UNIVERSIDAD AUTÓMOMA DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

DOCTORADO EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE DUNAS COSTERAS DE MÉXICO ANTE LA DEGRADACIÓN AMBIENTAL POR DISTURBIOS NATURALES Y ANTRÓPICOS EXTERNOS

Tesis que para obtener el grado de:

Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo

Presenta:

Oscar Alberto Jiménez Orocio

Ensenada, Baja California

Septiembre 2015

UNIVERSIDAD AUTÓMOMA DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

Título: **Evaluación de la vulnerabilidad de dunas costeras de México ante la degradación ambiental por disturbios naturales y antrópicos externos**

DOCTORADO EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

Tesis que para obtener el grado de

DOCTOR EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

Presenta

Oscar Alberto Jiménez Orocio

Aprobado por:

Dra. Martha Ileana Espejel Carbajal
(Directora)

Dra. María Luisa Martínez Vázquez
(Co-directora)

Dra. Marie-Laure Coubes
(sinodal)

Dr. Georges Seingier
(sinodal)

Dr. José Ramón Hernández Santana
(sinodal)

Ensenada, Baja California, Septiembre 2015

Agradecimientos

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de manutención otorgada durante la realización del doctorado.

Al proyecto CONABIO HJ/007 “Flora de playas y dunas de México” dirigido por la Dra. Ileana Espejel, por el apoyo económico brindando para la realización de parte de esta investigación.

Al proyecto CONAFOR “Diagnóstico general de las dunas costeras de México”, dirigido por la Dra. María Luisa Martínez por el financiamiento de gran parte de esta investigación.

A la Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de investigaciones Oceanológicas, pero especialmente a la Facultad de Ciencias, por permitirme trabajar en sus instalaciones.

A la Dra Ileana Espejel, por el apoyo académico, moral y económico y demás invaluables contribuciones para la elaboración de esta tesis, pero sobre todo por la amistad sin condiciones que me ha brindado durante el tiempo que he laborado con y para ella.

A la Dra. María Luisa Martínez, por su apoyo en todos los aspectos referidos a la realización de esta tesis. Por haberme integrado en su megaproyecto de investigación de dunas, y por sus acertadas observaciones en el trabajo de tesis.

A los miembros del comité tutorial: Dr. Georges Siengier, Dra. Marie-Laure Coubes y Dr. José Ramón Hernández, por sus valiosas aportaciones para la realización y mejoramiento del proyecto de tesis.

Al Dr. Patrick Hesp, por su apoyo en la fotointerpretación y análisis de los tipos geomorfológicos de dunas.

A la Dra. Dulce Infante por su valiosa ayuda en las observaciones de campo y demás proyectos en conjunto derivados de esta tesis.

ÍNDICE

Resumen **1**

Capitulo introductorio **3**

Objetivo general 3
Objetivos específicos 4

Capítulo I: Revisión bibliográfica 4

Capítulo II: Delimitación y descripción de las dunas costeras de México 5

Capítulo III: Análisis de uso y situación actual de las dunas costeras de México 5

Capítulo IV: Análisis del papel de las áreas naturales protegidas en la conservación de las dunas costeras de México 6

Capítulo V: Diseño y aplicación del modelo de evaluación de la vulnerabilidad de las dunas costeras de México 7

Referencias bibliográficas 7

Capítulo I: Revisión bibliográfica **8**

La investigación científica sobre dunas costeras de México: origen, evolución y retos **8**

Resumen 8

Abstrac 8

Introducción 9

Material y métodos 9

Resultados y discusión 9
Tendencias generales 9
Distribución geográfica de los estudios de dunas costeras 10
Desarrollo histórico de la investigación en dunas costeras 11
Situación actual del conocimiento del ecosistema de dunas costeras de México de acuerdo con diferentes temáticas 11
Investigación ecológica. Distribución de la vegetación de dunas costeras 12
Distribución de la fauna de dunas costeras 13
Adaptaciones al ambiente de dunas 14
Interacciones bióticas 15
Impacto ambiental 16
Erosión y restauración 16
Degradación ambiental 17
Manejo y conservación 17

Conclusiones 18

Agradecimientos 19
Anexo 1. 19
Referencias bibliográficas 24

Capítulo II: Delimitación y descripción de las dunas costeras de México 30
Cómo se forman (elementos que intervienen y dinámica del movimiento) 30
Erosión de playas y su relación con las dunas 36
Tipos de dunas 38
Dunas embrionarias o frontales y planicies de dunas frontales 39
Planicie de dunas frontales 41
Hondonadas 43
Dunas parabólicas 45
Barjanes 47
Dunas transgresivas 48
Dunas fósiles 50
Dunas amarillas, cafés y grises 51
Dunas primarias, dunas secundarias y dunas terciarias 52
Cómo evolucionan unas a otras, estabilización 52
Topografía y microhábitats 53
Tipos de dunas en México 56
Las dunas costeras en los estados 60
Hondonadas y planicies de inundación 64
Referencias bibliográficas 66

Capítulo III: Análisis de uso y situación actual de las dunas costeras de México 69
Uso de las dunas costeras 69
Utilización de las dunas costeras 70
Investigación y servicios ambientales 78
Actividades científicas y educativas 78
Servicios ambientales 79
Situación actual en México 82
Usos prevalecientes de las dunas costeras mexicanas 91
Referencias bibliográficas 100

Capítulo IV: Análisis del papel de las áreas naturales protegidas en la conservación de las dunas costeras de México 104
Definición de conservación 104

Conservación de playas y dunas costeras en México 106
Necesidades de conservación 112
Estrategias de manejo de dunas para lograr su conservación 116
Referencias bibliográficas 122

Capítulo V: Diseño y aplicación del modelo de evaluación de la vulnerabilidad de las dunas costeras de México 127

Introducción 127
Métodos 129
Ambiente físico 129
Litoral Pacífico 129
Litoral atlántico 131
Diseño del modelo de evaluación de la vulnerabilidad de DC 133
Subíndice de condición geomorfológica (SICG) 136
Subíndice de influencia eólica (SIIE) 139
Subíndice de condición y uso de las DC (SIUD) 140
Subíndice de presión humana (SIPH) 141
Índice de vulnerabilidad de dunas costeras (IVD) 143
Resultados 143
Subíndice de condición geomorfológica (SICG) 143
Subíndice de influencia marina (SIIM) 147
Subíndice de influencia eólica (SIIE) 149
Subíndice de condición y uso de las DC (SIUD) 151
Subíndice de presión humana (SIPH) 153
Índice de vulnerabilidad general (IVD) 156
Discusión 164
Subíndice de condición geomorfológica 165
Subíndices de influencia marina y eólica 166
Subíndices de condición y uso de las DC y presión antrópica 168
Limitantes metodológicas 171
Conclusiones 173
Referencia bibliográfica 174

Conclusiones generales y principales hallazgos 180

Resumen

Las dunas costeras son un sistema natural complejo por su heterogeneidad topográfica y diversidad biológica. Son ecosistemas que constantemente están expuestos a perturbaciones que según su intensidad y alcance, producen impactos variables. Estos impactos disminuyen la capacidad de recuperación del ecosistema y aumentan su vulnerabilidad hasta el punto de no poder recuperarse nunca. El objetivo de este trabajo es determinar el estado de la vulnerabilidad que presentan las dunas costeras en México. Para ello se analizó el estado actual de la investigación científica, la condición ecológica en la que se encuentran las dunas costeras del país y variables de uso de suelo, asentamientos humanos sobre y alrededor de los sistemas de dunas, así como los esfuerzos de conservación dirigidos a estos ecosistemas. Se adaptó un modelo de evaluación de la vulnerabilidad de dunas costeras utilizado en varios países y se tomaron los cinco factores principales que intervienen en el equilibrio de la dinámica de este ecosistema. Para la revisión bibliográfica se analizaron 156 artículos científicos y 37 capítulos de libros. Se digitalizaron todos los sistemas de dunas costeras, reconocibles, para determinar su extensión y distribución. Las dunas costeras se clasificaron según su tipo geomorfológico y se categorizaron de acuerdo a la condición y actividades antrópicas que se realizan sobre ellas. Los polígonos de dunas resultantes fueron divididos en celdas para realizar una evaluación homogénea a lo largo de ambos litorales costeros. A cada celda se le aplicó el modelo de evaluación que consta de cinco subíndices y 12 indicadores. El desarrollo de la investigación en dunas está asociado a las ciencias naturales, sin embargo los enfoques de estudio han pasado de descripciones geológicas y florísticas a estudios de manejo integrado y análisis de escenarios de cambio climático. El conocimiento sobre dunas costeras está concentrado en el Golfo de México y Mar Caribe. No obstante, esas dunas costeras son de las más afectadas por los desarrollos urbanos y portuarios. En los últimos años los científicos han colaborado con los tomadores de decisiones en la elaboración de diagnósticos ambientales y en proyectos de restauración y manuales de buenas prácticas, pero han sido poco abordados los temas de impacto ambiental. Se cuantificaron 808, 711 ha de dunas costeras, 50% de dunas frontales, 40% dunas transgresivas y el resto dunas costeras parabólicas. Baja California Sur es el estado con mayor superficie de dunas (25% del total). En cuanto a la condición actual de las dunas costeras, se encontró que la mayor cantidad de asentamientos humanos, sobre dunas, se encuentran en el sur del Golfo de México, y es donde

se encuentran más degradadas. Alrededor del 50% de las dunas costeras del país se encuentran en estado natural, y más de la mitad de las celdas analizadas no presenta datos de población, lo que significa que son ecosistemas relativamente bien conservados que aún cumplen con su papel ecológico y con gran potencial de servicios del ecosistema. El modelo indica que los grandes sistemas de dunas costeras de la Península de Baja California y norte del Golfo de México son los menos vulnerables por su heterogeneidad geomorfológica y dinámica sedimentaria. Por otro lado, los sistemas de dunas costeras del sur del Golfo de México y mar Caribe, presentan los valores de vulnerabilidad más altos, ya que son estrechos cordones de dunas frontales sujetos a condiciones erosivas constantes, a frecuente impacto de fenómenos hidrometeorológicos y alto crecimiento poblacional. La condición y uso actual de las dunas costeras, sumado a la presión antrópica, influye en gran medida en el comportamiento del índice de vulnerabilidad, donde el cambio de usos de suelo y la fragmentación de los ecosistemas son las principales causas de degradación. Todos los análisis y evaluaciones indican que los grandes sistemas de dunas costeras del centro y sur del Golfo de México están expuestos a presiones externas, tanto naturales como antrópicas, y que no existe una herramienta jurídica que las proteja. En general, no existen planes de manejo en las áreas naturales protegidas que incluyan a las DC como un ecosistema prioritario. En conclusión, la investigación sobre dunas costeras es suficiente en algunos sitios y en otros es inexistente. Esta investigación es la base para el desarrollo de mejores políticas de investigación científica, especialmente en el tema de ecosistemas prioritarios como son las dunas costeras. Se detectaron regiones costeras con dunas (Pacífico sur) que urgen ser investigadas de manera más puntual, utilizando los mismos criterios de investigación e indicadores pero a nivel local. Se sugieren crear programas para la conservación de dunas costeras con proyectos de manejo integrado. De esta manera, las dunas costeras fuera de áreas naturales protegidas serán cobijadas por otros instrumentos de manejo como son los ordenamientos territoriales locales, sitios Ramsar y/o la certificación de playas limpias en su categoría de conservación.

Palabras clave: Ecosistemas costeros, manejo costero integral, interdisciplina, conservación, riesgo.

Capitulo introductorio

El desarrollo de esta tesis parte de las preguntas de investigación sobre la situación actual de los sistemas dunas costeras de México. Dichas preguntas de investigación están fundamentadas con base en la literatura consultada y con los procesos que modifican la dinámica de los ecosistemas costeros de dunas, los métodos utilizados para evaluar su vulnerabilidad y los esfuerzos para proponer planes de manejo integral de las costas y sus ambientes. Las preguntas planteadas que dieron origen a esta investigación fueron:

- ¿Es la investigación sobre dunas costeras suficiente como para ser tomada como una herramienta para los tomadores de decisiones?
- ¿Los enfoques de estudio sobre dunas costeras han cambiado sus ejes temáticos hacia el estudio integral de estos ecosistemas?
- ¿Cuál es el estado actual, distribución, características bio-geomorfológicas y uso de las dunas costeras en México?
- ¿Cuáles son los principales factores o procesos que aumentan o disminuyen la vulnerabilidad de las dunas costeras?
- ¿Son las actividades humanas una amenaza para los ecosistemas de dunas costeras en México?
- ¿Es el método de lista de chequeo usado mundialmente, el más adecuado para evaluar la vulnerabilidad de las dunas costeras de México?

Para poder abordar cada una de las preguntas se plantearon los siguientes objetivos:

Objetivo general

- Analizar la condición actual tanto de la investigación científica como ecológica de los sistemas de dunas costeras del país para determinar el estado de conservación en el que se encuentran. Así como, proponer un modelo de evaluación de la vulnerabilidad de las dunas costeras de México que identifique los principales agentes de cambio (natural y antrópico), los cuales determinan su capacidad para mantener la dinámica ambiental que las caracteriza.

Objetivos específicos

- Analizar la evolución de los enfoques de estudio de las dunas costeras e identificar los "vacíos" en la investigación académica, que lleven al manejo integrado de estos ecosistemas.
- Delimitar e identificar, desde los puntos de vista biológico y geomorfológico, los principales sistemas de dunas costeras del país.
- Realizar un diagnóstico sobre el estado y uso actual de las dunas costeras en México.
- Explorar el papel de las áreas naturales protegidas respecto al estado de conservación de las dunas costeras del país.
- Diseñar y aplicar un modelo de evaluación de vulnerabilidad de dunas costeras en México que integre los principales agentes de cambio sobre las dunas costeras de México.

Cada uno de los objetivos antes mencionados es planteado como un capítulo en el cuerpo del documento, los cuales serán descritos brevemente a continuación:

Capítulo I: Revisión bibliográfica

En este capítulo se analizó la literatura científica dirigida al estudio de las DC de México. Se realizó una búsqueda exhaustiva en las principales bases de datos de revistas científicas de índole nacional e internacional. Los resultados dibujaron un panorama geográfico de los temas mayormente abordado y los sistemas de DC más estudiados del país. Así mismo, se identificaron los vacíos en la investigación que llevaron a proponer esquemas y políticas de investigación dirigidos a solventar los faltantes en la investigación de dunas en México. Además, con este primer capítulo, se reconocen las herramientas y métodos más utilizados para la identificación y delimitación de los tipos de dunas costeras, así como un análisis de la vulnerabilidad aplicado a estos ecosistemas, y se confirma la falta de un proyecto nacional que aborde el tema de vulnerabilidad de las dunas costeras de México.

Los resultados de este primer capítulo se plasmaron en un artículo de revisión publicado en la Revista Mexicana de Biodiversidad (revista indexada en la base de datos de publicaciones científicas ScienDirect):

http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1870345315000238

Capítulo II: Delimitación y descripción de las dunas costeras de México

Los resultados del primer capítulo permitieron identificar la falta de un mapa de las dunas costeras de México. En principio las delimitaciones más cercanas a la distribución de las dunas costeras del país se encuentran en los mapas de uso de suelo y vegetación del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), sin embargo, en estos mapas no se delimita el total de la superficie y distribución de las dunas costeras del país.

Por lo tanto, el primer paso para conocer la situación actual de las dunas costeras era saber su distribución, extensión y sus características geomorfológicas. Para esto, con la ayuda de uno de los especialistas de dunas costeras con mayor reconocimiento a nivel mundial, el Dr. Patrick Hesp (Flinders University, Australia), se digitalizaron (cartografiaron) las dunas costeras de ambos litorales. Así mismo, se cuantificó la superficie por estado y municipio. Como base para la digitalización se utilizó el software Google Earth, en su versión de alta resolución. Además, se verificó en campo en casi todos los estados costeros del país, la delimitación, de lo identificado como dunas costeras en las imágenes.

Los resultados de este capítulo fueron incluidos en el libro "Diagnóstico general de las dunas costeras de México" (Martínez et al, 2014. ISBN 978-607-8383-17-7), el cual es el resultado de un proyecto de investigación financiado por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), publicado en 2014.

Capítulo III: Análisis de uso y situación actual de las dunas costeras de México

En este capítulo se analiza el uso actual de las dunas costeras, con base en la fotointerpretación de imágenes satelitales. El uso de las dunas costeras se clasificó en cinco

tipos principales: “natural”, que se refiere a las dunas costeras sin disturbio aparente; “fragmentado”, dunas costeras fragmentadas principalmente por algún tipo de vías de comunicación; de “uso agropecuario”, dunas costeras con algún tipo de fragmentación por parcelas de cultivo o actividades agrícolas evidentes; “mixtos”, dunas con las características anteriores, pero que además presentaba asentamientos urbanos dispersos; y “dunas urbanizadas”, sistemas de dunas con más del 75% de su superficie antropizada (dunas costeras sustituidas por construcciones de uso humano).

Los resultados de este capítulo permitieron identificar los sistemas de dunas mejor conservados del país, dibujando un patrón espacial evidente asociado a la distribución de los centros de población, las mejor conservadas están al norte del país y las menos conservadas se localizan principalmente en el sur-sureste del país.

Al igual que el capítulo anterior, los resultados de este capítulo fueron incluidos en el libro “Diagnóstico general de las dunas costeras de México”.

Capítulo IV: Análisis del papel de las áreas naturales protegidas en la conservación de las dunas costeras de México

En este capítulo se analiza a grandes rasgos los principales esfuerzos de conservación que han sido ejecutados para mantener a los sistemas de dunas costeras en buen estado de conservación. No obstante, aunque se identifican a las Áreas Naturales Protegidas (ANP) como el principal agente de protección de los ecosistemas naturales en general las dunas costeras no son el objeto de conservación más importante. No se identificaron leyes o normas que restrinjan el uso o aprovechamiento de estos sistemas. Se recomienda que las dunas costeras fuera de ANP sean cobijadas por otro instrumento de manejo como son los ordenamientos territoriales locales o se fortalezcan los sitios Ramsar y la certificación de playas limpias en su categoría de conservación. Así mismo se plantean una serie de recomendaciones para el manejo de estos ecosistemas, basados en los resultados de los capítulos anteriores y de la literatura especializada.

Al igual que el capítulo anterior, los resultados de este capítulo fueron incluidos en el libro “Diagnóstico general de las dunas costeras de México”.

Capítulo V: Diseño y aplicación del modelo de evaluación de la vulnerabilidad de las dunas costeras de México

En este capítulo se engloban los resultados de los capítulos anteriores. Aquí, se identificaron los principales agentes de perturbación (naturales y antrópicos) que determinan que un sistema de dunas sea más o menos vulnerable. Así mismo, se responde a la pregunta sobre el método de chequeo (*chekclist*) propuesto por Williams et al. (2000) y García-Mora et al. (2001) como el más indicado para evaluar los sistemas de dunas costeras de México. De acuerdo al análisis, se sugiere un modelo de evaluación que utiliza los cinco principales agentes de cambio identificados por los autores antes mencionados. Sin embargo, se propone que el método, dado la escala de estudio, sea abordado con un número menor de indicadores de vulnerabilidad. Dichos indicadores, sintetizan la información por cada uno de los cinco factores de influencia. Los resultados de este capítulo, permiten identificar los sistemas con mayor y menor grado de vulnerabilidad.

Referencias bibliográficas

García-Mora, M.R., J.B. Gallego-Fernández, A.T. Williams y F. García-Novo. 2001. A coastal dune vulnerability classification. A case study of the SW Iberian Peninsula. *Journal of Coastal Research,* 17: 802-811.

Williams, A.T., J. Alveirinho-Dias, F. García-Novo, M.R. García-Mora, R. Curr y A. Pereira. 2001. Integrated coastal dune management: checklists. *Continental Shelf Research,* 21: 1937–1960.

Martínez, M.L., P. Moreno-Casasola, I. Espejel, D. Infante-Mata, O. Jiménez-Orocio y N. Rodríguez-Revelo. 2014. Diagnóstico general de las DC de México. Comisión Nacional Forestal. México. 375 p.

Disponible en www.sciencedirect.com

Revista Mexicana de Biodiversidad

Revista Mexicana de Biodiversidad 86 (2015) 486–507

Instituto de Biología UNAM

www.ib.unam.mx/revista/

Artículo de revisión

La investigación científica sobre dunas costeras de México: origen, evolución y retos

Scientific research on coastal dunes of Mexico: origin, evolution and challenges

Oscar Jiménez-Orocio [a], Ileana Espejel [a,*] y María Luisa Martínez [b]

[a] *Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California, Carretera Tijuana-Ensenada km 103, 22800 Ensenada, Baja California, México*
[b] *Red de Ecología Funcional, Instituto de Ecología, A.C., Carretera antigua a Coatepec 351, El Haya, 91070 Xalapa, Veracruz, México*

Recibido el 20 de mayo de 2014; aceptado el 16 de enero de 2015
Disponible en Internet el 27 de mayo de 2015

Resumen

El conocimiento sobre los ecosistemas clave de un país es una prioridad nacional de la investigación científica para plantear una política de ciencia que motive la generación de conocimiento para llenar vacíos en la información. Presentamos los resultados de una exhaustiva revisión bibliográfica que exponen la situación actual del conocimiento de las dunas costeras de México. El 47% de la investigación científica se enfoca en el estudio de la ecología vegetal, principalmente en las costas del Atlántico. Destaca Veracruz como el estado costero con mayor número de sitios estudiados (86). Se ha publicado la distribución de 844 especies de plantas y 166 de animales, y se han identificado 400 interacciones bióticas que muestran su importancia en el éxito reproductivo de plantas y en los procesos de sucesión vegetal. Las investigaciones evidencian al desarrollo antropogénico como principal factor de estrés sobre los ecosistemas dunares. Se concluye la necesidad de utilizar algunas variables de la biodiversidad como indicadores para monitorear los efectos del cambio climático y del desarrollo humano sobre la integridad y el funcionamiento de las costas. Esto permite plantear hipótesis donde se integre al desarrollo socioeconómico y su impacto en el ambiente, y las estrategias para la conservación y manejo de estos ambientes tan dinámicos.
Derechos Reservados © 2015 Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0.

