Rodríguez-Contreras, V., Oliveras de Ita, A., Escobar, M., Rodríguez, L., Vieyra, J. y Vargas, V., 2008. Red de Conocimientos sobre las Aves de México (AVESMX). In: CONABIO (Editor).
- Bird, E.C., 1996. Beach management. John Wiley & Sons, New York, 617 pp.
- Bitrán, D., 2001. Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el período 1980-99. Impacto socioeconómico de los desastres en México. CENAPRED, SEGOB, México.
- Brown, A.C. y McLachlan, A., 2002. Sandy shore ecosystems and the threats facing them: some predictions for the year 2025. *Environmental Conservation*, 29: 62-77.
- California Department of Boating and Waterways and State Coastal Conservancy, 2002. California Beach Restoration Study, Sacramento, California.
- Camacho-Valdéz, V. y Murillo-Jiménez, J.M., 2008. Dune and Beach Morphodynamics at Cabo Falso, Baja California Sur, Mexico: Response to Natural, Hurricane Juliette (2001) and Anthropogenic Influence. *Journal of Coastal Research*, 24(3): 553-560.
- CONABIO-PNUD, 2009. México: capacidades para la conservación y el uso sustentable de la biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, México.
- de M Luna, M., Parteli, E.J., Durán, O. y Herrmann, H.J., 2011. Model for the genesis of coastal dune fields with vegetation. *Geomorphology*, 129(3): 215-224.
- Diez, J.J., Esteban, M.D. y Paz, R.M., 2009. Cancun-Nizuc Coastal Barrier. *Journal of Coastal Research*(251): 57-68.

Emhoff, K.F. y Johnson, M.E., 2012. Pliocene stratigraphy at Paredones Blancos: Significance of a massive crushed-rhodolith deposit on Isla Cerralvo, Baja California Sur (Mexico). *Journal of Coastal Research*, 28(1): 234-243.

Espejel, I., Peña-Garcillán, P. y Jiménez-Orocio, O., 2012. Flora de playas y dunas de México. Informe Final Conabio Proyecto Hj007.

Franco, P., 2012. Escenarios de riesgo costero asociados a la construcción del proyecto Cabo Cortés en Cabo del este, Baja California Sur, Universidad Autónoma de Baja California.

García, N., Marin, R., Méndez, K. y Bitrán, D., 2006. Características e impacto socioeconómico de los huracanes Stan y Wilma en la República Mexicana en el 2005. In: C.N.d.P.d. Desastres (Editor). Centro Nacional de Prevención de Desastres / Comisión Económica para América Latina y el Caribe de las Naciones Unidas, México, pp. 325.

Geissert, K.D., 1999. Regionalización geomorfológica del estado de Veracruz. *Investigaciones Geográficas*, 40: 23-47.

Gonzalez-Leija, M., Marino-Tapia, I., Silva-Casarin, R., Enriquez, C., Mendoza, E., Escalante-Mancera, E., Ruiz-Renteria, F. y Uc-Sanchez, E., 2013. Morphodynamic evolution and sediment transport processes of Cancun beach. *Journal of Coastal Research*: En prensa.

Grootjans, A.P., Adema, E.B., Bekker, R.M. y Lammerts, E.J., 2004. Why coastal dune slacks sustain a high biodiversity. En: Martínez M.L y N.P. Psuty (Editors), *Coastal dunes: Ecology and Conservation*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, pp. 85-99.

Hernández, A., Méndez, P. y Figueroa-Mah Eng, M., 2007. Caracterización del relieve pliocuaternario del entorno costero de Veracruz, México. *Cuaternario y Geomorfología*, 21(3-4): 113-131.

Hesp, P., 2002. Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology*, 48: 45-268.

Hesp, P., 2004. Coastal dunes in the tropics and temperate regions: location, formation, morphology and vegetation processes. En: M.L. Martínez, Psuty, N.P. and R.A. Lubke (Editor), *Coastal dunes, ecology and conservation*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, pp. 29-49.

Hesp, P., M.L, M., G., M.d.S., N., R.-R., Gutierrez, E., Humanes, A., Laínez, D., Montañó, I., Palacios, V., Quesada, A., Storero, L., González, G. y Trilla, C., 2011. Trochine Transgressive dunefield landforms and vegetation associations, Doña Juana, Veracruz, Mexico. *Earth Surf. Process. Landforms*, 36: 285-295.

Hesp, P.A., 2000. Coastal sand dunes form and function. *Coastal Dune Vegetation Network Technical Bulletin*. Rotorua: New Zealand Forest Research Institute Limited. 28p.(4).

Hesp, P.A. y Walker, I.J., 2013. Coastal Dunes. En: J.F. John F. Shroder (Editor), *Treatise on Geomorphology*. Academic Press., San Diego, pp. 328-355.

INEGI, 2005. Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso del suelo y vegetación: escala 1:250 000. Serie III (continuo nacional). México. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

Jiménez-Pérez, L.C., Cueva, H.d.I., Molina-Peralta, F. y Estrada-Ramírez, A., 2009. Avifauna del Estero de Punta Banda, Baja California, México. *Acta zoológica mexicana*, 25(3): 589-608.