Palabras clave: Estado del conocimiento; Ecosistemas costeros; Estudios de país; Biodiversidad costera

Abstract

The knowledge on key ecosystems is necessary to promote scientific policies that encourage science projects that aim at fulfilling information gaps. We conducted a thorough literature review in order to assess the state of the art in the scientific research that has been performed on Mexican coastal dunes. We found that 47% of the studies focused on plant ecology mostly along the Atlantic coast. The state of Veracruz has been the most studied (86). In addition, the spatial distribution of 844 plant species and 166 of animal species have been reported. Four hundred ecological interactions have demonstrated the relevance of different species for reproductive fitness in plants and plant succession processes. The studies highlight human activities as the main stressor on coastal dunes systems. We conclude that it is necessary to use biodiversity variables as ecological indicators for monitoring climate changes as well as the impacts of human activities on coastal dunes. The above will enable us to devise conservation and environmental management strategies where economic development and environmental impact are integrated within the ecological studies hypothesis.
All Rights Reserved © 2015 Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología. This is an open access item distributed under the Creative Commons CC License BY-NC-ND 4.0.

Keywords: State of the art; Coastal ecosystems; National studies; Coastal biodiversity

* Autor para correspondencia.
Correo electrónico: ileana.espejel@uabc.edu.mx (I. Espejel).
La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

http://dx.doi.org/10.1016/j.rmb.2015.04.022
1870-3453/Derechos Reservados © 2015 Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0.

Introducción

Los estudios sobre los ecosistemas clave de un país deben ser una prioridad nacional de la investigación científica para poder plantear una política de la ciencia que motive la generación de conocimiento para llenar los vacíos en la información, así como el monitoreo de los indicadores de cambio. Por sus características geomorfológicas, las particularidades sedimentarias y los servicios del ecosistema —por ejemplo, protección costera— que proporcionan, las dunas costeras (DC) son un ecosistema clave que cobra importancia socioeconómica por el aumento de la vulnerabilidad costera cuando hay proyecciones de elevamiento del nivel medio del mar (Semarnat, 2013) y se incrementan los desarrollos mineros, agropecuarios, urbanos y de infraestructura portuaria, turismo, entre otros (Camacho-Valdéz, Murillo-Jiménez, Nava-Sánchez y Turrent-Thompson, 2008; Martínez et al., 2014).

Además de su importancia, las DC son ecosistemas interesantes como objetos de investigación científica porque su estructura geomorfológica y funcionamiento están determinados, en gran parte, por el efecto de los disturbios naturales que ocurren recurrentemente (Maun, 2009). Estos ecosistemas parecen simples, pero conllevan una complejidad natural que se comprueba a través de las adaptaciones bióticas a un ambiente físico de extremos, es decir, intenso movimiento de arena, inundaciones y sequías o temperaturas extremosas en tan solo un día. En un sistema de DC coexisten una serie de microhábitats, desde dunas embrionarias hasta lagunas, matorrales y selvas sobre dunas, donde se llevan a cabo interacciones ecológicas que permiten el funcionamiento de todo el sistema, convirtiéndolo en un ecosistema aparentemente simple pero ambientalmente muy complejo (Martínez y Psuty, 2004).

Se estima que en México existen aproximadamente 800,000 ha de DC, el 1% de la superficie del país, distribuidas en alrededor del 80% del litoral costero mexicano (Jiménez-Orocio, Espejel et al., 2014; Jiménez-Orocio, Hesp, Martínez, Espejel y Moreno-Casasola, 2014). De acuerdo con Jiménez-Orocio et al. (2014a), cerca del 50% de las DC del país han sido transformadas para uso agropecuario o urbanizadas. Su amplia distribución (Martínez et al., 2014) y la heterogeneidad del desarrollo económico costero en México (Seingier, Espejel y Fermán-Almada, 2009) permite la presencia de dunas muy deterioradas, pero también muy bien conservadas. Por ejemplo, las costas del golfo de México han estado sujetas a constantes presiones de cambio por el establecimiento de puertos industriales y comerciales (Siemens, Moreno-Casasola y Sarabia, 2006), mientras que las dunas del Pacífico norte están prácticamente intactas.

El objetivo de este artículo es presentar un análisis a nivel país donde se explora la situación actual del conocimiento de un ecosistema clave, las DC en México, para mostrar la importancia de definir vacíos de conocimiento e indicar las oportunidades y prioridades para la investigación de este ecosistema a nivel nacional. El análisis del conocimiento de las DC en México permitirá, por un lado, comprender los factores que han determinado estos estudios y, por otro, definir los caminos del futuro. Este análisis permitirá subsanar los vacíos en el conocimiento para contar con mejor información para la toma de decisiones sobre el manejo y la conservación de estos ecosistemas.

Materiales y métodos

Se hizo una búsqueda intensiva de la literatura publicada sobre estudios realizados en México y enfocados en las DC. Se consultaron las siguientes bases de datos: ISI (Institute for Scientific Information) Web of Science, EBSCO (Elton B. Stephens Company), BioOne, Scielo (Scientific Electronic Library Online), Redylac (Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe) y Google Scholar. Se realizó una primera búsqueda en octubre de 2012; sin embargo, tanto la base de datos Google Scholar como las referencias bibliográficas de muchos artículos y capítulos revelaron información de revistas no indexadas en las bases de datos anteriores, por lo que la literatura fue solicitada directamente a los autores. Lo anterior permitió que la base de datos se completara en noviembre de 2014. Las siguientes palabras se utilizaron en los motores de búsqueda: «dune» and «Mexico» not «New Mexico» para bases de datos en inglés, y «duna», «arenal» y «médano» para las bases de datos en español. Para complementar la información de la literatura científica se buscaron también, tanto en Internet como solicitando directamente a los autores, libros y capítulos de libros de divulgación, con estudios de DC de México. La bibliografía se categorizó con base en las líneas de investigación identificadas en los diferentes artículos científicos conforme se elaboraba la base de datos (tabla 1). Para conocer la distribución espacial del conocimiento sobre DC se georreferenciaron los sitios de estudio citados en las publicaciones, y posteriormente fueron sobrepuestos con el marco geoestadístico del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (Inegi, 2010).

Resultados y discusión

Tendencias generales

Se analizaron 156 artículos científicos, 3 libros y 37 capítulos de libros. Los artículos están publicados en 87 revistas, de las cuales el 85% son revistas internacionales indexadas con factor de impacto de 0.15 a 8.2, puntaje común en el área de ecología, que es el tema más publicado. Por esta razón, el mayor conocimiento (72%) de las revistas de las DC mexicanas está en inglés. Casi la mitad (44%) de los artículos científicos son estudios descriptivos de ecología vegetal, el 25% son de geomorfología, mineralogía y/o geología de las DC, de las interacciones ecológicas (12%) y de ecología animal (9%) (fig. 1a). Muy poca investigación (5%) se ha publicado sobre diagnósticos integrados referentes al impacto ambiental y riesgo costero, y solo el 4% de los artículos se enfocan en las dunas como elemento importante del manejo integrado de la zona costera y/o para la valoración de servicios del ecosistema (1%). Resalta la predominancia de estudios con enfoque en la ecología vegetal e interacciones ecológicas realizados en el Atlántico, mientras que los estudios sobre geología y mineralogía han sido más abundantes en el Pacífico. En el caso de los capítulos de libro, los estudios también se han enfocado en las descripciones de la

Tabla 1
Categorías y subcategorías temáticas encontradas en las publicaciones sobre DC de México.

1. Geología y geomorfología	2. Ecología	3. Impacto ambiental	4. Manejo y conservación
1.1. Geología y/o mineralogía costera	2.1. Ecología vegetal	3.1. Análisis de vulnerabilidad costera	4.1. Valoración de servicios del ecosistema
1.2. Geomorfología	2.2. Ecología animal		4.2. Manejo ambiental
1.3. Erosión costera y/o balance sedimentario	2.3. Interacciones bióticas		

vegetación (ecología vegetal) (43%); sin embargo, se observa un gran número (24%) de estudios dirigidos al planteamiento de estrategias de manejo ambiental y a la divulgación científica (fig. 1b).

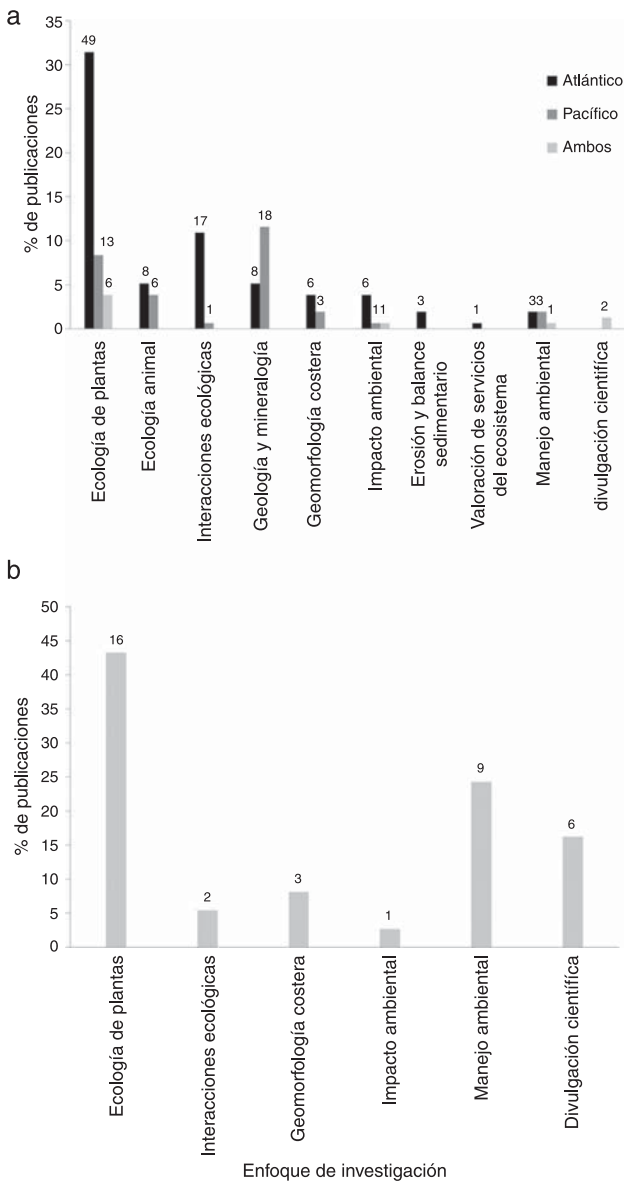

Figura 1. Principales enfoques de estudios encontrados en los artículos (a) y capítulos de libros sobre DC de México (b). El número sobre las barras indica el número de investigaciones publicadas.

Distribución geográfica de los estudios de dunas costeras

El análisis de la localización de las investigaciones dibuja un mapa muy interesante de la geografía del conocimiento que se tiene sobre las DC de México (fig. 2). El 65% de las investigaciones publicadas son de las dunas del golfo de México y mar Caribe, y solo el 28% son de las dunas del Pacífico. Únicamente 4 artículos describen las dunas de ambos litorales y 6 son descripciones generales o taxonómicas que no se refieren a un sitio en particular. La mayoría de los estudios ecológicos se han llevado a cabo en la costa del océano Atlántico, pero la investigación geológica se ha realizado predominantemente en la costa del Pacífico. Se registraron 289 sitos estudiados en 14 de los 17 estados costeros. Por mucho, las dunas del golfo de México y mar Caribe son las más estudiadas (167 sitios), en contraste con 122 sitios en el Pacífico. Destaca Veracruz como el estado costero con mayor número de sitios estudiados (97), seguido de Sonora y Baja California Sur (35 y 33, respectivamente). El hecho de que las DC del Atlántico hayan sido más estudiadas, en particular la costa del centro del golfo de México, se debe al establecimiento de una estación de investigaciones biológicas (La Mancha) que ha servido de laboratorio experimental para muchos investigadores. Por otro lado, las DC del norte de la península de Yucatán también se han estudiado intensamente por la ubicación de centros de investigación en las inmediaciones; por ejemplo, Centro de Investigaciones de Yucatán (CICY), Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) o del extinto Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos (Inireb). Aunque la ecología de las DC del Pacífico norte-noroeste parece que ha sido estudiada, en realidad se debe solo a 3 estudios regionales (Johnson, 1977, 1982 y Peinado et al., 2011). El difícil acceso a este litoral no ha ayudado a la investigación intensiva del mismo. Las DC del Pacífico sur casi no se han estudiado (fig. 2), debido probablemente a que solo recientemente se abrieron centros de investigación en estas zonas; también puede deberse al hecho de que las DC están estabilizadas con vegetación de selvas bajas, y por ello no son consideradas como vegetación de DC por los especialistas: 283 autores (66% nacionales, 34% extranjeros: 20% de Estados Unidos de América) de 91 instituciones (10% nacionales, 11% de Estados Unidos de América, el 79 restante dividido en otros 16 países) han realizado trabajos sobre DC en el país. Cabe destacar que el 77% de los autores solamente han participado en una publicación; del resto destacan: M. L. Martínez (32 artículos, 6 capítulos de libro), P. Moreno-Casasola (30 artículos, 19 capítulos), J. J. Kasper-Zubillaga (13 artículos) e I. Espejel (10 artículos, 6 capítulos). Las instituciones con mayor número de autores adscritos son la Universidad Nacional

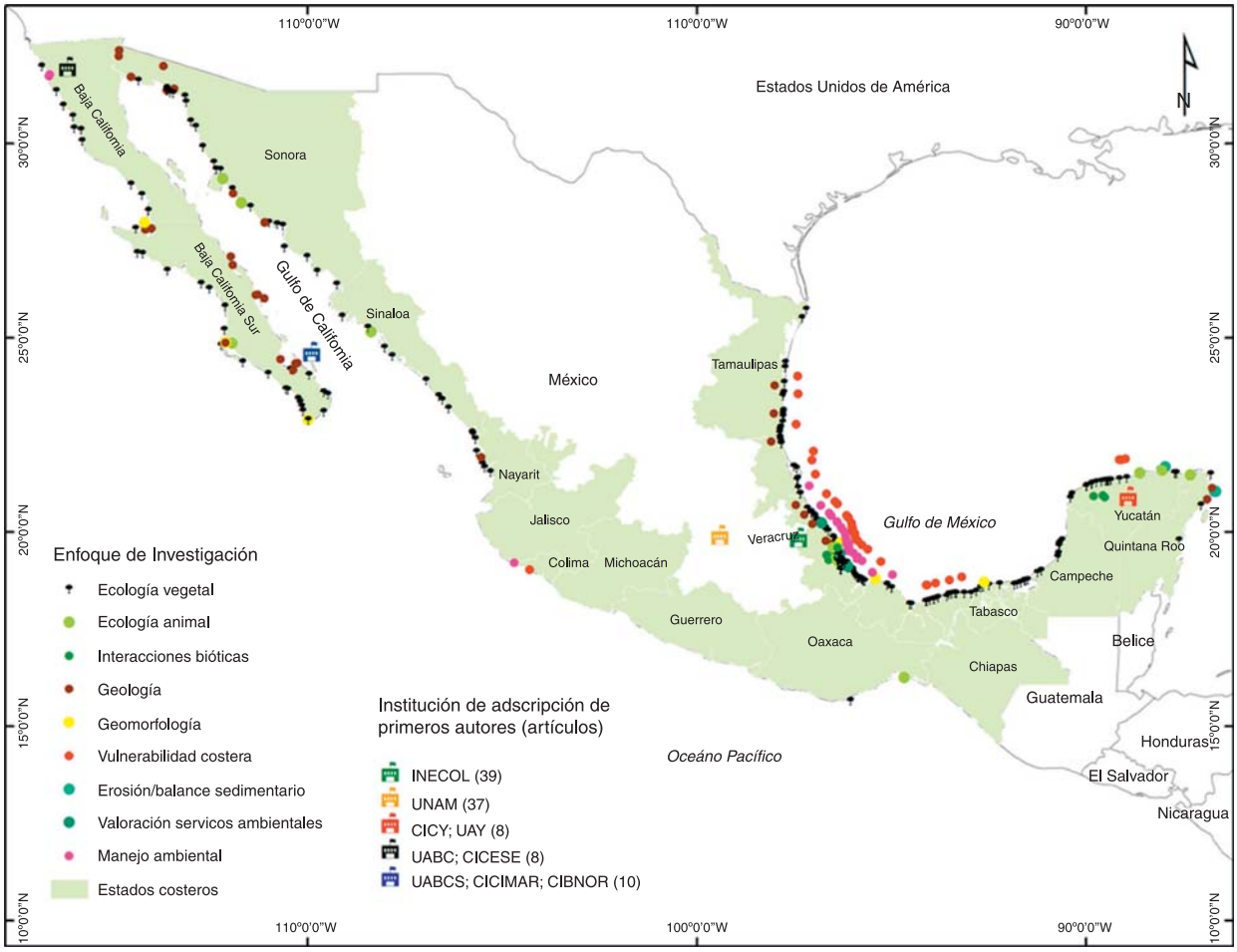

Figura 2. Geografía del conocimiento sobre DC en México. Elaboración a partir de los sitios de estudio referidos en los 135 artículos científicos.

Autónoma de México (51), el Instituto de Ecología, A. C. (43), el Centro de Investigaciones Científica de Yucatán, A. C. (16) y la Universidad Autónoma de Baja California (10).

Desarrollo histórico de la investigación en dunas costeras

La investigación en DC en México es un tema relativamente reciente. Aunque se registraron publicaciones desde principios de 1960, no fue hasta 1982 que se incrementaron las publicaciones y se ha mantenido la producción (fig. 3; anexo 1). Las primeras publicaciones registradas fueron de investigadores extranjeros en el tema de dinámica vegetal y sedimentaria de DC (Inman, Ewing y Corliss, 1966; Poggie, 1962; Psuty, 1965) (anexo 1). El inicio de las investigaciones ecológicas en países latinoamericanos como México data de hace 50 años (Martínez, Manson et al., 2006) porque la formación de científicos naturales comenzó apenas a mediados del siglo xx (Guevara y Moreno-Casasola, 1995). La formación de especialistas y grupos de investigación mexicanos sobre DC se refleja en las décadas 1990-2010, y la mayor producción se presenta en la última década.

Situación actual del conocimiento del ecosistema de dunas costeras de México de acuerdo con diferentes temáticas

Geología y geomorfología. El primer trabajo sobre la geomorfología de DC en México es de Psuty (1965), quien reconoció los cordones paralelos de dunas frontales de la costa de Tabasco y apunta que la formación de estas morfoestructuras describe la evolución de la línea de costa que ha ganado terreno al mar, y que se debe principalmente al intenso aporte de sedimento de las descargas fluviales del río Grijalva. Posteriormente, Coll-de Hurtado (1969) describió las características geomorfológicas de las dunas parabólicas del sur de Veracruz mediante el uso de imágenes aéreas. En los estudios sobre vegetación se evaluaban, de manera muy superficial, las características del suelo y los tipos de dunas, y no fue hasta 1992 que Dubroeucq, Geissert, Moreno-Casasola y Millot (1992), Hesp et al. (2011) y López-Portillo et al. (2011) caracterizaron geomorfológicamente y analizaron las características del suelo de las DC de la costa central del golfo de México. En estos trabajos se reconoce un gradiente de distribución de las geoformas que suele coincidir con el gradiente de la vegetación y de la cobertura vegetal, que influyen directamente en las características

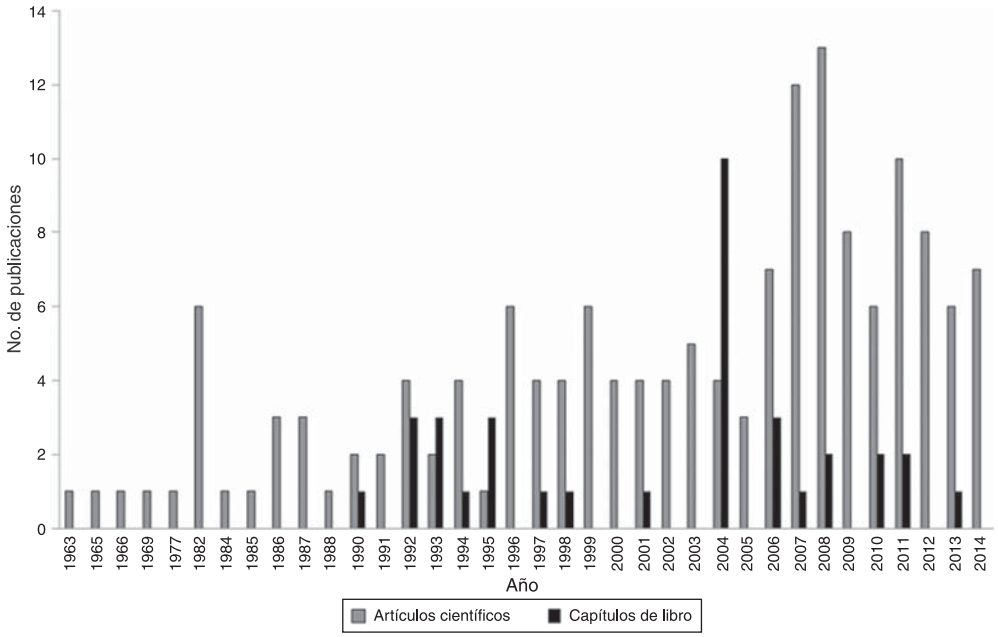

Figura 3. Número de publicaciones científicas en revistas indexadas y libros y capítulos de libro de divulgación sobre DC en México.

del suelo, aunque también han estado influenciadas por los movimientos tectónicos y las actividades antrópicas.

Los estudios de geología de las DC del Pacífico mexicano se han enfocado en los grandes sistemas del noroeste. Por su heterogeneidad paisajística la península de Baja California es la más estudiada. Inman et al. (1966) realizaron una descripción de las formas y de la dinámica de las DC de Guerrero Negro y describieron por primera vez en México la formación de barjanes. La dinámica sedimentaria de estas dunas obedece a la orientación casi unidireccional del viento que transporta los granos de arena hasta 60 km tierra adentro; los autores sugieren que la isla de barrera de Guerrero Negro es el resultado de un proceso de progradación de 1.6 km de los últimos 1,800 años (Fryberger, Krystinik y Schenk, 1990; Phleger y Ewing, 1962) y calculan una tasa de movimiento de las dunas, tierra adentro, de 18 m por año. Lo anterior es respaldado por Kasper-Zubillaga y Zolezzi-Ruíz (2007) y Kasper-Zubillaga, Carranza-Edwards y Morton-Bermea (2008), quienes determinaron que la presencia de detritus biogénicos y carbonatos en la composición sedimentaria de las DC tiene su origen en una mezcla de sedimentos oceánicos y aluviales. En contraste, estos autores mencionan que el origen de la arena de dunas desérticas corresponde a depósitos aluviales. Con los estudios sobre el origen y la dinámica de sedimento de las DC los científicos han podido delimitar y diferenciar a las DC de las dunas continentales. Se han utilizado métodos mineralógicos, granulométricos y petrográficos en las costas de Sonora (Armstrong-Altrin, Nagarajan, Lee, Kasper-Zubillaga y Córdoba-Saldaña, 2014; Kasper-Zubillaga y Carranza-Edwards, 2003, 2005; Kasper-Zubillaga, Carranza-Edwards y Morales-de la Garza, 2007; Kasper-Zubillaga, Acevedo-Vargas, Bermea y Zamora, 2008) y de Baja California (Murillo-de Nava y Gorsline, 2000; Murillo-de Nava, Gorsline, Goodfriend, Vlasov y Cruz-Orozco, 1999; Rodríguez-Revelo, Rendón-Márquez, Espejel, Jiménez-Orocio y Martínez, 2014; Russell y Johnson, 2000; Sewell, Johnson, Backus y Ledesma-Vázquez, 2007; Skudder, Backus, Goodwin y Johnson, 2006). Lo anterior también ha sido confirmado por Kasper-Zubillaga, Armstrong-Altrin, Carranza-Edwards, Morton-Bermea y Lozano-Santa Cruz (2013); Kasper-Zubillaga, Carranza-Edwards y Rosales-Hoz (1999); Kasper-Zubillaga y Dickinson (2001), y Armstrong-Altrin et al. (2012) para las costas del centro-noreste del golfo de México. Sin embargo, en estas zonas las descargas de ríos y el acarreo eólico juegan un papel crucial en transporte, depósito y aporte de sedimentos a los sistemas playa-DC.

Investigación ecológica. Distribución de la vegetación de dunas costeras

Poggie (1962) abrió camino en la investigación ecológica de DC en México a través de estudios de las asociaciones vegetales y las características particulares de las plantas para establecerse en ambientes extremos. Posteriormente, Johnson (1977) registró la diversidad de plantas de dunas de la costa del Pacífico norte, desde Tijuana (BC) hasta La Paz (BCS) (Johnson, 1977) y del golfo de Santa Clara (Sonora) hasta San Blas (Nayarit) (Johnson, 1982). Ella determinó que los límites de las asociaciones de plantas están dados por los límites climáticos y características sedimentarias de cada región. A partir de sus estudios, esta autora dividió a la península de Baja California en 3 regiones: norte, dominada por *Abronia maritima*, *Cakile maritima*, *Ambrosia chamissonis Mesembryanthuemum chilense*; centro, donde predominan *Sesuvium portulacastrum*, *Atriplex barclayana* y *Astragalus magdalenae*, y por último la región del Cabo, con *Jouvea pilosa*, *Sporobolus virginicus*, *Palafoxia linearis* y *Chamaesyce leucophylla*. Por otro lado, la autora

determinó que la vegetación de DC en la costa este del golfo de California se encuentra en 3 sectores: la región del desierto (cercano al río Colorado), dominada por *A. barclayana*, *Ambrosia dumosa* y *Atriplex canescens*; la región central, dominada por *A. maritima*, *S. portulacastrum*, *P. linearis*, *Croton californicus* y *Asclepias subaphylla*, y el sector tropical, dominado por *Diodia crassifolia*, *Pectis multiflosculosa*, *J. pilosa*, *Prosopis juliflora*, *Coccoloba* sp. y *Pithecellobium dulce*. Esta misma regionalización fue retomada por Moreno-Casasola et al. (1998) para la regionalización florística de las costas del país, aunque en este caso los autores también incluyeron la vegetación de ambientes costeros rocosos. Además, en este caso las delimitaciones geográficas se determinaron con base en el clima, el sustrato y las especies dominantes. A un nivel de regionalización más alto, Eskuche (1992) clasificó esta zona como «Abronietalia maritimae» en su esquematización de la vegetación de DC de América Latina. El autor toma como referencia la amplia distribución y dominancia de *A. maritima* en las playas y dunas frontales del noroeste de México, documentadas por Johnson (1977, 1982, 1985).

Por otro lado, los patrones de distribución de vegetación en las costas del Atlántico, así como el golfo de México y mar Caribe, han sido estudiados por Castillo y Moreno-Casasola (1998); Castillo, Popma y Moreno-Casasola (1991); Espejel (1984, 1986, 1987); Moreno-Casasola (1988); Moreno-Casasola y Espejel (1986); Moreno-Casasola, Maarel, Castillo, Huesca y Pisanty (1982), Moreno-Casasola et al. (1998), entre otros. Moreno-Casasola y Espejel (1986) agrupan la vegetación de dunas en 3 grandes regiones: golfo norte, dominado por *Ipomoea imperatii*, *I. pes-caprae*, *Uniola paniculata* y *Panicum amarulum*; golfo central, *I. imperatii*, *I. pes-caprae*, *Canavalia rosea*, *Croton punctatus*, *Chamaecrista chamaecristoides*, *Palafoxia lindenii*, *Coccoloba barbadensis*, *Chrisobalanus icaco*, *Diphysa robiniodes*, *Cedrella odorata* y *Bursera simaruba*, y Caribe, dominado por *Tournefortia gnaphaloides*, *C. maritima* y *Coccotrinax* sp. Además de la distribución geográfica, las autoras distinguen diferencias significativas entre gradientes topográficos que determinan la presencia de especies, delimitándolas entre vegetación de playa, de dunas embrionarias y frontales, de dunas activas, de hondonadas y de dunas estabilizadas. En este sentido, las autoras describen 89 tipos de comunidades vegetales: 58 en la costa del golfo de México y 31 para la península de Yucatán; cabe destacar que solo en la transición entre el golfo y el Caribe (Tabasco y Campeche) se han registrado 36 comunidades vegetales (Castillo et al., 1991).

Otros estudios botánicos importantes describen la biología y nuevos registros de especies endémicas (*Portulaca californica*, *Bursera littoralis* y *B. rupicola*) (Ocampo y Columbus, 2008; León-de la Luz y Pérez-Navarro, 2010, respectivamente) y nuevas especies como *Bidens cabopulmensis* (León-de la Luz y Medel-Narváez, 2013). Aunado a lo anterior, también existen artículos científicos donde se describe la distribución de 844 especies (tabla 2) de las alrededor de 1,600 especies de plantas de DC, documentadas por Moreno-Casasola et al. (1998), en las 5 regiones florísticas costeras de México. Las especies de plantas pioneras de las familias Leguminosas y Poáceas son las más abundantes; destacan *C. chamaecristoides*, *C. rosea*, *I. pes-caprae*, *S. virginicus*, *P. lindenii* y *S. portulacastrum* como las especies más estudiadas. El Pacífico norte cobra importancia por la presencia de especies restringidas y endémicas y por su heterogeneidad ambiental (Moreno-Casasola et al., 1998; Peinado, Aguirre, Delgadillo y Macías, 2007; Peinado et al., 2011). De acuerdo con Moreno-Casasola et al. (1998), por sus características tropicales las regiones del golfo de México, mar Caribe y Pacífico sur comparten un gran número de especies; sin embargo, el Pacífico sur es la región con menor número de investigaciones sobre DC del país.

Distribución de la fauna de dunas costeras

A diferencia de la flora, la fauna de DC ha sido poco investigada. Peralta-Peláez, Deloya y Moreno-Casasola (2007) registraron alrededor de 60 familias de insectos acuáticos asociados a las hondonadas inundables o lagunas interdunarias, y mencionan que la presencia de estos insectos está ampliamente relacionada con la gran cantidad de materia orgánica disponible en las lagunas interdunarias. Lo anterior fue comprobado en estudios posteriores (Peralta-Peláez y Moreno-Casasola, 2009; Infante-Mata, Moreno-Casasola, Madero-Vega, Castillo-Campos y Warner, 2011), donde se concluye que las algas y la vegetación asociada a las lagunas interdunarias intervienen en los procesos que determinan las propiedades fisicoquímicas de los cuerpos de agua y, a la vez, afectan a la presencia de organismos acuáticos, como son los insectos. En el caso de los reptiles, en Sonora se han registrado algunas especies *(Cnemidophorus tigris, Uta stansburiana, Callisaurus draconoides)* que usan a las DC como hábitat, a lo largo de diferentes gradientes (García y Whalen, 2003).

Otros organismos que utilizan las DC son las aves y los murciélagos, aunque el hábitat de estos no sean las dunas (Sosa-Escalante, Hernández y Segovia, 2001; Zárate-Ovando, Palacios y Reyes-Bonilla, 2008), sin embargo utilizan estos ambientes en las interacciones ecológicas en las que participan. La importancia de las DC como zonas de descanso, anidación y reproducción de aves fue documentada para las costas de Baja California (Zárate-Ovando et al., 2008), Sinaloa (Castillo-Guerrero, González-Medina y González-Bernal, 2009), Nayarit (Mellink, Riojas-López y Luevano, 2009) y Yucatán (Celis-Murillo, Deppe y Ward, 2012). Zárate-Ovando et al. (2008) registraron más de 80 especies de aves acuáticas que comparten hábitat con manglares y planicies arenosas. Los autores prueban la hipótesis de que la distribución de las aves se relaciona con la disponibilidad y concentración temporal de alimento, por lo que sugieren que existe la necesidad de acciones de conservación de todos los ecosistemas interrelacionados (manglar-duna-playa arenosa). En este sentido, Castillo-Guerrero et al. (2009) y Mellink et al. (2009) documentan sitios de anidación de aves acuáticas en el Pacífico sur. Sus resultados sugieren la implementación de áreas prioritarias de conservación, debido a que son sitios clave para la reproducción de aves tanto residentes como migratorias y que, además, están impactadas por actividades antropogénicas. Lo anterior fue sugerido para el caso de *Charadrius alexandrinus* (Escofet y Espejel, 1999) en las costas de Ensenada y para *Sternulla antillarum* (Fleishman y Blinick, 2011) en Sinaloa.

Tabla 2
Distribución de especies de plantas en los diferentes gradientes de estabilización de las DC en las diferentes regiones florísticas, con base en los publicaciones de Johnson (1977, 1982), Moreno-Casasola y Espejel (1986) y Semarnat (2013).

Microambiente	Pacífico Norte	Golfo de California	California Pacífico Sur	Golfo de México	Mar Caribe
Playa y dunas embrionarias	*Abronia maritima*, *Atriplex barclayana*, *Ambrosia dumosa dumosa*	*Ephedra trifurca*, *Atriplex barclayana*, *Ambrosia dumosa*	*Ipomoea pes-caprae*, *Sporobolus virginicus*, *Distichlis spicata*	*Uniola paniculata*, *Ipomoea imperatii*, *Canavalia rosea*, *Chamaecrista chamaecristodes*	*Sporobolus virginicus*, *Sesuvium portulacastrum*
Dunas frontales	*Nemacaullis denudata*	*Atroplex canescens*, *Helianthus niveus*, *Sporobolus virginicus*, *Sesuvium portulacastrum*, *Palafoxia linearis*	*Canavalia rosea*, *Pectis arenaria*	*Palafoxia lindenii*, *Croton punctatus*, *Schizachyrium littorale*, *Pectis arenaria*, *Commelina erecta*, *Coccoloba uvifera*	*Croton punctatus*, *Tournefortia gnaphalodes*, *Suriana maritima*, *Scaevola plumerii*, *Chrysobalanus icaco*
Dunas estabilizadas	*Ephedra californica*, *Croton californicus*, *Hazardia squarrosa*, *Lycium californicum*, *Atriplex julacea*, *Astragalus magdalenae*, *A. dumosa*, *Diospyros intricata*, *Oenothera drummondi*, *A. barclayana*, *Atrople leucophylla*, *Marina maritima*, *Jouvea pilosa*, *Jatropha cuneata*	*Larrea divaricata*, *Bursera microphylla*, *Croton californicus*, *Acacia farnesiana*, *Coccoloba* sp., *Lycium* sp., *Cylindropuntia alcahes*, *Cylindropuntia cholla*, *Fouquiera diguetti*, *Euphorbia leucophylla*	*Caesalpinia bonduc*, *Prosopis juliflora*, *Pithecellobium dulce*, *Guaiacum coulteri*, *Opuntia excelsa*, *Bumelia celastrina*, *Thevethia peruviana*, *Bursera linanoe*, *Jacquinia macrocarpa*, *Chrysobalanus icaco*	*Diphysa robinioides*, *Bursera simaruba*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Astrocaryum mexicanum*, *Ficus insipida*, *Quercus oleoides*, *Coccoloba barbadensis*, *Karwinskia humboldtiana*, *Nectandra salicifolia*, *Capparis flexuosa*, *Chrysobalanus icaco*	*Thrinax radiata*, *Coccothrinax readii*, *Pseudophoenix sargenteii*, *Caesalpinia vesicaria*, *Pithecellobium keyense*, *Bravaisia berlandieriana*, *Coccoloba uvifera*, *Cordia sebestena*, *Metopium brownei*
Hondonadas húmedas y lagos interdunarios	*Allenrolfia occidentalis*, *Batis maritima*, *Jatropha cinerea*, *Monanthocloe littoralis*, *Salicornia bigelovii*, *Salicornia virginica*, *Salicornia subtermalis*	ND	*Hydrocotyle bonarensis*, *Cyperus ariticulatus*, *Lippia nodiflora*, *Scirpus pungens*, *Cyperus ligularis*, *Typha domingensis*, *Phragmites comunis*, *Juncus acutus*		

ND: información no disponible.

En relación con los mamíferos, Cervantes y Hortelano (1991) documentaron la presencia de 20 especies de mamíferos pequeños, principalmente de la familia Phylostomatidae y Muridae, asociados al matorral y selva sobre DC del centro de Veracruz, pero no en las dunas frontales ni activas. Por otro lado, Lorenzo, Rioja, Carrillo y Cervantes (2008) registran lagomorfos *(Lepus flavigularis)* para la costa de Oaxaca.

En resumen, se han registrado alrededor de 166 especies de animales en las DC del litoral mexicano (tabla 3). Las aves son el grupo de animales más representado, especialmente aves acuáticas y playeras (65 especies), principalmente en las costas del Pacífico norte y golfo de California. En las costas del Atlántico la fauna de DC que ha sido estudiada es la que se analiza en trabajos de interacciones ecológicas, especialmente aves frugívoras y lepidópteros polinizadores asociados con la vegetación de dunas estabilizadas (ver sección de interacciones bióticas).

Adaptaciones al ambiente de dunas

Uno de los principales resultados de Johnson (1985) es la amplia distribución de *A. maritima*, especie de planta formadora de dunas que, a pesar de establecerse cercana al mar, no es halófita y se reproduce solamente por semillas. Estas semillas presentan adaptaciones para la dispersión marina y suficiente reserva energética para germinar en condiciones desfavorables (Johnson, 1985). La germinación y la capacidad de supervivencia de plantas, en sus diferentes estadios, también fueron documentadas para *Amaranthus greggii*, *P. lindenii* y *Trachypogon gouini* (Martínez y Moreno-Casasola, 1993), *Acacia farnesiana*, *A. macracantha*, *Mimosa chaetocarpa*, *Indigofera suffruticosa*, *Crotalaria incana* y *C. chamaecristoides* (Moreno-Casasola, Grime y Martínez, 1994), e *I. pes-caprae*, *C. rosea*, *P. lindenii* y *S. scoparium* (Valverde, Rincón y Pisanty, 1997).

Tabla 3
Número de especies de dunas costeras registradas en artículos científicos. No se incluyen las 1,600 especies documentadas por Moreno-Casasola et al. (1998) porque los autores no distinguen entre costas arenosas y rocosas.

Grupo de organismos	Especies registradas (n)	Atlántico	Pacífico
Planta	844	736	131**
Aves	65	56	15*
Himenoptera	64	64	–
Lepidoptera	20	20	–
Líquenes	17	17	–
Coleoptera	16	16	–
Diptera	13	13	–
Chiroptera	11	11	–
Rodentia	9	9	–
Odonata	8	8	–
Hemiptera	6	6	–
Hongos	6	6	–
Ephemeroptera	5	5	–
Orthoptera	4	4	–
Squamata	5	2	–
Trichoptera	3	3	–
Decapoda	1	1	–
Lagomorpha	1		1
Marsupialia	1	1	–
Mixomycetes	1	1	–
Total	1,100	979	151

* Zárate-Ovando et al. (2008) documentan 60 especies, pero no presentan listado.
** No se incluyeron las especies documentadas por Peinado, Aguirre, Delgadillo y Macías (2008), ya que no presentan listado.

Un conjunto de investigaciones resaltan que las especies de plantas que se localizan en las dunas embrionarias son capaces de germinar y crecer bajo intensidades altas de luz y altas concentraciones de sal (Martínez y Rincón, 1993), bajos contenidos de nutrientes y temperaturas extremas (Martínez, Valverde y Moreno-Casasola, 1992) y encubrimiento con arena (Martínez y Moreno-Casasola, 1996; Martínez, Moreno-Casasola y Rincón, 1994; Martínez, Moreno-Casasola y Vázquez, 1997). Este abanico de tolerancias al ambiente extremo de las DC es lo que Gallego-Fernández y Martínez (2011) consideran como filtros ambientales. Es decir, además de ser especies constructoras de dunas, estos trabajos han permitido reconocer que las especies colonizadoras de DC también son fijadoras de nutrientes y pueden generar condiciones que permiten el establecimiento de otras especies menos tolerantes al déficit de nutrientes (Kellman y Roulet, 1990), a lo que los investigadores nombran facilitación (Martínez, 2003, Martínez, Pérez-Maqueo y Vásquez, 2004).

Interacciones bióticas

A partir de los trabajos enfocados en la relación de las comunidades vegetales con su entorno se dio inicio a los estudios sobre las interacciones ecológicas. Se identificaron más de 400 interacciones biológicas en las DC que incluyen planta-planta, planta-micorriza y planta-animal en los diferentes microambientes, desde las dunas móviles hasta matorrales costeros y selvas. En el caso de las interacciones planta-planta se ha observado que la facilitación ocurre en las primeras etapas de sucesión vegetal (Martínez, 2003; Martínez et al., 2004). Durante este proceso, una o varias especies de plantas se establecen bajo la sombra de plantas previamente existentes, las cuales amortiguan las condiciones limitantes del ambiente (movimiento de arena, temperaturas extremas, sequía y escasez de nutrientes) y promueven el remplazo de especies. Durante la sucesión hay un fuerte recambio de especies que está determinado por la topografía de las dunas (Martínez, Vázquez y Sánchez-Colón, 2001), así como por la dominancia de especies colonizadoras tardías (Álvarez-Molina et al., 2013). Otros tipos de interacción planta-planta que se han estudiado son el epifitismo y el parasitismo. García-Franco (1996) documentó la distribución de 6 especies de *Tillandsia* y una de *Phoradendron* sp. y su asociación con árboles y arbustos de las dunas del centro de Veracruz, resultando *Randia laetevirens* el principal hospedero. Lo anterior, según García-Franco (1996), puede estar determinado por la ubicación del hospedero en los matorrales, el tiempo de exposición y la forma del arbusto, así como las estrategias de dispersión de las semillas de las epífitas que les permite dispersarse a grandes distancias. Por otro lado, también se ha encontrado que la planta parásita *Bdallophytum americanum* modifica la conductividad hidráulica de las raíces de *B. simaruba* (García-Franco, López-Portillo y Ángeles, 2007).

Se observó que en la costa del golfo de México los hongos micorrízicos promueven la fijación de nutrientes en las plantas pioneras, como *C. chamaecristoides*, *P. lindenii* y *T. gouinii* (Corkidi y Rincón, 1997a, b). En cambio, en las dunas de zonas áridas Sigüenza, Espejel y Allen (1996) analizaron la relación de 6 especies de plantas estrictas de dunas en diferentes gradientes de estabilización, desde pioneras *(A. maritima)* hasta fijadoras de arena *(Helianthus niveus)* y observaron que la colonización por micorrizas en plantas pioneras es poco frecuente. Además, se ha observado que las especies que se encuentran en dunas fijas, como en los climas húmedos, también son altamente colonizadas.

La influencia de ciertos grupos de animales, como himenópteros y lepidópteros, en el éxito reproductivo de las plantas es una de las interacciones ecológicas que más se ha abordado en las DC. Rico-Gray y Castro (1996); Oliveira, Rico-Gray, Díaz-Castelazo y Castillo-Guevara (1999); Torres-Hernández, Rico-Gray, Castillo-Guevara y Vergara (2000) y Cuautle y Rico-Gray (2003) destacaron que el éxito reproductivo de *Paullinia fuscecens*, *Opuntia stricta* y *Turnera ulmifolia* se incrementaba hasta en un 50% con la presencia de hormigas que actúan como defensa contra la herbivoría. Lo anterior fue comprobado por Canto, Parra-Tabla y García-Franco (2004) en la costa de la península de Yucatán, quienes analizaron el efecto de la herbivoría sobre *Anthurium schlechtendalii*, determinando que la defoliación no disminuye el crecimiento de la planta pero sí la floración, teniendo por lo tanto un efecto negativo en el éxito reproductivo. Asimismo, Rico-Gray et al. (1998) y Díaz-Castelazo, Rico-Gray, Oliveira y Cuautle (2004) han registrado 208 asociaciones entre 43 especies de plantas con néctar y 31 especies de hormigas para las dunas del centro del golfo de México. Otras estrategias de reproducción, como la fenología, la morfología y la coloración de flores, así como el comportamiento de los visitantes (polinizadores) para obtener recompensas (néctar), también se han registrado para las plantas *Lantana camara* y *Psittacanthus calyculatus* (Granja-Barros, Rico-Gray

y Díaz-Castelazo, 2001) y *C. chamaecristoides* (Arceo-Gómez, Martínez, Parra-Tabla y García-Franco, 2012).