Jímenez, O., 2013. Evaluación de vulnerabilidad de dunas costeras de México, UABC.

Kamphuis, J.W., 2001. *Introduction to Coastal Engineering and Management*. World Scientific, 437 pp.

Kasper-Zubillaga, J.J. y Acevedo-Vargas, B., 2008. Rare earth elements of the Altar Desert dune and coastal sands, Northwestern Mexico. *Chemie Der Erde-Geochemistry*, 68(1): 45-59.

Kunkel, K.E., Karl, T.R., Brooks, H., Kossin, J., LAWRYMORE, J., Arndt, D., Bosart, L., Changnon, D., Cutter, S.L. y Doesken, N., 2013. Monitoring and Understanding trends in extreme storms.

Magaña, V. y Gay-García, C., 2004. Vulnerabilidad y Adaptación Regional Ante El Cambio Climático y sus Impactos Ambiental, Social y Económicos. Instituto Nacional de Ecología.

Martínez, M.L., 2008. Conociendo las dunas costeras. *Investigación y ciencia (Scientific American en español)*(383): 26-35.

Martínez, M.L., 2009. Las playas y las dunas costeras: un hogar en movimiento. La ciencia para todos, 226. FCE, SEP, CONACYT, México, D.F., 1987 pp.

Martínez, M.L., Gallego-Fernández, J.B. y Hesp, P.A., 2013. Coastal dune restoration. Springer Series on Environmental Management, 347 pp.

Martínez, M.L. y Moreno-Casasola, P., 1996. Effects of burial by sand on seedling growth and survival in six tropical sand dune species from the Gulf of Mexico. *Journal of Coastal Research*: 406-419.

Martínez, M.L., Moreno-Casasola, P. y Castillo, S., 1993. Biodiversidad costera: playas y dunas. En: N.E.G. Salazar-Vallejo (Editor), *Biodiversidad marina y costera de México*. CONABIO y CIQRO, Chetumal, Quintana Roo, México, pp. 160-181.

Martínez, M.L., Psuty, N.P. y Lubke, R.A., 2004. A perspective on coastal dunes. En: M.L. Martínez, Psuty, N.P. and R.A. Lubke (Editor), *Coastal dunes, ecology and conservation*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, pp. 3-10.

Matías-Ramírez, L.G., 1998. Algunos efectos de la precipitación del huracán Paulina en Acapulco, Guerrero. *Investigaciones Geográficas*, 37: 7-20.

Mendoza-González, G., Martínez, M.L., Lithgow, D., Pérez-Maqueo, O. y Simonin, P., 2012. Land use change and its effects on the value of ecosystem services along the coast of the Gulf of Mexico. *Ecological Economics* (82): 23-32.

Mendoza, E., Silva, R., Enriquez-Ortiz, C., Mariño-Tapia, I. y Félix, A., 2013. Analysis of the Hazards and Vulnerability of the Cancun Beach System: The Case of Hurricane Wilma. En: M. Chávez, Ghil, M. y Urrutia-Fucugauchi, J. (Editor), *Extreme Events: Observations, Modeling and Economics*. American Geophysical Union, En prensa.

Moreno-Casasola, P., 2004. A case study of conservation and management of tropical sand dune systems: La Mancha-El LLano. En: M.L. Martínez, Psuty, N.P. and R.A. Lubke (Editor), *Coastal dunes, ecology and conservation*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, pp. 319-333.

Moreno-Casasola, P., 2006. Playas y dunas. En: P. Moreno-Casasola, Peresbarbosa, E.R. y A.C. Travieso-Bello (Editor), *Estrategia para el manejo costero integral: el enfoque municipal*. CONANP y Gobierno del Estado de Veracruz, Xalapa, Veracruz, México.

Moreno-Casasola, P., 2010. Mar de arena, Gobierno del Estado de Veracruz para la Conmemoración de la Independencia Nacional y de la Revolución Mexicana-

Universidad Veracruzana, Veracruz, pp. 283. (<http://www1.inecol.edu.mx/costasustentable/esp/documentos/publicacionestxt.htm#Libros>).

Moreno-Casasola, P., Espejel, I., Castillo, S., Castillo-Campos, G., Durán, R., Pérez-Navarro, J.J., León, J.L., Olmsted, I. y Trejo-Torres, J., 1998. Flora de los ambientes arenosos y rocosos de las costas de México. En: G. Halffter (Editor), Biodiversidad en Iberoamérica. CYTED- Instituto de Ecología A.C., pp. 177-258.

Moreno-Casasola, P., Martínez, M.L. y Castillo-Campos, G., 2008. Designing ecosystems in degraded tropical coastal dunes. *Ecoscience*, 15(1): 44-52.