Ortiz-Pulido, Laborde y Guevara (2000) documentan 54 especies de aves frugívoras en 176 interacciones con 84 especies de plantas de manglar-matorral y selva sobre dunas en el centro de Veracruz; los investigadores concluyen que las semillas dispersadas por aves en fragmentos de matorral de DC provienen de ecosistemas cercanos, lo que resalta el papel de las aves en la colonización de nuevas especies de plantas en los procesos de sucesión vegetal. Cada una de estas interacciones juega un papel importante en la formación de nuevos tipos de vegetación y microhábitas —lagunas interdunarias, conformadas por organismos de agua dulce— sobre los suelos arenosos (Peralta-Peláez et al., 2007; Peralta-Peláez y Moreno-Casasola, 2009).

Impacto ambiental

Siemens et al. (2006) hacen una síntesis de la degradación ambiental a la que han estado sujetas las DC y los humedales interdunarios durante más de 300 años en el puerto de Veracruz debido al cambio de uso de suelo. La ciudad de Veracruz, referente del comercio portuario en el país, se encuentra asentada sobre uno de los sistemas más grandes de DC parabólicas (López-Portillo et al., 2011), donde existían muchos lagos interdunarios y humedales que han sido rellenados con fines inmobiliarios. Por otro lado, Martínez, Gallego-Fernández, García-Franco, Moctezuma y Jiménez (2006) y Oropeza-Orozco et al. (2011) evaluaron la vulnerabilidad de las DC del golfo de México, encontrando que las dunas cercanas a asentamientos humanos han disminuido su superficie de distribución, lo que las hace más vulnerables tanto a los factores ambientales como antropogénicos. El enfoque de estas investigaciones está dirigido a evaluar a los ecosistemas y analizar si presentan las condiciones que le permitan enfrentarse a perturbaciones o estresores externos. Martínez, Gallego-Fernández et al. (2006) identifican 5 factores: geomorfológico, marino, eólico, vegetal y humano; que determinan la capacidad de los ecosistemas de dunas de ser vulnerables a cambios en el entorno; mientras que Oropeza-Orozco et al. (2011) mencionan que el cambio de uso de suelo es el principal factor de degradación que determina la vulnerabilidad de las DC. De igual manera, Seingier et al. (2009), en un estudio de país, determinaron que la vegetación natural en los ecosistemas de DC disminuyó más del 14% de 1970 al 2000, pero que esos cambios en la integridad del ecosistema no se ven reflejados en la economía local de las localidades costeras; concluyen que el desarrollo humano no se ha incrementado de manera importante a pesar del intenso cambio de uso de suelo, al menos dentro de los primeros 2 km tierra adentro, de los municipios costeros del país.

Recientemente, Mendoza-González, Martínez, Rojas-Soto, Vázquez y Gallego-Fernández (2013) exploraron las posibles consecuencias del cambio climático y el incremento en el nivel medio del mar en la distribución potencial de 6 especies de plantas de las costas del golfo de México y Caribe. Por medio de ejercicios de modelado del nicho, encontraron que probablemente el ámbito de distribución de las especies analizadas se verá constreñido, y algunas especies (las endémicas) tendrían un mayor riesgo de extinguirse. Sin embargo, también se detectaron zonas donde se podría concentrar la riqueza florística: centro de Veracruz y norte de la península de Yucatán. Sería recomendable explorar estas zonas como futuros refugios frente a escenarios de cambio climático e incremento en el nivel medio del mar.

Erosión y restauración

La erosión, un proceso natural en la dinámica costera, se convierte en un problema cuando los asentamientos humanos se ven afectados. A nivel mundial se han utilizado muchos métodos para disminuir los efectos erosivos de las playas, que se clasifican entre los métodos duros (infraestructura costera) y los métodos blandos (geotubos, restauración) (Charlier y de Meyer, 1998). En México son pocos los trabajos publicados sobre las acciones de mitigación de la erosión que incluyan a las DC, lo que no significa que no se lleven a cabo. Estos trabajos generalmente se documentan como reportes técnicos, que son de difícil acceso. Por ejemplo, Aguilar y Solís (2008) hacen referencia a la utilización de tubos geotextiles para la restauración o construcción de dunas frontales. Los autores hacen énfasis en el uso de este tipo de material para acelerar la recuperación de la duna frontal después del paso del huracán Wilma en 2005 y así disminuir las pérdidas económicas en la producción de sal de la laguna Las Coloradas, Yucatán (Aguilar y Solís, 2008). Aquí los investigadores resaltan los beneficios del uso de este tipo de material, pero también apuntan las desventajas y costos económicos que implica, de las cuales se pueden mencionar el monitoreo y costos de reparación.

No obstante, los costos económicos pueden disminuir con el uso de métodos de restauración naturales o mixtos. Es decir, si las DC artificiales son reforestadas con vegetación de dunas, se acelera la estabilización sin costos de reparación. Este método es documentado por Moreno-Casasola, Martínez y Castillo-Campos (2008) en la costa norte del puerto de Veracruz, y destacan que la revegetación y el recambio de especies de plantas son más rápidos cuando se utilizan especies «constructoras de dunas» de la región, rehabilitando las dunas degradadas y recuperando los servicios del ecosistema y de protección de la costa. Lo anterior cobra importancia debido a que la dinámica litoral y sedimentológica debe ser considerada ampliamente, no solo en el uso de geotextiles, sino en los proyectos de realimentación (relleno) de playas con materiales externos de las costas. Diez, Esteban y Paz (2009) y González-Vázquez, Silva, Mendoza y Delgadillo-Calzadilla, (2014) apuntan que, aunque los problemas de erosión se incrementan con los eventos meteorológicos, la interrupción de la dinámica litoral por los desarrollos turísticos es el principal factor que aumenta la erosión en playas de importancia turística del Caribe y Pacífico mexicano.

En relación con la restauración de dunas, Lithgow, Martínez y Gallego-Fernández (2014) proponen un índice que permite hacer un diagnóstico para determinar la necesidad y las posibilidades de realizar acciones de restauración en los primeros cordones de dunas, ubicados al fondo de la playa. Al utilizar el índice a lo largo de las costas de Veracruz, encontraron que alrededor de la mitad de los 31 sitios analizados muestran

diferentes niveles de degradación donde son necesarias acciones de restauración o rehabilitación.

Degradación ambiental

El incremento en los desarrollos turísticos sobre las playas y DC del Pacífico mexicano representan un impacto negativo en los sitios de anidación de las aves acuáticas y terrestres. Mellink y Riojas-López (2007) describieron las modificaciones históricas estructurales de la laguna de Cuyutlán (Colima), resaltando la construcción de canales a lo largo de la barra arenosa para conectar a la laguna con el mar, tanto para la desecación de la laguna para la industria salinera, al norte de la laguna, como para la navegación de embarcaciones que se dirigían al puerto de Manzanillo y, actualmente, para la producción pesquera. Sin embargo, la modificación de la barra arenosa exige constantes actividades de dragado en la costa interna y erosión en la zona de playa.

Pero no solo se ha evaluado el impacto de la industria sobre las DC, también el efecto de las actividades de recreación. El creciente interés por los deportes extremos ha hecho de las costas del noroeste mexicano una pista todoterreno para los aficionados de estos deportes. En Cabo Falso, al extremo sur de la península de Baja California, se ha perdido alrededor del 45% de la cobertura vegetal del sistema debido a las actividades de vehículos todoterreno, resultando en el incremento de la inestabilidad sedimentaria del sistema, es decir, cambios en la circulación eólica y erosión (Camacho-Valdéz et al., 2008). Por otro lado, Escofet y Espejel (1999) documentan que casi el 50% de las DC del corredor turístico Tijuana-Ensenada habían sido destruidas con fines inmobiliarios. Estas actividades impulsaron la inclusión de vegetación exótica como *Carpobrotus aequilaterus* y *C. edulis*, en principio para ornato y después para frenar el movimiento de las DC restantes, resultando en el desplazamiento de la vegetación original. Otro tipo de disturbio del turismo sobre las DC es la fragmentación por senderos o brechas, utilizados por los usuarios para llegar a la playa. Hesp et al. (2010) estimaron la presión de usuarios sobre la vegetación de dunas midiendo el número de especies de plantas que se pierden después del continuo paso de personas en diferentes pendientes de las DC. Los autores concluyen que las especies raras o que se encuentran en pendientes pronunciadas son las primeras en desaparecer, y que a partir del paso de 50 personas empieza a disminuir la vegetación.

Manejo y conservación

La integración de la perspectiva de desarrollo antropogénico, en todas sus variantes, resalta el efecto negativo de los asentamientos humanos sobre los ecosistemas dunares y que no habían sido evaluados. Esto llevó a los investigadores a preguntarse: ¿cómo disminuir el efecto antropogénico negativo y qué herramientas son necesarias para esto? La respuesta, según Moreno-Casasola (2006b), está en el manejo costero integral. Moreno-Casasola, en los libros *Diagnóstico ambiental del golfo de México* (Moreno-Casasola, 2004a) y *Coastal dunes: Ecology and conservation* (Moreno-Casasola, 2004b) hace una síntesis de la situación de las playas y dunas. Recomienda la creación de nuevas áreas protegidas, reglamentos para el uso y manejo de estos sistemas e impulsar las manifestaciones de impacto ambiental en la zona costera con base en la conservación del funcionamiento de la dinámica costera. Como modelo de estudio e implementación de acciones de manejo, el grupo de trabajo de Moreno-Casasola describió en detalle las acciones de manejo en uno de los sitios de DC más estudiados del país en su libro *Entornos veracruzanos, la costa de La Mancha* (Moreno-Casasola, 2006b). Aquí, los autores proponen el análisis de la historia social ligada a la ambiental, y la identificación de todos los actores involucrados, desde los habitantes hasta los tomadores de decisiones como componentes de las diferentes etapas de un «plan de manejo».

Por otro lado, de acuerdo con Espejel y Ojeda (1995), los desarrollos turísticos sobre suelos arenosos son prácticas que demandan recursos (agua) para poder mantenerlas, y en el caso de las especies exóticas se convierten en plagas difíciles de controlar. Debido a que no se pueden revertir los cambios en el paisaje por la instalación de asentamientos humanos, los remanentes de vegetación deberían ser considerados en los planes arquitectónicos de desarrollo (Escofet y Espejel, 1999). Espejel y Ojeda (1995) proponen, para las penínsulas de Baja California y Yucatán, que los parches de vegetación nativa que se han preservado funjan como bancos de semilla de plantas ornamentales en los desarrollos turísticos y habitacionales. Esta propuesta considera las cualidades ornamentales, así como la importancia ecológica de las especies vegetales nativas; es decir, las plantas pueden ser usadas para ornato, restauración, mitigación de erosión, floricultura, sombra, entre muchas más. Estas propuestas de inclusión y manejo anteriormente habían sido consideradas en la elaboración del primer plan de manejo costero en México (Gómez-Morín, Fermán, Escofet, Espejel y Torres, 1993), incorporado a los ordenamientos ecológicos de Baja California. Gómez-Morín et al. (1993) plantean la integración de un equipo interdisciplinario, coordinado por los diferentes niveles de gobierno, donde se consideren los aspectos ecológicos y sociales para el ordenamiento del territorio, considerando que los remanentes de DC de la región sean considerados como áreas ecológicas de conservación. Actualmente se han propuesto otros planes de manejo específicos a problemáticas ambientales; tal es el caso del plan de manejo para la erosión de la línea de costa (PMEC), propuesto por Peynador y Méndez-Sánchez (2010). Los autores hacen un diagnóstico de los cambios de la línea de costa adyacente al sistema de dunas de la ciudad de Ensenada, Baja California, y determinan que se pierden alrededor de 2,100 m^2 por año, lo que se convierte en una amenaza para la infraestructura costera y habitacional. La propuesta de manejo se basa en 4 políticas de acción: monitoreo e investigación, mitigación, regulación del desarrollo y conservación. Este último propone como área natural protegida al sistema de DC, principal fuente de almacenamiento y abasto de sedimentos para las playas. La Semarnat (2013), en colaboración con un grupo de investigadores, plantean 3 pasos importantes para un esquema de manejo de DC: a) caracterización, conocer la estructura de la DC, los diversos elementos cuyas características dependen de la dinámica del transporte de sedimentos y de la presencia y composición de la cubierta vegetal e identificar los principales factores que la deterioren; b) zonificación, para poder determinar

áreas de protección, aprovechamiento y/o restauración, y c) regulación de obras y actividades con base en la institución de instrumentos legales; por ejemplo, una ley de costas. En este sentido, González-Vázquez et al. (2014) proponen soluciones ingenieriles, con base en el buen conocimiento de la dinámica costera, a corto y largo plazos, en Barra de Navidad, Jalisco, tanto para la recuperación de zonas ampliamente degradadas como para la protección de las que aún se encuentran en buen estado. Estos autores proponen el uso de rompeolas sumergidos (solución a corto plazo) colocados y orientados en el sentido de la dinámica costera, así como el restablecimiento de la hidrodinámica local (solución a largo plazo) para restablecer el aporte natural de sedimentos a la zona de playa-duna.

Para terminar, vale la pena mencionar los 3 esfuerzos recientes, que de alguna manera llenarán algunos vacíos aquí identificados y que han sido financiados por la Conabio, la Conafor y la Semarnat; los 3 proyectos han permitido: a) concluir un estudio de la flora de dunas basado en las colectas de herbarios, colectas nuevas y muestreos ecológicos de todo el país (Espejel, Jiménez-Orocio y Peña-Garcillán, 2015); b) el diagnóstico nacional de las DC de México en el que se describen y clasifican las dunas y se proporcionan recomendaciones para su conservación, revegetación y reforestación en general, y por estados costeros (Martínez et al., 2014), y c) un libro con recomendaciones para el manejo y conservación de las DC del país (Semarnat, 2013).

Conclusiones

El análisis bibliográfico permitió visualizar los alcances de las ciencias naturales en el conocimiento sobre un ecosistema clave pero escaso, porque solo ocupa el 1% de la superficie del país. La investigación de las DC en México tiene su inicio en 1960 con un primer artículo y publicaciones aisladas posteriores, se fortalece como línea de investigación con un grupo de publicaciones de 1982 (fig. 3) y se consolida recientemente con la publicación de un primer libro sobre DC de México (Martínez et al., 2014) y un estudio florístico de país (Espejel et al., 2015). El análisis de la producción científica alrededor de las DC muestra un desarrollo común a las ciencias naturales: los enfoques de estudio han pasado de descripciones geológicas y geomorfológicas, florísticas y de estructura de la vegetación a estudios de vulnerabilidad, riesgo, propuestas de áreas de conservación, manejo integrado y análisis de escenarios de cambio climático. En los últimos años las publicaciones muestran que los científicos, en especial los ecólogos, han colaborado con los tomadores de decisiones en la elaboración de diagnósticos ambientales y en proyectos de restauración de DC y manuales de buenas prácticas.

Sin embargo, todavía falta mucho por hacer; hay tantos sitios y temas hiperestudiados como absolutamente desconocidos. Por ejemplo, hacen falta estudios de geología (mineralogía y proveniencia) y geomorfología (procesos que influyen en las geoformas) de las DC del Pacífico sur y del Caribe. Con la promoción a la minería en México, este tipo de estudios cobra importancia y el conocimiento de la mineralogía que se encuentra en reportes técnicos debe ser publicado, ya que se ha evidenciado que no siempre son precisos (Rodríguez-Revelo et al., 2014).

El inventario de flora y vegetación casi se completó con el proyecto de Conabio (Espejel et al., 2015). Sin embargo, todavía faltan investigaciones puntuales, sobre todo en el Pacífico sur, donde los herbarios son escasos y/o están en malas condiciones. Es importante fortalecer a las instituciones relacionadas con la biodiversidad del sur de México. Hay estudios de la década de 1980 que valdría la pena repetir y comparar para análisis de cambio de uso de suelo y de la estructura de las comunidades vegetales, así como de los cambios en la biodiversidad botánica. Los estudios de interacciones bióticas son un tema sumamente interesante, pero poco abordado en las DC, con la excepción de las costas del centro de Veracruz y las costas de la península de Yucatán. Es inquietante saber que no existen publicaciones con listados completos de la diversidad faunística de las DC; por esta razón, el tema queda abierto y es de importancia fundamental para la comprensión integrada de este ecosistema clave. Asimismo, sobre ecología animal se sabe lo que deriva de estudios de interacciones, principalmente de invertebrados y aves asociados al éxito reproductivo de las plantas de dunas. Pero no se sabe, o se sabe poco y en solo algunos sitios, sobre patrones de distribución de especies exclusivas, de comportamiento y adaptación a situaciones de estrés que dominan en las dunas, entre otros temas interesantes de evolución. Se sugiere un proyecto de Conabio, como el de flora de playas y dunas (Espejel et al., 2015), para conocer la diversidad faunística de las DC mexicanas.

Temas de impacto ambiental como la erosión, un problema que se acentúa por el mal manejo de las DC, no han sido abordados más que en casos puntuales en los estudios de vulnerabilidad de las costas del golfo de México y mar Caribe. A nivel geográfico, el conocimiento sobre DC está concentrado en el golfo de México y mar Caribe. Sin embargo, esas DC son de las más afectadas por los desarrollos urbanos y portuarios (Jiménez-Orocio et al., 2014; Seingier et al., 2009); poco se sabe de las dunas mejor conservadas en México en el Pacífico norte y golfo de California (Espejel et al., 2015). La investigación aplicada a la restauración y conservación, respectivamente, es una prioridad en ambas regiones. Con la excepción de la Estación Biológica de La Mancha, no se encontraron programas de monitoreo a largo plazo; de alguna forma, este artículo podría ser el inicio para investigaciones que se sumen de manera interdisciplinaria a otras investigaciones en las DC del país, como los estudios de Seingier et al. (2009). Por ejemplo, se desprende la necesidad de transformar las variables de la biodiversidad en indicadores de cambios ambientales que sean útiles para el monitoreo de los efectos del cambio climático o del impacto ambiental de los proyectos de desarrollo costero.

Esta revisión y análisis resultaron útiles para invitar a analizar el conocimiento sobre un ecosistema tan importante como las DC mexicanas y armar una política que fortalezca las investigaciones para completar los vacíos y llenar las omisiones en conocimiento científico. En particular, este análisis señala los diferentes aspectos como prioritarios: a) conocer las características geológicas y mineralógicas de las dunas, sobre todo frente a los escenarios de explotación minera a que se están enfrentando estos ecosistemas de manera creciente; b) realizar un diagnóstico sobre las necesidades de conservación y restauración de las DC de México, para lo cual es fundamental contar

con c) conocimiento de la geomorfología de estos ambientes que permita comprender los procesos y la formación de las DC; d) inventarios de flora y vegetación de las costas del Pacífico sur; e) inventarios de la fauna, y f) fortalecer el conocimiento de las interacciones bióticas. Por último, es fundamental establecer más estaciones biológicas para realizar monitoreos a largo plazo que permitan analizar los riesgos de erosión a los que se enfrentarán las costas mexicanas en los escenarios de cambio climático e incremento en el nivel medio del mar. Con esta información, la gestión y el manejo de las costas se desarrollarán de manera informada, promoviendo la protección de los ecosistemas y la biodiversidad de México como insumo del desarrollo sustentable de las costas.

Agradecimientos

El presente trabajo se llevó a cabo gracias a la colaboración académica entre la Universidad Autónoma de Baja California y el Instituto de Ecología, A.C., cuyos investigadores conformaron y coordinaron el proyecto «Diagnóstico general de las dunas costeras de México», patrocinado por la Comisión Nacional Forestal (Conafor). Agradecemos ampliamente a la Dra. Patricia Moreno-Casasola, pionera y referente internacional en el estudio de dunas costeras en México, al facilitarnos material bibliográfico, pero principalmente por todo el conocimiento y apoyo incondicional brindado durante la formación académica de cada uno de los autores.

Anexo 1.

A. Cuadro sinóptico de la investigación de dunas costeras publicado en artículos científicos.

Litoral	Periodo	Línea de investigación	Cita	Aportes al conocimiento
Atlántico	1960-1970	Ecología de plantas	Poggie, 1962[a]	Bases para la clasificación de la estructura de las comunidades de vegetación y geomorfología
		Geomorfología costera	Coll-de Hurtado, 1969	
			Psuty, 1965[a]	
	1981-1990	Ecología de plantas	Altamirano y Guevara, 1982	Clasificación y ordenamiento de comunidades vegetales; gradientes físicos que determinan las asociaciones vegetales en la costa del golfo de México y mar Caribe
			Castillo y Carabias, 1982 González y Moreno-Casasola, 1982 Moreno-Casasola et al., 1982 Moreno-Casasola, 1982 Espejel, 1984 Espejel, 1986 Moreno-Casasola, 1986 Moreno-Casasola y Espejel, 1986 Espejel, 1987 Moreno-Casasola, 1988 Van der Maarel, Espejel y Moreno-Casasola, 1987[a] Kellman y Roulet, 1990[a]	
	1991-2000	Ecología animal	Cervantes y Hortelano, 1991; Morales-Mávil y Guzmán-Guzmán, 1994	Descripción de mastofauna en matorral y selva sobre DC. Análisis de procesos de sucesión vegetal; germinación y sobrevivencia de especies ante factores físicos restringentes; facilitación. Papel de micorrizas para el aprovechamiento de nutrientes. Análisis de la formación de microambientes (hondonadas húmedas). Patrones de variación morfológica. Interacciones planta-planta (preferencia de planta huésped por epífitas). Papel de las hormigas en el éxito reproductivo de especies de matorral sobre DC
		Ecología de plantas	Castillo et al., 1991 Martínez et al., 1992 Martínez y Rincón, 1993 Martínez y Moreno-Casasola, 1993 Martínez et al., 1994 Moreno-Casasola et al., 1994 Colunga-García, Estrada-Loera y May-Pat, 1996 Castillo y Moreno-Casasola, 1996 García-Franco, 1996 Martínez y Moreno-Casasola, 1996	

Litoral	Periodo	Línea de investigación	Cita	Aportes al conocimiento
			Martínez et al., 1997	
			Valverde et al., 1997	
			Castillo y Moreno-Casasola, 1998	
			Leirana-Alcocer y Parra-Tabla, 1999	
			Moreno-Casasola y Vázquez, 1999	
		Interacción ecológica	Rico-Gray y Castro, 1996	
			Corkidi y Rincón, 1997a, b	
			Rico-Gray et al., 1998	
			Vázquez, Moreno-Casasola y Barrera, 1998	
			Oliveira et al., 1999[a]	
			Torres-Hernández et al., 2000	
		Geología y/o mineralogía	Kasper-Zubillaga et al., 1999;	
			McLaren y Gardner, 2000[a]	
		Geomorfología costera	Dubroeucq et al., 1992[a]	
	2001-2010	Ecología animal	Sosa-Escalante et al., 2001	Papel de las aves granívoras en la distribución de semillas y establecimiento de especies leñosas en DC estabilizadas. Descripciones regionales y locales de comunidades vegetales. Comunidades vegetales asociadas a la geomorfología de DC. Análisis de balances sedimentarios; uso de técnicas ingenieriles para la recuperación de dunas erosionadas y vegetación para la restauración de DC. Análisis de los principales factores que influyen en la degradación y vulnerabilidad costera. Propuestas de manejo ambiental y aprovechamiento de especies leñosas por las comunidades humanas locales
			Durou, Dejean, Olmsted y Snelling, 2002[a];	
			Lara-López y González-Romero, 2002	
			Peralta-Peláez et al., 2007	
			Pérez-Ramos et al., 2010	
		Ecología de plantas	Granja-Barros et al., 2001	
			Martínez et al., 2001	
			Martínez, Vázquez, White, Thivet y Brengues, 2002	
			Castillo-Campos y Abreo, 2003	
			Martínez, 2003	
			Martínez et al., 2004	
			Cervera, Andrade, Sima y Graham, 2006	
			Vargas, Parra-Tabla, Feinsinger y Leirana-Alcocer, 2006	
			Cervera et al., 2007	
			Peralta-Peláez y Moreno-Casasola, 2009	
			Ricalde et al., 2010	
			Torres, Méndez, Dorantes y Durán, 2010	
		Erosión costera y/o Balance sedimentario	Aguilar y Solís, 2008[a]	
			Diez et al., 2009[a]	
		Impacto ambiental	Martínez, Gallego-Fernández et al., 2006	
			Siemens et al., 2006[a]	
			Batllori-Sampedro y Febles-Patrón, 2007	
			Psuty et al., 2009[a]	
			Hesp et al., 2010[a]	
		Interacción ecológica	Ortiz-Pulido et al., 2000	
			Cuautle y Rico-Gray, 2003	
			Canto et al., 2004	
			Díaz-Castelazo et al., 2004	
			Cuautle, Rico-Gray y Díaz-Castelazo, 2005	
			Capistrán-Barradas, Moreno-Casasola y Defeo, 2006	
		Geología y/o mineralogía	Kasper-Zubillaga y Carranza-Edwards, 2003;	
			Kasper-Zubillaga y Dickinson, 2001	
			Cabadas-Báez, Solleiro-Rebolledo, Sedov, Pi-Puig y Gama-Castro, 2010	

Litoral	Periodo	Línea de investigación	Cita	Aportes al conocimiento
		Geomorfología costera	Hesp y Martínez, 2008[a]	
		Manejo ambiental	Moreno-Casasola et al., 2008 Moreno-Casasola y Paradowska, 2009	
	2011-2014	Ecología animal	Celis-Murillo et al., 2012	Patrones de filtros ambientales, nicho ecológico; establecimiento de asociaciones vegetales en lagunas interdunarias; análisis de sucesión vegetal a largo plazo (recambio de especies); interacciones específicas planta-insecto. Análisis de cambio de uso de suelo como principal factor de vulnerabilidad. Identificación de sitios y acciones de restauración
		Ecología de plantas	Gallego-Fernández y Martínez, 2011 Infante-Mata et al., 2011 Moreno-Casasola, Castillo y Martínez, 2011; Moreno-Casasola, Infante-Mata y Madero-Vega, 2011 Parra-Tabla, Vargas, Naval, Calvo y Ollerton, 2011 Álvarez-Molina, Martínez, Pérez-Maqueo, Gallego-Fernández y Flores, 2012 Arceo-Gómez et al., 2012 Mendoza-González, Martínez, Lithgow, Pérez-Maqueo y Simonin, 2012; Mendoza-González, Martínez y Lithgow, 2014; Peralta-Peláez, Moreno-Casasola y López Rosas, 2014	
		Erosión costera y/o balance sedimentario	Armstrong-Altrin et al., 2012; González-Leija et al., 2013; Kasper-Zubillaga et al., 2013; Campos, Aguilar y Landgrave, 2014	
		Geología y/o mineralogía		
		Impacto ambiental	Oropeza-Orozco et al., 2011	
		Interacción ecológica	Arceo-Gómez, Martínez, Parra-Tabla y García-Franco, 2011 Ramos-Zapata, Zapata-Trujillo, Ortiz-Díaz y Guadarrama, 2011 Sánchez-Galván, Díaz-Castelazo y Rico-Gray, 2012; Villamil, Márquez-Guzmán y Boege, 2013	
		Geomorfología costera	Hesp et al., 2011[a]	
		Manejo ambiental	Martínez et al., 2012; Lithgow et al., 2014	
		Valoración de los servicios del ecosistema	Mendoza-González et al., 2013	
Pacífico	1960-1970	Geomorfología costera	Inman et al., 1966[a]	Balance sedimentario, acreción
	1970-1980	Ecología de plantas	Johnson, 1977[a]	Comunidades vegetales de la costa oeste
	1981-1990	Ecología de plantas	Johnson, 1982[a]	Diferenciación de las comunidades vegetales del golfo de California
			Johnson, 1985[a]	
		Geología y/o mineralogía	Pedrín-Avilés, Díaz-Rivera, Padilla-Arredondo, Sirkin y Stuckenrath,1987; Fryberger et al., 1990[a]	
	1991-2000	Ecología de plantas	Glenn, Olsen, Frye, Moore y Miyamoto, 1994[a]	Tolerancia de plantas pioneras a estrés salino, el papel de micorrizas en el uso de nutrientes y cambios en la bioquímica del suelo. Historia geológica de DC del centro de la península de BC. Propuestas de manejo para aves playeras que anidan en DC
		Interacción ecológica	Sigüenza et al., 1996[a]	
		Geología y/o mineralogía	Murillo-de Nava y Gorsline, 2000	
			Russell y Johnson, 2000[a]	
		Geomorfología costera	Murillo-de Nava et al., 1999	
		Manejo ambiental	Escofet y Espejel, 1999	

Litoral	Periodo	Línea de investigación	Cita	Aportes al conocimiento
	2001-2010	Ecología animal	García y Whalen, 2003	Descripción de comunidades de aves acuáticas, usos de diferentes hábitats, estacional y por disponibilidad de alimento. Sitios de anidación claves. Fitoasociación en la zona costera del Pacífico norte; zonas climáticas y características sedimentarias como factores limitantes de distribución de especies. Análisis de actividades de recreación turísticas como amenaza de degradación de DC. Análisis de mineralogía y granulometría para determinar origen y diferenciación entre DC y D continentales
			Lorenzo et al., 2008	
			Zárate-Ovando et al., 2008	
			Castillo-Guerrero et al., 2009	
			Mellink et al., 2009	
		Ecología de plantas	Romero-López, León-de la Luz, Pérez-Navarro y de la Cruz-Agüero, 2006	
			Peinado et al., 2007[a]	
			Salas-Morales, Schibli, Nava-Zafra y Saynes-Vásquez, 2007	
			Samis y Eckert, 2007[a]	
			León-de la Luz y Pérez-Navarro, 2010	
			Ocampo y Columbus, 2008	
			Peinado, Aguirre, Delgadillo y Macías, 2008[a]	
		Impacto ambiental	Mellink y Riojas-López, 2007	
		Geología y/o mineralogía	De Diego-Forbis et al., 2004[a]	
			Kasper-Zubillaga y Carranza-Edwards, 2005	
			Skudder et al., 2006[a]	
			Kasper-Zubillaga, Carranza-Edwards y Morales-de la Garza, 2007; Kasper-Zubillaga et al., 2007	
			Kasper-Zubillaga y Zolezzi-Ruíz, 2007	
			Kasper-Zubillaga y Faustinos-Morales, 2007	
			Sewell et al., 2007[a]	
			Bojórquez et al., 2008	
			Kasper-Zubillaga, Acevedo-Vargas et al., 2008; Kasper-Zubillaga, Carranza-Edwards et al., 2008	
			Kasper-Zubillaga, 2009	
			Armstrong-Altrin et al., 2014	
		Geomorfología costera	Camacho-Valdéz et al., 2008	
		Manejo ambiental	Peynador y Méndez-Sánchez, 2010	
	2011-2014	Ecología animal	Fleishman y Blinick, 2011[a]	Fitoasociación y descripción de especies endémicas restringidas a suelos arenosos. Proveniencia de sedimentos
		Ecología de plantas	Peinado et al., 2011[a]	
			León-de la Luz y Medel-Narváez, 2013	
		Geología y/o mineralogía	Ledesma-Vázquez, Carreño y Guardado-France, 2012; Rodríguez-Revelo et al., 2014;	
		Manejo ambiental	González-Vázquez et al., 2014	
Ambos	1991-2000	Divulgación científica	Martínez y Valverde, 1992	Descripciones generales de la ecología y características físicas de DC. Regionalización continental de DC en función de especies de plantas dominantes. Uso de plantas locales en el diseño de desarrollo urbano
		Ecología de plantas	Eskuche, 1992[a]	
			Martínez y Moreno-Casasola, 1998	
		Manejo ambiental	Espejel y Ojeda, 1995	
	2001-2010	Divulgación científica	Martínez, 2008	Descripciones generales de la ecología y características físicas de DC. Cambio de uso de suelo y marginación en municipios costeros con DC
		Ecología de plantas	León-de la Luz y Pérez-Navarro, 2007	
			Martínez y López-Barrera, 2008	
		Impacto ambiental	Seingier et al., 2009	
	2011-	Ecología de plantas	Álvarez-Molina et al., 2013	Descripción de especies endémicas restringidas a suelos arenosos

[a] Estudios realizados por extranjeros de instituciones extranjeras.

B. Cuadro sinóptico de la investigación de dunas costeras publicado en capítulos de libro.

Litoral	Periodo	Línea de investigación	Cita	Aportes al conocimiento
Atlántico	1990-2000	Ecología de plantas	Espejel, 1992	Clasificación y ordenamiento de comunidades vegetales, gradientes físicos que determinan las asociaciones vegetales en la costa del golfo de México y mar Caribe. Descripción de problemáticas ambientales y propuestas de área naturales protegidas
			Moreno-Casasola y Castillo, 1992	
			Moreno-Casasola, 1995b	
			Moreno-Casasola, 1997	
		Manejo ambiental	Moreno-Casasola y Castillo, 1990	
			Moreno-Casasola, 1994	
	2001-2010	Divulgación científica	Moreno-Casasola, 2004a	Descripciones generales, asociaciones vegetales, interacciones ecológicas y patrones de distribución de especies. Propuestas de manejo integral de la zona costera del centro del golfo de México
			Moreno-Casasola y Travieso-Bello, 2006	
			Moreno-Casasola, 2010	
		Ecología de plantas	Martínez, García-Franco y Rico-Gray, 2006	
			Durán, Torres y Espejel, 2010	
			Ellis y Martínez, 2010	
		Geomorfología costera	Psuty, 2004[a]	
		Impacto ambiental	Palma, 2008	
		Interacción ecológica	Martínez y García-Franco, 2004	
			Rico-Gray, Oliveira, Parra-Tabla, Cuautle y Díaz-Castelazo, 2004	
		Manejo ambiental	Moreno-Casasola, 2004b	
			Moreno-Casasola, 2006a	
			Moreno-Casasola et al., 2006a,b	
			Peresbarbosa et al., 2007	
	2011-	Ecología de plantas	Moreno-Casasola, Infante-Mata et al., 2011	Caracterización geomorfológica de DC de Veracruz. Análisis del efecto de especies introducidas sobre el establecimiento de vegetación nativa
		Geomorfología costera	López-Portillo et al., 2011	
		Impacto ambiental	Moreno-Casasola, Martínez, Castillo-Campos y Campos, 2013	
Pacífico	1990-2000	Ecología de plantas	Barbour, 1992[a]	Clasificación y ordenamiento de comunidades vegetales en gradientes físicos que determinan las asociaciones vegetales. Propuesta de ordenamiento territorial como instrumento de manejo y conservación en las costas de BC
			Johnson, 1985[a]	
			Moreno-Casasola, 1995a	
		Manejo ambiental	Espejel, 1993	
			Gómez-Morín et al., 1993	
	2001-2010	Ecología de plantas	Espejel et al., 2004	Las comunidades vegetales como indicadores de conservación
			Vázquez, 2004	
	2011-	Ecología de plantas	Vanderplank, 2011[a]	
Ambos	1990-2000	Ecología de plantas	Martínez, Moreno-Casasola y Castillo, 1993	Descripción general de las dunas costeras de México. Primer estudio de la clasificación y ordenamiento de la vegetación en 5 regiones florísticas a nivel país
			Moreno-Casasola et al., 1998	
	2001-2010	Divulgación científica	Lara-Lara et al., 2008	Clasificación y ordenamiento de comunidades vegetales en gradientes físicos que determinan las asociaciones vegetales
		Ecología de plantas	Espejel, Moreno-Casasola y Barbour, 2001	
		Geomorfología costera	Hesp, 2004[a]	
		Manejo ambiental	Moreno-Casasola, 2004a	
	2011-2014	Divulgación científica	Martínez et al., 2014	Diagnóstico general de las DC del país. Colaboración de los principales científicos de dunas para caracterizar geomorfológicamente y determinar sitios prioritarios para conservación y restauración. Elaboración de manual de buenas prácticas para el uso y manejo adecuado de las DC del país
		Manejo ambiental	Semarnat, 2013	

Referencias

Aguilar, S. y Solís, A. (2008). Coastal dune stabilization using geotextile tubes at Las Coloradas. *Geosynthetics*, 1–16.

Altamirano, R. M. y Guevara, S. (1982). Ecología de la vegetación de dunas costeras: semillas del suelo. *Biótica*, *7*, 569–575.

Álvarez-Molina, L. L., Martínez, M. L., Pérez-Maqueo, O., Gallego-Fernández, J. B. y Flores, P. (2012). Richness, diversity, and rate of primary succession over 20 year in tropical coastal dunes. *Plant Ecology*, *213*, 1597–1608.

Álvarez-Molina, L. L., Martínez, M. L., Lithgow, D., Mendoza-González, G., Flores, P., Ortiz-García, S., et al. (2013). Biological flora of coastal dunes and wetlands: *Palafoxia lindenii* A. Gray. *Journal of Coastal Research*, *29*, 680–693.

Arceo-Gómez, G., Martínez, M. L., Parra-Tabla, V. y García-Franco, J. G. (2011). Anther and stigma morphology in mirror-image flowers of *Chamaecrista chamaecristoides* (Fabaceae): Implications for buzz pollination. *Plant Biology*, *13*, 19–24.

Arceo-Gómez, G., Martínez, M. L., Parra-Tabla, V. y García-Franco, J. G. (2012). Floral and reproductive biology of the Mexican endemic *Chamaecrista chamaecristoides* (Fabaceae). *The Journal of the Torrey Botanical Society*, *139*, 260–269.

Armstrong-Altrin, J. S., Lee, Y. I., Kasper-Zubillaga, J. J., Carranza-Edwards, A., García, D., Eby, G., et al. (2012). Geochemistry of beach sands along the Western Gulf of Mexico, Mexico: Implication for provenance. *Chemie der Erde-Geochemistry*, *72*, 345–362.

Armstrong-Altrin, J. S., Nagarajan, R., Lee, Y. I., Kasper-Zubillaga, J. J. y Córdoba-Saldaña, L. P. (2014). Geochemistry of sands along the San Nicolás and San Carlos beaches, Gulf of California, Mexico: Implications for provenance and tectonic setting. *Turkish Journal of Earth Sciences*, *23*, 533–558.

Barbour, M. G. (1992). Life at the leading edge: The beach plant syndrome. En U. Seeliger (Ed.), *Coastal Plant Communities of Latin American* (pp. 291–307). San Diego, California: Academic Press, Inc.

Batllori-Sampedro, E. y Febles-Patrón, J. L. (2007). Salinity change in the coastal lagoon of Chabihau, Yucatán, Mexico. Effects of hurricane Isidoro and the construction of bridges in the coastal dune. *Ingeniería Hidráulica en México*, *22*, 61–69.

Bojórquez, I., Hernández, A., García, D., Nájera, O., Flores, F., Madueño, A., et al. (2008). Características de los suelos de las barras paralelas, playas y dunas de la llanura costera norte del estado de Nayarit, México. *Cultivos Tropicales*, *29*, 37–42.

Cabadas-Báez, H., Solleiro-Rebolledo, E., Sedov, S., Pi-Puig, T. y Gama-Castro, J. (2010). Pedosediments of karstic sinkholes in the eolianites of NE Yucatán: A record of Late Quaternary soil development, geomorphic processes and landscape stability. *Geomorphology*, *122*, 323–337.

Camacho-Valdéz, V., Murillo-Jiménez, J. M., Nava-Sánchez, E. H. y Turrent-Thompson, C. (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*, 553–560.

Campos, A., Aguilar, G. y Landgrave, R. (2014). Soil organic carbon stocks in Veracruz state (Mexico) estimated using the 1:250,000 soil database of Inegi: Biophysical contributions. *Journal of Soils and Sediments*, *14*, 860–871.

Canto, A., Parra-Tabla, V. y García-Franco, J. G. (2004). Variations in leaf production and floral display of *Anthurium schlechtendalii* (Araceae) in response to herbivory and environment. *Functional Ecology*, *18*, 692–699.

Capistrán-Barradas, A., Moreno-Casasola, P. y Defeo, O. (2006). Postdispersal fruit and seed removal by the crab *Gecarcinus lateralis* in a coastal forest in Veracruz, Mexico. *Biotropica*, *38*, 203–209.

Castillo, S. y Carabias, J. (1982). Ecología de la vegetación de dunas costeras: fenología. *Biótica*, *7*, 551–568.

Castillo, S. y Moreno-Casasola, P. (1996). Coastal sand dune vegetation: An extreme case of species invasion. *Journal of Coastal Conservation*, *2*, 13–22.

Castillo, S. A. y Moreno-Casasola, P. (1998). Análisis de la flora de dunas costeras del litoral Atlántico de México. *Acta Botanica Mexicana*, *45*, 55–80.

Castillo, S., Popma, J. y Moreno-Casasola, P. (1991). Coastal sand dune vegetation of Tabasco and Campeche, Mexico. *Journal of Vegetation Science*, *2*, 73–88.

Castillo-Campos, G. y Abreo, M. E. M. (2003). A new species of Casearia (Flacourtiaceae) from Mexico. *Novon*, *13*, 30–33.

Castillo-Guerrero, J. A., González-Medina, E. y González-Bernal, M. A. (2009). Patterns of occurrence and abundance of land birds on Saliaca Island, Sinaloa, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *80*, 211–218.

Celis-Murillo, A., Deppe, J. L. y Ward, M. P. (2012). Effectiveness and utility of acoustic recordings for surveying tropical birds. *Journal of Field Ornithology*, *83*, 166–179.

Cervantes, F. A. y Hortelano, Y. (1991). Mamíferos pequeños de la estación biológica El Morro de La Mancha, Veracruz, México. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Zoología*, *62*, 129–136.

Cervera, J. C., Andrade, J. L., Sima, J. L. y Graham, E. A. (2006). Microhabitats, germination, and establishment for *Mammillaria gaumeri* (Cactaceae), a rare species from Yucatán. *International Journal of Plant Sciences*, *167*, 311–319.

Cervera, J. C., Andrade, J. L., Graham, E. A., Durán, R., Jackson, P. C. y Sima, J. L. (2007). Photosynthesis and optimal light microhabitats for a rare cactus, *Mammillaria* gaumeri, in two tropical ecosystems. *Biotropica*, *39*, 620–627.

Charlier, R. H. y de Meyer, C. P. (1998). Retreating shorelines. En R. H. Charlier y C. P. de Meyer (Eds.), *Coastal Erosion, Response and Management* (pp. 155–295). New York: Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Coll-de Hurtado, A. (1969). *Fotointerpretación geomorfológica del cordón de dunas de la Laguna del Marqués, México: estado de Veracruz*. México, D.F.: Serie de cuadernos del Instituto de Geografía.

Colunga-García, P., Estrada-Loera, E. y May-Pat, F. (1996). Patterns of morphological variation, diversity, and domestication of wild and cultivated populations of agave in Yucatán, Mexico. *American Journal of Botany*, *83*, 1069–1082.

Corkidi, L. y Rincón, E. (1997a). Arbuscular mycorrhizae in a tropical sand dune ecosystem on the Gulf of Mexico I. Mycorrhizal status and inoculum potential along a successional gradient. *Mycorrhiza*, *7*, 9–15.

Corkidi, L. y Rincón, E. (1997b). Arbuscular mycorrhizae in a tropical sand dune ecosystem on the Gulf of Mexico II. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of species distributed in different early successional stages. *Mycorrhiza*, *7*, 17–23.

Cuautle, M. y Rico-Gray, V. (2003). The effect of wasps and ants on the reproductive success of the extrafloral nectaried plant *Turnera ulmifolia* (Turneraceae). *Functional Ecology*, *17*, 417–423.

Cuautle, M., Rico-Gray, V. y Díaz-Castelazo, C. (2005). Effects of ant behaviour and presence of extrafloral nectaries on seed dispersal of the Neotropical myrmecochore *Turnera ulmifolia* L. (Turneraceae). *Biological Journal of the Linnean Society*, *86*, 67–77.

De Diego-Forbis, T., Douglas, R., Gorsline, D., Nava-Sánchez, E., Macke, L. y Banner, J. (2004). *Late Pleistocene (Last Interglacial) terrace deposits, Bahía Coyote, Baja California Sur* (120) Mexico: Quaternary International.