Moreno-Casasola, P., Peresbarbosa, R.E. y Travieso-Bello, A.C., 2006. Estrategia para el manejo costero integral: el enfoque municipal, 1. Instituto de Ecología, A.C., CONANP y Gobierno de Veracruz-Llave., Xalapa, Ver. México, 1266 pp.

Nordstrom, K.F., Psuty, N. y Carter, 1990. Coastal Dunes: Form and Process. Wiley & Sons. Ltd. .

NSW Department of Land and Water Conservation, 2001. Coastal Dune Management: A Manual of Coastal Dune Management and Rehabilitation Techniques, Newcastle.

Peralta-Peláez, L.A. y Moreno-Casasola, P., 2009. Composición florística y diversidad de la vegetación de humedales en los lagos interdunarios de Veracruz. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 85: 89-101.

Peynador, C. y Méndez-Sánchez, F., 2010. Managing coastal erosion: A management proposal for a littoral cell in Todos Santos Bay, Ensenada, Baja California, Mexico. *Ocean & Coastal Management*, 53: 350-357.

Psuty, N.P., 2004. The coastal foredune: a morphological basis for regional coastal dune development. En: M.L. Martínez, Psuty, N.P. and R.A. Lubke (Editor), Coastal dunes, ecology and conservation. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, pp. 11-27.

Ranwell, D.S., 1972. Ecology of salt marshes and sand dunes. CHAPMAN AND HALL: LONDON, ENGLAND.

Ranwell, D.S. y Boar, R., 1995. Coastal dune management guide. Reminder Press, UK.

Rodrigues, R.S., Mascarenhas, A. y Jagtap, T.G., 2011. An evaluation of flora from coastal sand dunes of India: Rationale for conservation and management. *Ocean & Coastal Management* 54: 181-188.

Rodríguez-Revelo, N., Rendón-Márquez, G., Espejel, I., Jiménez-Orocio, O. y Martínez, M.L., En revisión. Caracterización mineralógica y granulométrica y análisis de proveniencia de las arenas de la duna costera El Socorro, Baja California, México.

Seingier, G., Espejel, I. y Almada, J.L.F., 2009. Cobertura vegetal y marginación en la costa mexicana. *Investigación ambiental*, 1(1): 54-69.

Sewell, A.A. y Johnson, M.E., 2007. Rhodolith detritus impounded by a coastal dune on Isla Coronados, Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 33(4): 483-494.

Silva-Casarín, R. y Mendoza-Baldwin, E., 2013. Manual de Diseño de Obras Marítimas. Sección A. Hidrotecnia, 2.13 Hidráulica Marina. Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Silva-Casarín, R., Mendoza-Baldwin, E., Escalante-Mancera, E., Marino-Tapia, I. y Ruiz-Rentería, F., 2009. Wind waves induced by hurricane Wilma in Puerto Morelos, Quintana Roo, Mexico. *Ingeniería Hidráulica en México*, 24(2): 93-109.

Silva, R., Govaere, G., Salles, P., Bautista, G. y Díaz, G., 2003. Oceanographic vulnerability to hurricanes on the Mexican coast. *Coastal Engineering 2002: Solving Coastal Conundrums*: 39.

US Army Corps Of Engineers, 2002. Coastal engineering manual, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.

Villatoro, M.M., Amos, C.L., Umgieser, G., Ferrarin, C., Zaggia, L., Thompson, C.E. y Are, D., 2010. Sand transport measurements in Chioggia inlet, Venice lagoon: Theory versus observations. *Continental Shelf Research*, 30(8): 1000-1018.

Weinkle, J., Maue, R. y Pielke Jr, R., 2012. Historical Global Tropical Cyclone Landfalls. *Journal of Climate*, 25(13): 4729-4735.

Woodroffe, C.D., 2003. Coasts: Form, process and evolution. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Yetter, J.C., 2004. Hydrology and geochemistry of freshwater wetlands on the gulf coast of Veracruz, México, University of Waterloo, Ontario, Canada, 168 pp.

AUTORES:

DIRECCIÓN DE POLÍTICAS AMBIENTALES DE LA DIRECCIÓN GENERAL DE POLÍTICA AMBIENTAL E INTEGRACIÓN REGIONAL Y SECTORIAL-SEMARNAT

M. P. A. A. Daniela Pedroza

M. en C. Abril Cid

M. en C. Ofelia García

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

Dr. Rodolfo Silva-Casarín

Dra. Monique Villatoro

M. en I. Miguel Ángel Delgadillo

Dr. Edgar Mendoza

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Dra. Ileana Espejel

INSTITUTO DE ECOLOGÍA A.C.

Dra. Patricia Moreno-Casasola

Dra. Maria Luisa Martínez

EL COLEGIO DE LA FRONTERA SUR

Dra. Dulce Infante Mata

Manejo de Ecosistemas de Dunas Costeras, Criterios Ecológicos y Estrategias
El cuidado de la edición estuvo a cargo de la
Coordinación General de Comunicación Social y
el contenido es responsabilidad de la
Dirección de Política Ambiental e Integración Regional y Sectorial