Díaz-Castelazo, C., Rico-Gray, V., Oliveira, P. S. y Cuautle, M. (2004). Extrafloral nectary-mediated ant-plant interactions in the coastal vegetation of Veracruz, Mexico: Richness, occurrence, seasonality, and ant foraging patterns. *Ecoscience*, *11*, 472–481.

Diez, J. J., Esteban, M. D. y Paz, R. M. (2009). Cancún-Nizuc coastal barrier. *Journal of Coastal Research*, *25*, 57–68.

Dubroeucq, D., Geissert, D., Moreno-Casasola, P. y Millot, G. (1992). Soil evolution and plant communities in coastal dunes near Veracruz, Mexico. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologique*, *27*, 237–250.

Durán, R., Torres, W. y Espejel, I. (2010). Vegetación de dunas costeras. In R. Durán y M. Méndez (Eds.), *Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán* (pp. 136–137). Mérida: CICY, PPD-FMAM, Conabio, Seduma.

Durou, S., Dejean, A., Olmsted, I. y Snelling, R. R. (2002). Ant diversity in coastal zones of Quintana Roo, Mexico, with special reference to army ants. *Sociobiology*, *40*, 385–402.

Ellis, E. A. y Martínez, B. M. (2010). Vegetación y uso de suelo. En E. Florescano y J. Ortiz (Eds.), Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz (pp. 203-226). México, D. F.: Coordinación del estado de Veracruz para la conmemoración de la Independencia Nacional y la Revolución Mexicana.

Escofet, A. y Espejel, I. (1999). Conservation and management-oriented ecological research in the coastal zone of Baja California, Mexico. *Journal of Coastal Conservation*, *5*, 43–50.

Eskuche, U. (1992). La vegetación de las dunas marítimas de América Latina. *Bosque*, *13*, 23–28.

Espejel, I. (1984). La vegetación de las dunas costeras de la península de Yucatán I. Análisis florístico del estado de Yucatán. *Biótica*, *9*, 183–210.

Espejel, I. (1986). La vegetación de las dunas costeras de la península de Yucatán II. Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an, Quintana Roo. *Biótica*, *11*, 7–24.

Espejel, I. (1987). A phytogeographical analysis of coastal vegetation in the Yucatán Peninsula. *Journal of Biogeography*, *14*, 499–519.

Espejel, I. (1992). Coastal sand dune communities and soil relationships in Yucatán Peninsula, Mexico. En U. Seeliger (Ed.), *Coastal Plant Communities of Latin American* (pp. 323–334). San Diego, California: Academic Press, Inc.

Espejel, I. (1993). Conservation and management of dry coastal vegetation. En J. L. Fermán, L. Gómez-Morín y D. Wayne (Eds.), *Coastal Management in Mexico. The Baja California Experience* (pp. 119–136). New York: American Society of Civil Engineers.

Espejel, I., Moreno-Casasola, P. y Barbour, M. G. (2001). Coastal strand vegetation of La Frontera. En G. L. Webster y C. F. Bahre (Eds.), *Changing Plant Life of La Frontera: Observations on Vegetation in the United States/Mexico Borderlands* (pp. 187–193). New Mexico: The University of New Mexico Press.

Espejel, I., Ahumada, B., Cruz, Y. y Heredia, A. (2004). Coastal vegetation as indicators for conservation. En M. L. Martínez y N. P. Psuty (Eds.), *Coastal Dunes, Ecology and Conservation* (pp. 297–318). New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Espejel, M. I., Jiménez-Orocio, O. y Peña-Garcillán, P. (2015). *Flora de las playas y dunas costeras de México. Informe final Snib-Conabio, proyecto Núm. HJ007*. México D.F.: Facultad de Ciencias, Universidad Autoñoma de Baja California.

Espejel, I. y Ojeda, L. (1995). Native plants for recreation and conservation in Mexico. *Ecological Restoration*, *13*, 84–89.

Fleishman, A. B. y Blinick, N. S. (2011). Nesting least terns *Sternula antillarum* at Estero Cardonal, Sonora, Mexico: A newly discovered colony in the Gulf of California. *Marine Ornithology*, *39*, 277–279.

Fryberger, S. G., Krystinik, L. F. y Schenk, C. J. (1990). Tidally flooded back-barrier dunefield, Guerrero Negro area, Baja California, Mexico. *Sedimentology*, *37*, 23–43.

Gallego-Fernández, J. B. y Martínez, M. L. (2011). Environmental filtering and plant functional types on Mexican foredunes along the Gulf of Mexico. *Ecoscience*, *18*, 52–62.

García, A. y Whalen, D. M. (2003). Lizard community response to a desert shrubland-intertidal transition zone on the coast of Sonora, Mexico. *Journal of Herpetology*, *378*, 378–382.

García-Franco, J. G. (1996). Distribución de epifitas vasculares en matorrales costeros de Veracruz, México. *Acta Botanica Mexicana*, *37*, 1–9.

García-Franco, J. G., López-Portillo, J. y Ángeles, G. (2007). The holoparasitic endophyte *Bdallophyton americanum* affects root water conductivity of the tree *Bursera simaruba*. *Trees*, *21*, 215–220.

Glenn, E. P., Olsen, M., Frye, R., Moore, D. y Miyamoto, S. (1994). How much sodium accumulation is necessary for salt tolerance in subspecies of the halophyte *Atriplex canescens*? *Plant, Cell and Environment*, *17*, 711–719.

Gómez-Morín, L., Fermán, J. L., Escofet, A., Espejel, I. y Torres, G. (1993). Coastal lagoon managment in Baja California, Mexico. En J. Sorensen, F. Gable y F. Bandarín (Eds.), *The Managment of Coastal Lagoons and Enclosed Bays* (pp. 111–119). New Orleans: American Society of Civil Engineers.

González, J. y Moreno-Casasola, P. (1982). Ecología de la vegetación de dunas costeras: efecto de una perturbación artificial. *Biótica*, *7*, 533–550.

González-Leija, M., Mariño-Tapia, I., Silva, R., Enríquez, C., Mendoza, E. E., Escalante-Mancera, E., et al. (2013). Morphodynamic evolution and sediment transport processes of Cancun beach. *Journal of Coastal Research*, *29*, 1146–1157.

González-Vázquez, J. A., Silva, R., Mendoza, E. y Delgadillo-Calzadilla, M. A. (2014). Towards coastal management of a degraded system: Barra de Navidad, Jalisco, Mexico. *Journal of Coastal Research*, *71*, 107–113.

Granja-Barros, M., Rico-Gray, V. y Díaz-Castelazo, C. (2001). Sincronia de floração entre *Lantana camara* L. (Verbenaceae) e *Psittacanthus calyculatus* (Dc.) G. Don (Loranthaceae) ocorrentes nas dunas de La Mancha, Veracruz, Mexico. *Acta Botanica Mexicana*, *57*, 1–14.

Guevara, S. y Moreno-Casasola, P. (1995). Evaluación y conclusiones. En S. Guevara, P. Moreno-Casasola y J. Rzedowski (Eds.), *Logros y perspectivas del conocimiento de los recursos vegetales de México en vísperas del siglo* XXI (pp. 93–201). México, D.F.: Instituto de Ecología, A.C. y Sociedad Botánica de México, A.C.

Hesp, P. A. (2004). Coastal dunes in the tropics and temperate regions: Location, formation, morphology and vegetation processes. En M. L. Martínez y N. P. Psuty (Eds.), *Coastal Dunes, Ecology and Conservation* (pp. 29–49). New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Hesp, P. A. y Martínez, M. L. (2008). Transverse dune trailing ridges and vegetation succession. *Geomorphology*, *99*, 205–213.

Hesp, P. A., Schmutz, P., Martínez, M. L., Driskell, L., Orgera, R., Renken, K., et al. (2010). The effect on coastal vegetation of trampling on a parabolic dune. *Aeolian Research*, *2*, 105–111.

Hesp, P. A., Martínez, M., da Silva, G. M., Rodríguez-Revelo, N., Gutiérrez, E., Humanes, A., et al. (2011). Transgressive dunefield landforms and vegetation associations, Dona Juana, Veracruz, Mexico. *Earth Surface Processes and Landforms*, *36*, 285–295.

Inegi (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (2010). *Marco geoestadístico nacional 2010*. México, D.F.: Inegi.

Infante-Mata, D., Moreno-Casasola, P., Madero-Vega, C., Castillo-Campos, G. y Warner, B. G. (2011). Floristic composition and soil characteristics of tropical freshwater forested wetlands of Veracruz on the coastal plain of the Gulf of Mexico. *Forest Ecology and Management*, *262*, 1514–1531.

Inman, D. L., Ewing, G. C. y Corliss, J. B. (1966). Coastal sand dunes of Guerrero Negro, Baja California, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, *77*, 787–802.

Jiménez-Orocio, O., Espejel, I., Martínez, M. L., Moreno-Casasola, P., Infante-Mata, D. y Rodríguez-Revelo, N. (2014). Uso de las dunas y situación actual. En M. L. Martínez, P. Moreno-Casasola, I. Espejel, O. Jiménez-Orocio, D. Infante-Mata y N. Rodríguez-Revelo (Eds.), *Diagnóstico general de las DC de México* (pp. 81–94). México, D.F.: Comisión Nacional Forestal.

Jiménez-Orocio, O., Hesp, P., Martínez, M. L., Espejel, I. y Moreno-Casasola, P. (2014). Tipos de dunas. In M. L. Martínez, P. Moreno-Casasola, I. Espejel, O. Jiménez-Orocio, D. Infante-Mata, & N. Rodríguez-Revelo (Eds.), *Diagnóstico general de las DC de México* (pp. 27–48). México, D.F.: Comisión Nacional Forestal.

Johnson, A. F. (1977). A survey of the strand and dune vegetation along the Pacific and Southern gulf coasts of Baja California, Mexico. *Journal of Biogeography*, *7*, 83–99.

Johnson, A. F. (1982). Dune vegetation along the Eastern shore of the Gulf of California. *Journal of Biogeography*, *9*, 317–330.

Johnson, A. F. (1985). Ecología de *Abronia maritima*, especie pionera de las dunas del oeste de México. *Biótica*, *10*, 19–34.

Kasper-Zubillaga, J. J. (2009). Roundness in quartz grains from inland and coastal dune sands, Altar Desert, Sonora, Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, *61*, 1–12.

Kasper-Zubillaga, J. J., Carranza-Edwards, A. y Rosales-Hoz, L. (1999). Petrography and geochemistry of Holocene sands in the Western Gulf of Mexico: Implications for provenance and tectonic setting. *Journal of Sedimentary Research*, *69*, 1003–1010.

Kasper-Zubillaga, J. J., Carranza-Edwards, A. y Morales-de la Garza, E. (2007). Caracterización textural de la arena de la playa del golfo de California, México: implicaciones para los procesos costeros. *Ciencias Marinas*, *33*, 83–94.

Kasper-Zubillaga, J. J., Zolezzi-Ruíz, H., Carranza-Edwards, A., Girón-García, P., Ortiz-Zamora, G. y Palma, M. (2007). Sedimentological, modal analysis and geochemical studies of desert and coastal dunes, Altar Desert, NW Mexico. *Earth Surface Processes and Landforms*, *32*, 489–508.

Kasper-Zubillaga, J. J., Carranza-Edwards, A. y Morton-Bermea, O. (2008). Heavy minerals and rare earth elements in coastal and inland dune sands of El Vizcaino Desert, Baja California Peninsula, Mexico. *Marine Georesources and Geotechnology*, *26*, 172–188.

Kasper-Zubillaga, J. J., Acevedo-Vargas, B., Bermea, O. M. y Zamora, G. O. (2008). Rare earth elements of the Altar Desert dune and coastal sands, Northwestern Mexico. *Chemie der Erde-Geochemistry*, *68*, 45–59.

Kasper-Zubillaga, J. J., Armstrong-Altrin, J. S., Carranza-Edwards, A., Morton-Bermea, O. y Lozano-Santa Cruz, R. (2013). Control in beach and dune sands

of the Gulf of Mexico and the role of nearby rivers. *International Journal of Geosciences*, *4*, 1157–1174.

Kasper-Zubillaga, J. J. y Carranza-Edwards, A. (2003). Modern sands of the Gulf of Mexico: Discriminating fluvial and coastal sand composition. *Ciencias Marinas*, *29*, 621–630.

Kasper-Zubillaga, J. J. y Carranza-Edwards, A. (2005). Grain size discrimination between sands of desert and coastal dunes from Northwestern Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, *22*, 383–390.

Kasper-Zubillaga, J. J. y Dickinson, W. W. (2001). Discriminating depositional environments of sands from modern source terranes using modal analysis. *Sedimentary Geology*, *143*, 149–167.

Kasper-Zubillaga, J. J. y Faustinos-Morales, R. (2007). Scanning electron microscopy analysis of quartz grains in desert and coastal dune sands (Altar Desert, NW Mexico). *Ciencias Marinas*, *33*, 11–22.

Kasper-Zubillaga, J. J. y Zolezzi-Ruíz, H. (2007). Grain size, mineralogical and geochemical studies of coastal and inland dune sands from El Vizcaino Desert, Baja California Peninsula, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, *24*, 423–438.

Kellman, M. y Roulet, N. (1990). Nutrient flux and retention in a tropical sand-dune succession. *Journal of Ecology*, *78*, 664–676.

Lara-Lara, J. R., Arreola-Lizárraga, J. A., Calderón-Aguilera, L. E., Camacho-Ibar, V. F., de la Lanza-Espino, G., Escofet, A., et al. (2008). Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. En Conabio (Ed.), *Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad* (pp. 109–134). México, D.F.: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

Lara-López, M. S. y González-Romero, A. (2002). Alimentación de la iguana verde *Iguana iguana* (Squamata: Iguanidae) en La Mancha, Veracruz, México. *Acta Zoológica Mexicana*, *85*, 139–162.

Ledesma-Vázquez, J., Carreño, A. y Guardado-France, R. (2012). Biogenic coastal deposits: Isla del Carmen, Gulf of California, Mexico. *Facies*, *58*, 169–178.

Leirana-Alcocer, J. y Parra-Tabla, V. C. (1999). Factors affecting the distribution, abundance and seedling survival of *Mammillaria gaumeri*, an endemic cactus of coastal Yucatán, Mexico. *Journal of Arid Environments*, *41*, 421–428.

León-de la Luz, J. L. y Medel-Narváez, A. (2013). A new species of *Bidens* (Asteraceae: Coreopsidae) from Baja California Sur, Mexico. *Acta Botanica Mexicana*, *103*, 119–126.

León-de la Luz, J. L. y Pérez-Navarro, J. J. (2007). A new variety of *Cyrtocarpa edulis* (Anacardiaceae). *Acta Botanica Mexicana*, *79*, 63–67.

León-de la Luz, J. L. y Pérez-Navarro, J. J. (2010). Two new taxa of *Bursera* (Burseraceae) of Baja California Sur, Mexico. *Acta Botanica Mexicana*, *91*, 37–49.

Lithgow, D., Martínez, M. L. y Gallego-Fernández, J. B. (2014). The 'ReDune' index (Restoration of coastal Dunes Index) to assess the need and viability of coastal dune restoration. *Ecological Indicators*, *49*, 178–187.

López-Portillo, J. A., Martínez, M. L., Hesp, P. A., Hernández-Santana, J. R., Reyes-Vásquez, V., Gómez, A., et al. (2011). *Atlas de las costas de Veracruz. Manglares y dunas*. Xalapa: Secretaría de Educación del Estado de Veracruz, Universidad Veracruzana.

Lorenzo, C., Rioja, T. M., Carrillo, A. y Cervantes, F. A. (2008). Population fluctuations of *Lepus flavigularis* (lagomorpha: leporidae) at Tehuantepec Isthmus, Oaxaca, Mexico. *Acta Zoológica Mexicana*, *24*, 207–220.

Martínez, M. L. (2003). Facilitation of seedling establishment by an endemic shrub in tropical coastal sand dunes. *Plant Ecology*, *168*, 333–345.

Martínez, M. L. (2008). Dunas costeras. *Investigación y Ciencia*, *38*, 26–35.

Martínez, M. L., Valverde, M. T. y Moreno-Casasola, P. (1992). Germination response to temperature, salinity, light and depth of sowing of ten tropical dune species. *Oecologia*, *92*, 343–353.

Martínez, M. L., Moreno-Casasola, P. y Castillo, S. (1993). Biodiversidad costera: playas y dunas. En S. I. Salazar-Vallejo y N. E. González (Eds.), *Biodiversidad marina y costera de México* (pp. 160–181). México, D.F.: Conabio-CIQRO.

Martínez, M. L., Moreno-Casasola, P. y Rincón, E. (1994). Sobrevivencia y crecimiento de plántulas de un arbusto endémico de dunas costeras ante condiciones de sequía. *Acta Botanica Mexicana*, *26*, 53–62.

Martínez, M. L., Moreno-Casasola, P. y Vázquez, G. (1997). Effects of disturbance by sand movement and inundation by water on tropical dune vegetation dynamics. *Canadian Journal of Botany*, *75*, 2005–2014.

Martínez, M. L., Vázquez, G. y Sánchez-Colón, S. (2001). Spatial and temporal variability during primary succession on tropical coastal sand dunes. *Journal of Vegetation Science*, *12*, 361–372.

Martínez, M. L., Vázquez, G., White, D. A., Thivet, G. y Brengues, M. (2002). Effects of burial by sand and inundation by fresh and seawater on seed germination of five tropical beach species. *Canadian Journal of Botany*, *80*, 416–424.

Martínez, M. L., Pérez-Maqueo, O. y Vásquez, V. M. (2004). Facilitative interactions on coastal dunes in response to seasonal weather fluctuations and benefactor size. *Ecoscience*, *11*, 390–398.

Martínez, M. L., Gallego-Fernández, J. B., García-Franco, J. G., Moctezuma, C. y Jiménez, C. D. (2006). Assessment of coastal dune vulnerability to natural and anthropogenic disturbances along the Gulf of Mexico. *Environmental Conservation*, *33*, 109–117.

Martínez, M. L., García-Franco, J. G. y Rico-Gray, V. (2006). Las adaptaciones y las interacciones de las especies. En P. Moreno-Casasola (Ed.), *Entornos veracruzanos: la costa de La Mancha* (pp. 273–283). Xalapa: Instituto de Ecología, A.C.

Martínez, M. L., Manson, R. H., Balvanera, P., Dirzo, R., Soberón, J., García-Barrios, L., et al. (2006). The evolution of ecology in Mexico: Facing challenges and preparing for the future. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *4*, 259–267.

Martínez, M. L., Vázquez, G., López-Portillo, J., Psuty, N. P., García-Franco, J. G., Silveira, T. M., et al. (2012). Dinámica de un paisaje complejo en la costa de Veracruz. *Investigación Ambiental*, *4*, 151–160.

Martínez, M. L., Moreno-Casasola, P., Espejel, I., Jiménez-Orocio, O., Infante-Mata, D. y Rodríguez-Revelo, N. (2014). *Diagnóstico general de las dunas costeras de México*. México, D.F.: Comisión Nacional Forestal.

Martínez, M. L. y García-Franco, J. G. (2004). Plant-plant interactions in coastal dunes. En M. L. Martínez y N. P. Psuty (Eds.), *Coastal Dunes, Ecology and Conservation* (pp. 204–220). New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Martínez, M. L. y López-Barrera, F. (2008). Special issue: Restoring and designing ecosystems for a crowded planet. *Ecoscience*, *15*, 1–5.

Martínez, M. L. y Moreno-Casasola, P. (1993). Survival of seedling cohorts of a tropical legume on a sand dune system along the Gulf of Mexico: Influence of germination date. *Canadian Journal of Botany*, *71*, 1427–1433.

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*, *12*, 406–412.

Martínez, M. L. y Moreno-Casasola, P. (1998). The biological flora of coastal dunes and wetlands: *Chamaecrista chamaecristoides* (Colladon) I. & B. *Journal of Coastal Research*, *14*, 162–174.

Martínez, M. L. y Psuty, N. P. (2004). *Coastal Dunes, Ecology and Conservation*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.

Martínez, M. y Rincón, E. (1993). Growth analysis of *Chamaechrista chamaechristoides* (Leguminosae) under contrasting nutrient conditions. *Acta Oecologica*, *14*, 521–528.

Martínez, M. L. y Valverde, M. T. (1992). Las dunas costeras. *Ciencia*, *26*, 35–42.

Maun, M. A. (2009). *The Biology of Coastal Sand Dunes*. New York: Oxford University Press Inc.

McLaren, S. y Gardner, R. (2000). New radiocarbon dates from a Holocene aeolianite, Isla Cancún, Quintana Roo, Mexico. *Holocene*, *10*, 757–761.

Mellink, E. y Riojas-López, M. (2007). Modificaciones estructurales artificiales de Laguna Cuyutlán, Colima, México. *Revista Geográfica*, *142*, 131–142.

Mellink, E., Riojas-López, M. y Luevano, J. (2009). Breeding locations of seven charadruformes in coastal Southwestern Mexico. *Waterbirds*, *32*, 44–53.

Mendoza-González, G., Martínez, M., 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-González, G., Martínez, M. L., Rojas-Soto, O. R., Vázquez, G. y Gallego-Fernández, J. B. (2013). Ecological niche modeling of coastal dune plants and future potential distribution in response to climate change and sea level rise. *Global Change Biology*, *19*, 2524–2535.

Mendoza-González, G., Martínez, M. L. y Lithgow, D. (2014). Biological flora of coastal dunes and wetlands: *Canavalia rosea* (Sw.) DC. *Journal of Coastal Research*, *30*, 697–713.

Morales-Mávil, J. E. y Guzmán-Guzmán, S. (1994). Fauna silvestre de la zona de La Mancha, Veracruz, México. *La Ciencia y el Hombre*, *16*, 77–103.

Moreno-Casasola, P. (1982). Ecología de la vegetación de dunas costeras: factores físicos. *Biótica*, *7*, 577–602.

Moreno-Casasola, P. (1986). Sand movement as a factor in the distribution of plant communities in a coastal dune system. *Vegetatio*, *65*, 67–76.

Moreno-Casasola, P. (1988). Patterns of plant species distribution on coastal dunes along the Gulf of Mexico. *Journal of Biogeography*, *15*, 787–806.

Moreno-Casasola, P. (1994). Dunas y playas de Veracruz: posibilidades, problemática y perspectivas. En G. Castillo-Campos y M. T. Mejía-Saulés (Eds.), *Los recursos vegetales. Problemática ambiental de Veracruz* (pp. 21–30). Xalapa: Colegio Profesional de Biólogos de México, A.C., Universidad Veracruzana.

Moreno-Casasola, P. (1995a). Dry coastal ecosystems of the Pacific coast of Mexico and Central America. En E. Van der Maarel (Ed.), *Ecosystems of the World 2B. Dry Coastal Ecosystems. Africa, America, Asia and Oceania* (pp. 453–458). Amsterdam: Elsevier Publishing, Co.

Moreno-Casasola, P. (1995b). Dry coastal ecosystems of the Atlantic coast of Mexico and Central America. En E. Van der Maarel (Ed.), *Ecosystems of the World 2B. Dry Coastal Ecosystems. Africa, America, Asia and Oceania* (pp. 389–405). Amsterdam: Elsevier Publishing, Co.

Moreno-Casasola, P. (1997). Vegetation differentiation and environmental dynamics along the Mexican Gulf coast. A case study: Morro de la Mancha. En E. Van der Maarel (Ed.), *Dry Coastal Ecosystems* (pp. 469–482). Amsterdam: Elsevier Publishing, Co.

Moreno-Casasola, P. (2004a). Las playas y dunas del golfo de México. Una visión de la situación actual. En M. Caso, I. Pisanty y E. Escurra (Eds.), *Diagnóstico ambiental del golfo de México* (pp. 491–520). México, D.F.: Instituto Nacional de Ecología.

Moreno-Casasola, P. (2004b). A case study of conservation and managment of tropical sand dune systems: La Mancha-El Llano. En M. L. Martínez y N. P. Psuty (Eds.), *Coastal dunes, ecology and Conservation* (pp. 319–325). New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Moreno-Casasola, P. (2006a). Playas y dunas. En P. Moreno-Casasola, E. Peresbarbosa y A. C. Travieso-Bello (Eds.), *Estrategias para el manejo integral de la zona costera: un enfoque municipal* (pp. 121–149). Xalapa: Instituto de Ecología, A.C., Conanp, Gobierno del Estado de Veracruz.

Moreno-Casasola, P. (2006b). *Entornos veracruzanos: la costa de La Mancha*. Xalapa: Instituto de Ecología, A.C.

Moreno-Casasola, P. (2010). *Mar de arena*. Xalapa: Comisión del Estado de Veracruz para la Conmemoración de la Independencia Nacional y la Revolución Mexicana.

Moreno-Casasola, P. y Castillo, S. (1990). Establecimiento de reservas en sistemas de dunas costeras del golfo y Caribe de México. En J. L. Camarillo y F. Rivera (Eds.), *Áreas naturales protegidas y especies en peligro de extinción* (pp. 128–137). México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.

Moreno-Casasola, P. y Castillo, S. (1992). Dune ecology on the Eastern coast of Mexico. En U. Seeliger (Ed.), *Coastal Plants Communities of Latin American* (pp. 309–321). San Diego: Academic Press, Inc.

Moreno-Casasola, P., Castillo, S. y Martínez, M. L. (2011). Flora de las playas y ambientes arenosos (dunas) de las costas. En A. Cruz-Angón (Ed.), *La biodiversidad de Veracruz: estudio de estado* (pp. 229–238). Xalapa: Conabio, Gobierno del Estado de Veracruz, Universidad Veracruzana, Instituto de Ecología, A.C.

Moreno-Casasola, P. y Espejel, I. (1986). Classification and ordination of coastal sand dune vegetation along the Gulf and Caribbean Sea of Mexico. *Vegetatio*, *66*, 147–182.

Moreno-Casasola, P., Espejel, I., Castillo, S., Castillo-Campos, G., Durán, R., Pérez-Navarro, J. J., et al. (1998). Flora de los ambientes arenosos y rocosos de las costas de México. En G. Halffter (Ed.), *La diversidad biológica de Iberoamérica* (pp. 177–258). México, D.F.: Instituto de Ecología, A.C.

Moreno-Casasola, P., Grime, J. P. y Martínez, M. L. (1994). A comparative study of the effects of fluctuations in temperature and moisture supply on hard coat dormancy in seeds of coastal tropical legumes in Mexico. *Journal of Tropical Ecology*, *10*, 67–86.

Moreno-Casasola, P., Infante-Mata, D. y Madero-Vega, C. (2011). Germinación y supervivencia de dos especies de acahuales de selva baja importantes para restaurar dunas costeras. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *2*, 19–36.

Moreno-Casasola, P., Maarel, E., Castillo, S., Huesca, M. L. y Pisanty, I. (1982). Ecología de la vegetación de dunas costeras: estructura y composición en El Morro de La Mancha, Veracruz. *Biótica*, *7*, 491–526.

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

Moreno-Casasola, P., Martínez, M. L., Castillo-Campos, G. y Campos, A. (2013). The impacts on natural vegetation following the establishment of exotic *Casuarina plantations*. En M. L. Martínez, P. A. Hesp y J. B. Gallego-Fernández (Eds.), *Restoration of Coastal Dunes* (pp. 217–233). New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Moreno-Casasola, P. y Paradowska, K. (2009). Useful plants of tropical dry forest on the coastal dunes of the center of Veracruz State. *Madera y Bosques*, *15*, 21–44.

Moreno-Casasola, P., Salinas, M. G., Amador, L. E., Cruz, H. H., Juárez, A., Ruelas, L., et al. (2006). Plan de manejo comunitario La Mancha-El Llano. En busca de un desarrollo costero sustentable. En P. Moreno-Casasola, E. Peresbarbosa y A. C. Travieso-Bello (Eds.), *Estrategias para el manejo integral de la zona costera: un enfoque municipal* (pp. 121–149). Xalapa: Instituto de Ecología A.C., Conanp, Gobierno del Estado de Veracruz.

Moreno-Casasola, P., Salinas, M. G., Travieso-Bello, A. C., Juárez, A., Ruelas, L., Amador, L. E., et al. (2006). El paisaje costero: investigación para el manejo y la conservación. In K. Oyama y A. Castillo (Eds.), *Manejo, conservación y restauración de recursos naturales en México* (pp. 179–202). México, D.F.: UNAM, Siglo XXI.

Moreno-Casasola, P. y Travieso-Bello, A. C. (2006). Las playas y las dunas. En P. Moreno-Casasola (Ed.), *Entornos veracruzanos: la costa de La Mancha* (pp. 205–220). Xalapa: Instituto de Ecología, A.C.

Moreno-Casasola, P. y Vázquez, G. (1999). The relationship between vegetation dynamics and water table in tropical dune slacks. *Journal of Vegetation Science*, *10*, 515–524.

Murillo-de Nava, J. M., Gorsline, D. S., Goodfriend, A. G., Vlasov, V. K. y Cruz-Orozco, R. (1999). Evidence of Holocene climatic changes from aeolian deposits in Baja California Sur, Mexico. *Quaternary International*, *56*, 141–154.

Murillo-de Nava, J. M. y Gorsline, D. S. (2000). Holocene and modern dune morphology for the Magdalena Coastal Plain and Islands, Baja California Sur, Mexico. *Journal of Coastal Research*, *16*, 915–925.

Ocampo, G. y Columbus, J. T. (2008). Nota sobre *Portulaca californica* Legrand (Portulacaceae), una especie endémica poco conocida de Baja California Sur, México. *Acta Botanica Mexicana*, *83*, 25–32.

Oliveira, P. S., Rico-Gray, V., Díaz-Castelazo, C. y Castillo-Guevara, C. (1999). Interaction between ants, extrafloral nectaries and insect herbivores in Neotropical coastal sand dunes: herbivore deterrence by visiting ants increases fruit set in *Opuntia stricta* (Cactaceae). *Functional Ecology*, *13*, 623–631.

Oropeza-Orozco, O., Sommer-Cervantes, I., Carlos-Gómez, J., Preciado-López, J. C., Ortiz-Pérez, M. A. y López-Portillo, J. (2011). Assessment of vulnerability and integrated management of coastal dunes in Veracruz, Mexico. *Coastal Management*, *39*, 492–514.

Ortiz-Pulido, R., Laborde, J. y Guevara, S. (2000). Frugivoría por aves en un paisaje fragmentado: consecuencias en la dispersión de semillas. *Biotropica*, *32*, 473–488.

Palma, R. (2008). Vulnerabilidad de las costas: apuntes para una caracterización general. En A. Tejeda-Martínez, M. Guadarrama-Olvieria, C. A. Ochoa-Martínez, A. Medina-Chena, M. E. Equihua-Zamora y A. Cejudo-Báez, et al. (Eds.), *Estudios para un programa veracruzano ante el cambio climático* (p. 38). México, D.F.: Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología, Embajada Británica en México.

Parra-Tabla, V., Vargas, C. F., Naval, C., Calvo, L. M. y Ollerton, J. (2011). Population status and reproductive success of an endangered epiphytic orchid in a fragmented landscape. *Biotropica*, *43*, 640–647.

Pedrín-Avilés, S., Díaz-Rivera, E., Padilla-Arredondo, G., Sirkin, L. y Stuckenrath, R. (1987). Fauna de moluscos en afloramientos litorales de la bahía de La Paz. Baja California Sur, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, *48*, 9–21.

Peinado, M., Aguirre, J. L., Delgadillo, J. y Macías, M. A. (2007). Zonobiomes, zonoecotones and azonal vegetation along the Pacific coast of North America. *Plant Ecology*, *191*, 221–252.

Peinado, M., Aguirre, J. L., Delgadillo, J. y Macías, M. A. (2008). A phytosociological and phytogeographical survey of the coastal vegetation of Western North America. Part I: Plant communities of Baja California, Mexico. *Plant Ecology*, *196*, 27–60.

Peinado, M., Ocana-Peinado, F. M., Aguirre, J. L., Delgadillo, J., Macías, M. A. y Díaz-Santiago, G. (2011). A phytosociological and phytogeographical survey of the coastal vegetation of Western North America: Beach and dune vegetation from Baja California to Alaska. *Applied Vegetation Science*, *14*, 464–484.

Peralta-Peláez, L. A., Deloya, C. y Moreno-Casasola, P. (2007). Aquatic insects in dune lakes of the central region of the Gulf of Mexico. *Neotropical Entomology*, *36*, 342–355.

Peralta-Peláez, L. A., Moreno-Casasola, P. y López Rosas, H. (2014). Hydrophyte composition of dune lakes and its relationship to land-use and water physicochemistry in Veracruz, Mexico. *Marine and Freshwater Research*, *65*, 312–326.

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.

Peresbarbosa, E., Moreno-Casasola, P., Salinas, M. G., Ferriz, N., Castro, C., Martínez, E., et al. (2007). Reserva archipiélago: una alternativa de conservación para la costa de Veracruz. En G. Halffter, S. Guevara y A. Melic (Eds.), *Hacia una cultura de conservación de la diversidad biológica* (pp. 293–302). Zaragoza: Sociedad Entomológica Aragonesa.

Pérez-Ramos, E., Nieto-Montes de Oca, A., Vargas-Contreras, J. A., Cordes, J. E., Paulissen, M. A. y Walker, J. M. (2010). *Aspidoscelis sexlineata* (Sauria: Teiidae) in Mexico: Distribution, habitat, morphology, and taxonomy. *The Southwestern Naturalist*, *55*, 419–425.

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 and Coastal Manegement*, *53*, 350–357.

Phleger, F. B. y Ewing, G. C. (1962). Sedimentology and oceanography of coastal lagoons in Baja California, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, *73*, 145–182.

Poggie, J. J. (1962). *Coastal Pioneer Plants and Habitat in the Tampico Region, Mexico. Technical Report 17A*. Baton Rouge: Louisiana State University Press.

Psuty, N. P. (1965). Beach-ridge development in Tabasco, Mexico. *Annals of the Association of American Geographers*, *55*, 112–124.

Psuty, N. P. (2004). The coastal foredune: A morphological basis for regional coastal dune development. En M. L. Martínez y N. P. Psuty (Eds.), *Coastal dunes, ecology and conservation* (pp. 11–27). New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Psuty, N., Martínez, M. L., López-Portillo, J., Silveira, T., García-Franco, J. y Rodríguez, N. (2009). Interaction of alongshore sediment transport and habitat conditions at Laguna La Mancha, Veracruz, Mexico. *Journal of Coastal Conservation*, *13*, 77–87.

Ramos-Zapata, J. A., Zapata-Trujillo, R., Ortiz-Díaz, J. J. y Guadarrama, P. (2011). Arbuscular mycorrhizas in a tropical coastal dune system in Yucatán, Mexico. *Fungal Ecology*, *4*, 256–261.

Ricalde, M. F., Andrade, J. L., Durán, R., Dupuy, J. M., Sima, J. L., Us-Santamaría, R., et al. (2010). Environmental regulation of carbon isotope composition and crassulacean acid metabolism in three plant communities along a water availability gradient. *Oecologia*, *164*, 871–880.

Rico-Gray, V. y Castro, G. (1996). Effect of an ant-aphid interaction on the reproductive fitness of *Paullinia fuscecens* (Sapindaceae). *The Southwestern Naturalist*, *41*, 434–440.

Rico-Gray, V., García-Franco, J. G., Palacios-Ríos, M., Díaz-Castelazo, C., Parra-Tabla, V. y Navarro, J. A. (1998). Geographical and seasonal variation in the richness of ant-plant interactions in Mexico. *Biotropica*, *30*, 190–200.

Rico-Gray, V., Oliveira, P. S., Parra-Tabla, V., Cuautle, M. y Díaz-Castelazo, C. (2004). Ant-plant interactions: their seasonal variation and effects on plant fitness. En M. L. Martínez y N. P. Psuty (Eds.), *Coastal Dunes, Ecology and Conservation* (pp. 204–220). New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Romero-López, B. E., León-de la Luz, J. L., Pérez-Navarro, J. J. y de la Cruz-Agüero, G. (2006). Estructura y composición de la vegetación de la barra costera El Mogote, Baja California Sur, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, *79*, 21–32.

Rodríguez-Revelo, N., Rendón-Márquez, G., Espejel, I., Jiménez-Orocio, O. y Martínez, M. L. (2014). Análisis de proveniencia de las arenas del complejo de dunas parabólicas El Socorro, Baja California, México, mediante una caracterización mineralógica y granulométrica. *Boletín de la Sociedad Geológica de México*, *66*, 355–363.

Russell, P. y Johnson, M. E. (2000). Influence of seasonal winds on coastal carbonate dunes from the recent and Plio-Pleistocene at Punta Chivato (Baja California Sur, Mexico). *Journal of Coastal Research*, *16*, 709–723.

Salas-Morales, S. H., Schibli, L., Nava-Zafra, A. y Saynes-Vásquez, A. (2007). Flora of coastal Oaxaca, Mexico: Annotated checklist of Huatulco National Park. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, *81*, 101–130.

Samis, K. E. y Eckert, C. G. (2007). Testing the abundant center model using range-wide demographic surveys of two coastal dune plants. *Ecology*, *88*, 1747–1758.

Sánchez-Galván, I. R., Díaz-Castelazo, C. y Rico-Gray, V. (2012). Effect of hurricane Karl on a plant-ant network occurring in coastal Veracruz, Mexico. *Journal of Tropical Ecology*, *28*, 603–609.

Semarnat (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2013). *Manejo de ecosistemas de dunas costeras, criterios ecológicos y estrategias*. México, D.F.: Semarnat.

Seingier, G., Espejel, I. y Fermán-Almada, J. L. (2009). Cobertura vegetal y marginación en la costa mexicana. Investigación ambiental. *Ciencia y Política Pública*, *1*, 54–69.

Sewell, A. A., Johnson, M. E., Backus, D. H. y Ledesma-Vázquez, J. (2007). Rhodolith detritus impounded by a coastal dune on Isla Coronados, Gulf of Califomia. *Ciencias Marinas*, *33*, 483–494.

Siemens, H. A., Moreno-Casasola, P. y Sarabia, C. (2006). The metabolization of dunes and wedands by the city of Veracruz, Mexico. *Journal of Latin American Geography*, *5*, 7–29.

Sigüenza, C., Espejel, I. y Allen, E. B. (1996). Seasonality of mycorrhizae in coastal sand dunes of Baja California. *Mycorrhiza*, *6*, 151–157.

Skudder, P. A., Backus, D. H., Goodwin, D. H. y Johnson, M. E. (2006). Sequestration of carbonate shell material in coastal dunes on the Gulf of California (Baja California Sur, Mexico). *Journal of Coastal Research*, *22*, 611–624.

Sosa-Escalante, J. E., Hernández, S. y Segovia, A. (2001). *Chiroderma villosum* (Chiroptera: Phyllostomidae) en el estado de Yucatán, México. *Revista Mexicana de Mastozoología*, *5*, 68–71.

Torres, W., Méndez, M., Dorantes, A. y Durán, R. (2010). Estructura, composición y diversidad del matorral de dunas costera en el litoral yucateco. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, *86*, 37–51.

Torres-Hernández, L., Rico-Gray, V., Castillo-Guevara, C. y Vergara, J. A. (2000). Effect of nectar-foranging ants and wasps on the reproductive fitness of *Turnera ulmifolia* (Turneraceae) in a coastal sand dune in Mexico. *Acta Zoológica Mexicana*, *81*, 13–21.

Valverde, T., Rincón, E. y Pisanty, I. (1997). Growth response of six tropical dune plant species to different nutrient regimes. *Journal of Coastal Research*, *13*, 497.

Van der Maarel, E., Espejel, I. y Moreno-Casasola, P. (1987). Two-step vegetation analysis based on very large data sets. *Vegetatio*, *68*, 139–143.

Vanderplank, S. E. (2011). Rare plants of California in greater San Quintín, Baja California, Mexico. En J. W. Willoughby, B. K. Orr, K. Schierenbeck y N. Jensen (Eds.), *Proceedings of the CNPS conservation conference: Strategies and solutions* (pp. 381–387). Sacramento: California Native Plant Society.

Vargas, C. F., Parra-Tabla, V., Feinsinger, P. y Leirana-Alcocer, J. (2006). Genetic diversity and structure in fragmented populations of the tropical orchid *Myrmecophila christinae* var *christinae*. *Biotropica*, *38*, 754–763.

Vázquez, G. (2004). The rol of algal mats on community succession in dunes and dune slacks. En M. L. Martínez y N. P. Psuty (Eds.), *Coastal Dunes, Ecology and Conservation* (pp. 188–203). New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Vázquez, G., Moreno-Casasola, P. y Barrera, O. (1998). Interaction between algae and seed germination in tropical dune slack species: a facilitation process. *Aquatic Botany*, *60*, 409–416.

Villamil, N., Márquez-Guzmán, J. y Boege, K. (2013). Understanding ontogenetic trajectories of indirect defense: Ecological and anatomical constraints in the production of extrafloral nectaries. *Annals of Botany*, *112*, 701–709.

Zárate-Ovando, B., Palacios, E. y Reyes-Bonilla, H. (2008). Community structure and association of waterbirds with spatial heterogeneity in the Bahía Magdalena-Almejas wetland complex, Baja California Sur, Mexico. *Revista de Biología Tropical*, *56*, 371–389.

Capítulo II: Delimitación y descripción de las dunas costeras de México

Jiménez-Orocio, O., P. Hesp, M.L. Martínez, I. Espejel y P. Moreno-Casasola. 2014. Tipos de dunas. En M.L. Martínez, P. Moreno-Casasola, I. Espejel, O. Jiménez-Orocio, D. Infante-Mata y N. Rodríguez-Revelo (Eds.), Diagnóstico general de las dunas costeras de México (pp. 27-48) México, D.F.: Comisión Nacional Forestal. ISBN 978-607-8383-17-7.

Cómo se forman (elementos que intervienen y dinámica del movimiento)

Las playas y dunas intercambian sedimentos continuamente y son interdependientes. Es decir, interactúan continuamente y esta interacción tiene un impacto fuerte en la evolución y desarrollo de las costas (Packham y Willis, 1997). Un ejemplo de ello es lo que sucede cuando se modifican las fuentes de arena cercanas a la playa y dunas, como ocurre cuando los ríos se canalizan, se construyen presas río arriba, o bien se destruyen las dunas en la parte posterior de la playa. Como respuesta a estas alteraciones, se reajusta la dinámica sedimentaria de la costa y entonces las playas se hacen angostas e incluso llegan a desaparecer. Las dunas también pueden crecer o disminuir por efecto del oleaje y el viento que acumulan sedimentos, y también por la presencia de las minas submarinas de arena y los sedimentos aportados por los arroyos circunvecinos.

Las playas son ambientes muy dinámicos y autorregulados. Su comportamiento depende de cuatro factores (Pilkey et al., 1998): 1) la energía de las olas (proporcional a su altura); 2) la cantidad y tipo de arena en la playa; 3) la orientación de la playa y 4) la tasa de incremento o descenso del nivel del mar. Las playas mantienen un equilibrio natural entre estos cuatro factores que se reconoce como equilibrio dinámico. Cuando uno de los cuatro cambia, se desarrolla un ajuste en los otros tres para volver al equilibrio dinámico. A veces estos reajustes naturales son los responsables de daños cuantiosos en las construcciones establecidas en las playas. Por ejemplo, durante las tormentas y huracanes, las olas incrementan su energía (tienen mayor altura y fuerza) y las playas responden aplanándose, con lo que la energía de las olas es amortiguada sobre una mayor superficie. Si se mantuviera una pendiente pronunciada, la gran energía de las olas se ejercería sobre una superficie menor y el daño a la costa sería mucho mayor. Así, conforme las playas se aplanan el impacto de

las olas disminuye. Sin embargo, cuando hay construcciones sobre las dunas, éstas absorben el oleaje de alta energía, y los daños materiales pueden ser cuantiosos. Esta interacción entre la playa y el oleaje es parte de la vida misma de la playa. Sin ella no llegaría arena y no existirían estos ecosistemas a los que el ser humano da tanto valor. El problema se produce cuando el hombre construye en una de las zonas más dinámicas de la tierra, y piensa que sus construcciones de cemento podrán detener la fuerza del mar.

En el caso de las dunas, la fuente inicial de arena para que se formen estas geoformas es la depositada en las playas gracias a las corrientes de agua del océano, o de lagos y ríos en dunas interiores. Cuando la arena de la playa queda expuesta al aire durante tiempo suficiente, se seca y entonces es susceptible de ser movida por el viento. Así da inicio la formación de las dunas costeras.

Aunque existen dunas de muchos tamaños y formas, todas se generan de la misma manera. Cada duna es un montículo de arena que se mueve y acumula como resultado de la acción del viento. Pye y Tsoar (1990) han realizado estudios detallados sobre el complicado proceso que da lugar a la formación de las dunas, y la siguiente descripción se basa en sus resultados. Se sabe que los factores críticos para la formación de dunas son: 1) el aporte de sedimentos; 2) el tamaño de los sedimentos; 3) la velocidad del viento y 4) la presencia de obstáculos. Una vez que existe el aporte de sedimentos, la formación de una duna empieza cuando la velocidad del viento es tal que puede levantar los granos de arena. Se ha calculado que la velocidad mínima para que haya movimiento de arena es de 4.5 metros/segundo. Casi toda la arena se transporta a una distancia muy cercana a la superficie del suelo. Cuando el viento sopla, los granos individuales de arena se mueven en una serie de brincos como resultado de un fenómeno conocido como saltación. Durante la saltación, una vez que los granos de arena están en el aire, describen una curva, volviendo a caer en el suelo, pero con un impacto tal que rebotan y son lanzados al aire nuevamente. El impacto de este rebote provoca que otros granos de arena también sean lanzados al aire, de manera que en realidad, más arena se puede poner en movimiento que la que el aire es capaz de levantar desde la superficie (Figura II-1). Conforme más granos de arena son impactados por los granos previamente en movimiento, más granos son lanzados hacia el aire, hasta que en poco tiempo, toda la superficie de la arena está en movimiento. Obviamente, conforme mayor es la velocidad del viento, mayor será la

distancia a la que viajan los granos de arena saltantes, y mayor será el impacto que tengan sobre los que están en la superficie de la arena. El movimiento de arena por lo tanto, también es mucho mayor. En la práctica se ha observado que el movimiento de arena más importante ocurre durante periodos de altas velocidades de viento, más que como resultado de vientos moderados, por ejemplo durante los nortes. Cuando uno se para en una playa o duna durante un norte en pocos minutos puede sentir la cara cubierta con una capa fina de arena.

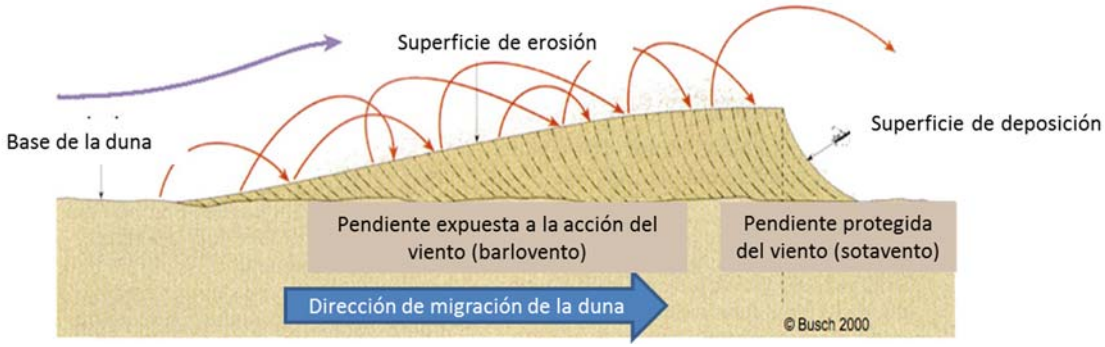

Figura II-1. Esquema donde se muestra el movimiento de la arena por medio de la saltación.

Una vez levantadas, las nubes de granos de arena saltantes viajarán en la misma dirección que el viento, hasta que éste pierde velocidad y los granos de arena sean depositados nuevamente. En esta etapa de la formación de las dunas, otro factor importante que afecta el movimiento de la arena es la presencia de obstáculos que modificarán a su vez, la velocidad del viento. Así pues, una duna empieza a formarse cuando el viento se encuentra con un obstáculo. Por ejemplo, cuando el viento choca contra un alga, una planta, una roca o un tronco caído, cambia de dirección y rodea este obstáculo, perdiendo velocidad. Conforme esto sucede, la arena es depositada hasta que eventualmente se forma un montículo de arena alrededor del obstáculo, llegando, incluso, a quedar cubierto de arena por completo. Este montículo, a su vez, representa un obstáculo aún mayor para el viento, con lo que se puede ir acumulando más y más arena. La forma que finalmente adquirirá la duna dependerá de su ubicación respecto al viento y del impacto que éste tenga sobre ella.

Dentro de los diferentes tipos de obstáculos que disminuyen la velocidad del viento y provocan que la arena sea depositada, las plantas son las más efectivas, ya que son capaces de crecer conforme la arena se va acumulando (Figura II-2). Hay muchas especies que tienen

esta capacidad, y forman ramas, tallos y rizomas para mantenerse sobre la superficie de la arena, evitando así ser cubiertas por ésta (Figura II-3). Los ejemplos más conocidos de estas plantas son hierbas y arbustos de especies como *Ipomoea pes-caprae*, *Canavalia rosea*, *Croton punctatus, Palafoxia lindenii, Chamaecrista chamaecristoides* y *Uniola paniculata* en las costas mexicanas del Golfo de México (Moreno-Casasola, 1986) y *Abronia maritima* y *Uniola pittieri* en el Pacífico (Espejel et al., 2013). Se ha demostrado que estas especies son muy tolerantes al encubrimiento con arena (Martínez y Moreno-Casasola, 1996).

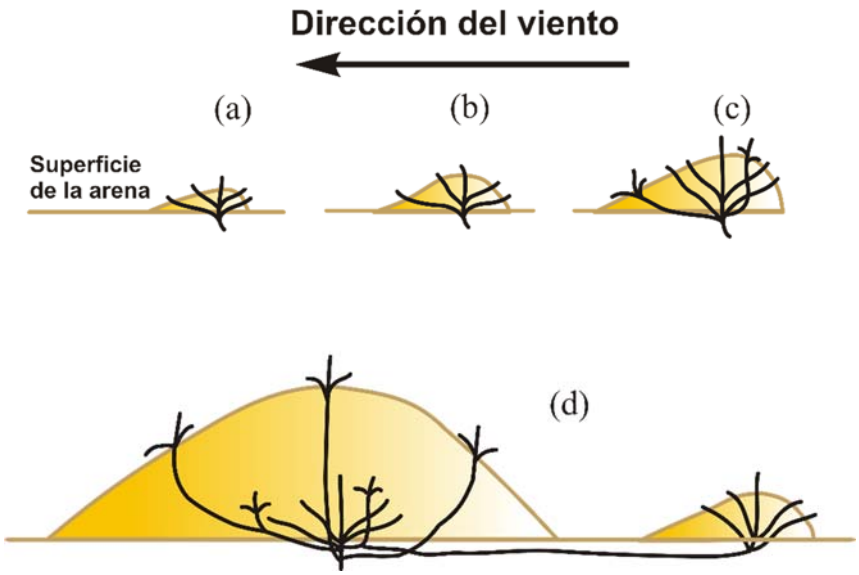

Figura II-2. Desarrollo de una duna alrededor de una planta. La arena se acumula alrededor de las ramas, cubriéndolas por completo. En respuesta, la planta crece y funciona como un obstáculo de mayor tamaño que retiene más arena (modificado de Packham y Willis, 1997; elaborado por R. Landgrave).

Figura II-3. El tipo de dunas muchas veces depende de la forma de crecimiento de las plantas. (Fotos: M. Luisa Martínez).

Una vez formadas y si carecen de vegetación que las cubra, todas las dunas empiezan a migrar en la misma dirección que los vientos dominantes. En el lado donde pega el viento (barlovento), se forma una pendiente suave donde los vientos fuertes golpean arrastrando consigo los granos de arena. Al llegar a la parte más alta de la duna (la cima), el viento pierde velocidad, por lo que es incapaz de sostener los granos de arena y por ello los deposita en la pendiente contraria (sotavento), que es mucho más pronunciada (Figura II-4). Este proceso continúa hasta que la pendiente de sotavento es tan marcada (mayor de 35° respecto a una línea horizontal) que se generan derrumbes de arena. De esta manera, las dunas van avanzando, con procesos de erosión en la pendiente de barlovento y de acumulación de arena en la de sotavento. La erosión en la pendiente interna (barlovento) de las dunas se mantiene mientras continúa la acción del viento y no hay cubierta vegetal, hasta que se alcanza el nivel del agua del subsuelo o algún tipo de sustrato menos erosionable, como una superficie rocosa (Figura II-4).

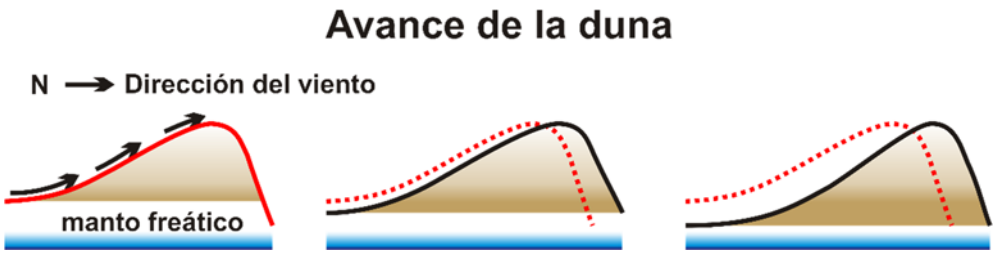

Figura II-4. Movimiento de una duna en dirección del viento. La arena erosionada en la pendiente donde pega el viento (barlovento) es depositada en la cima y en la pendiente donde no pega el viento (sotavento), de manera que avanza la duna poco a poco (Modificado de Moreno-Casasola, 1982). La línea punteada indica la posición original de la duna (esquema elaborado por R. Landgrave).

La velocidad a la que avanzan las dunas depende de:

a) su forma
b) su tamaño
c) el tamaño de los granos de arena
d) la pendiente del terreno sobre el que avanzan
e) el tipo de obstáculos que encuentran en su camino
f) la cubierta vegetal que tiene cada duna
g) la velocidad y la dirección del viento

Si los granos de arena son pequeños, una brisa de 13-20 km/hora es suficiente para levantarlos y generar movimiento de la duna. Sin embargo, la mayoría de las dunas están conformadas por arena de tamaño mediano, los cuales se mueven cuando los vientos alcanzan, cuando menos, 32 km/hora. La altura de la vegetación juega un papel muy importante en el avance de las dunas, ya que mientras más altas sean las plantas, menor será la velocidad del viento sobre la arena, y por lo tanto, menor será la posibilidad de que ésta sea transportada a grandes distancias. Se ha calculado que cuando las dunas avanzan sobre bosques altos, migran a una velocidad de 1-2 metros al año; cuando avanzan sobre arbustos

su tasa de migración es de 2-5 metros al año y si avanzan sobre pastizales y hierbas de poca altura, pueden incluso cubrir de 100 a 200 metros al año (Hesp, 2000).

Además de la altura de las plantas, el movimiento de la arena de las dunas se ve muy afectado por la cantidad de plantas que hay y la superficie que cubren (cobertura vegetal), ya que el proceso de saltación no puede dar inicio bajo las plantas, donde la velocidad del viento se ha reducido notablemente. Generalmente, las dunas más retiradas de la costa son las que tienen una mayor cobertura vegetal y por ende, son las que se mueven menos, es decir, están más estabilizadas. Lo anterior se debe a que estas dunas son más antiguas, y por lo tanto las plantas han tenido más tiempo para colonizar la arena y crecer. Además, el impacto de los vientos fuertes es menor en las dunas ubicadas tierra adentro, lo que también es favorable para el crecimiento de la vegetación y la disminución del movimiento de arena (Packham y Willis, 1997).

Erosión de playas y su relación con las dunas

Para manejar las dunas, es muy importante comprender que son sistemas dinámicos con momentos y espacios en que no hay vegetación y se mueven, se erosionan. También es fundamental entender que hay una interacción permanente e intensa entre las playas y las dunas. Una le proporciona arena a la otra y viceversa. Las dunas juegan un papel muy importante en la estabilidad de la línea de costa, en particular de las playas arenosas. Funcionan como reservas de sedimentos, ya que reciben, proveen y almacenan arena transportada de y hacia playas adyacentes (Ranwell y Boar, 1986). 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 playas (Nordstrom et al., 1990). Esta función es fundamental hoy en día en que las playas del mundo se están erosionando. Bird (1996) considera que entre el 70 y 90% de las playas del mundo están sufriendo intensos procesos de erosión debido a la falta de sedimentos. Lo anterior es particularmente preocupante, puesto que en muchos países, entre ellos México, hay grandes inversiones económicas en los litorales con playas, y éstas son uno de los destinos más importantes de los vacacionistas.

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 (Ranwell y Boar, 1986; Agardy et al., 2003; Martínez et al., 2004; Seingier et al., 2009). Se ha demostrado que en las zonas donde se mantienen dunas costeras en buen estado de conservación, el impacto de fenómenos naturales como tormentas y huracanes es menor que en aquellas zonas donde las dunas están severamente deterioradas. Las dunas costeras ayudan a mantener la línea de costa y a sostener las playas. Estas funciones son cada vez más importantes ante escenarios de cambio climático, donde se predice que los eventos meteorológicos extremos (como huracanes) aumentarán en número e intensidad, al tiempo que el nivel del mar se incrementará, teniendo un mayor efecto erosivo en las playas y líneas litorales. En la sección de descripción de las dunas por estado, se podrá apreciar la vulnerabilidad de nuestras costas ante la elevación del nivel del mar y valorar la importancia de estos ecosistemas en cada una de las entidades, desde el punto de vista de protección. En este sentido, Leyva et al. (2009) las denominaron ecosistemas protectores.

Los fenómenos naturales como las tormentas y los huracanes juegan un papel importante en la dinámica de las playas y dunas, ya que elevan el nivel medio del mar y generan procesos de erosión intensa. Si las olas son lo suficientemente grandes, o si la tormenta dura mucho tiempo, entonces la playa y las dunas embrionarias o frontales son severamente erosionadas (Figura II-5). Posteriormente, conforme la arena vuelve a ser depositada por los oleajes más suaves, se reconstruyen la playa y las dunas embrionarias, manteniéndose así hasta la siguiente tormenta (Hesp, 2000). El ciclo de erosión-restauración de las dunas es totalmente natural e inherente a estos sistemas, y mantiene a las dunas embrionarias como una barrera eficiente que protege contra la intrusión del agua de mar durante las tormentas. Cuando se pierden estas dunas por eventos naturales o por las actividades humanas, los efectos tierra adentro del viento y los oleajes fuertes se hacen más marcados.

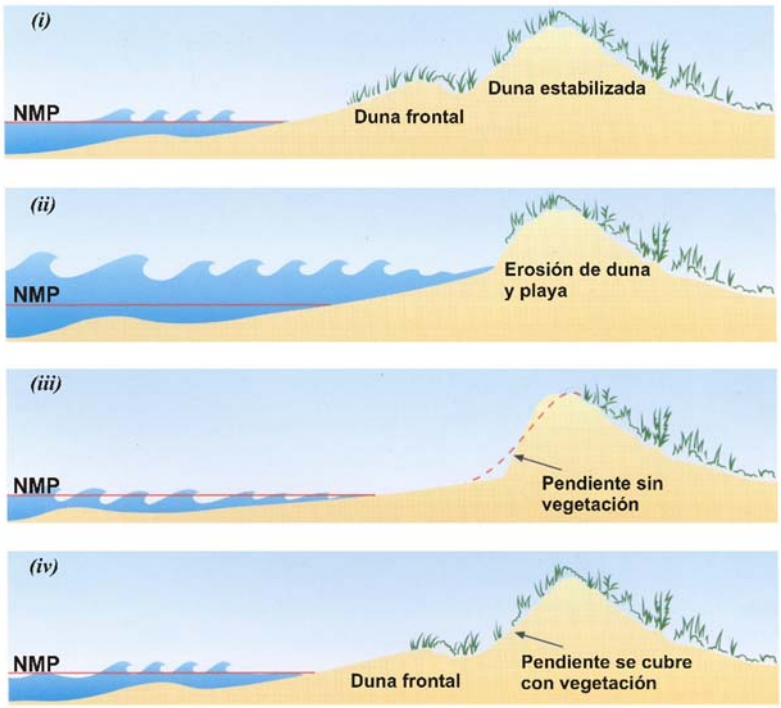

Figura II-5. Dinámica de la playa y las dunas frontales. En tiempos de clima tranquilo (i), las olas son moderadas. Rompen en la playa, depositan arena y se forman las dunas frontales. Durante las tormentas (ii) se erosionan las playas y las dunas frontales. Cuando regresa el buen tiempo (iii) las olas nuevamente depositan sedimentos en la playa. Con el tiempo, la vegetación vuelve a cubrir la duna y se forma otra duna frontal (NMP = Nivel del mar Máximo Promedio) (modificado de Hesp, 2000; esquema elaborado por R. Landgrave).

Tipos de dunas

Existen dunas costeras y dunas interiores, de desierto. Las dunas costeras se encuentran, como su nombre lo dice, en las costas, y las dunas interiores están principalmente en los desiertos. Ambos tipos de duna pueden ser de gran tamaño y comparten características, como la escasez de nutrientes y agua, y la movilidad del sustrato. Pero además, en las costas existe una fuerte influencia marina en forma de salinidad y de tormentas. En este trabajo solamente se presenta información sobre las dunas costeras.

Conforme las dunas costeras se forman y migran tierra adentro o a lo largo de la costa, adquieren diferentes formas que son el resultado de procesos de deposición y de acumulación

de arena, así como de su interacción con las plantas. De acuerdo con sus características topográficas y la manera en que se mueven, las dunas se han clasificado en cinco grandes grupos (Hesp, 2000): 1) dunas embrionarias o frontales; 2) hondonadas; 3) dunas parabólicas; 4) barjanes y 5) dunas transgresivas (Figura II-6).

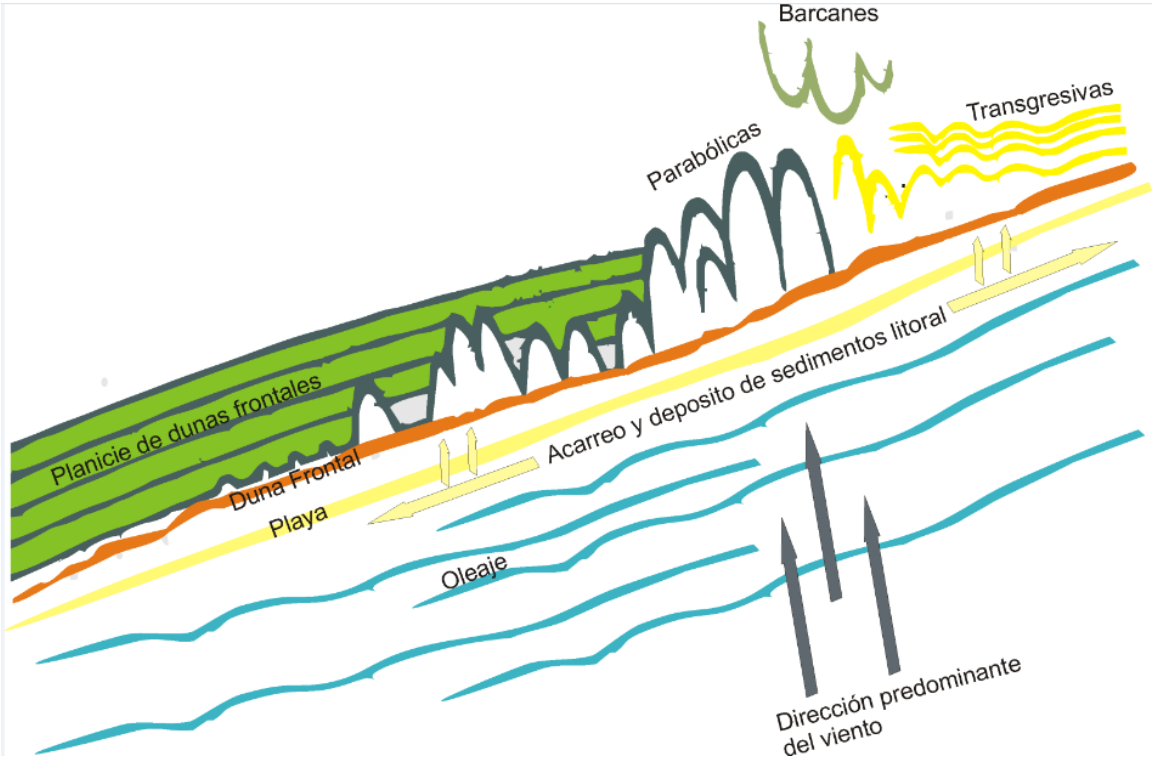

Figura II-6. Representación esquemática de diferentes tipos de dunas encontradas en las costas de México (Modificado de Bird, 2010).

Dunas embrionarias o frontales y planicies de dunas frontales

Las dunas frontales son montículos de arena relativamente pequeños y aislados, y generalmente se encuentran más cercanos al mar, ubicándose con una orientación paralela a la costa (Figura II-7). Su formación da inicio cuando la arena transportada por el viento queda atrapada por la vegetación que crece en la playa, o bien por otros obstáculos, como troncos o animales arrastrados por las corrientes del mar. La arena transportada por el viento es gradualmente depositada y "atrapada" por las plantas conforme el flujo de viento se mueve a través de la vegetación (Hesp, 2000).

Debido a su tamaño y ubicación, las dunas embrionarias y las dunas frontales pueden ser confundidas. Las dunas embrionarias son dunas cuya formación está dando inicio, y se está formando un pequeño montículo. Las dunas embrionarias son montículos de arena dispersos en la zona entre la línea de marea más alta y la base del primer cordón de dunas, fijados por vegetación pionera (especies de plantas tolerantes a la salinidad, estrés hídrico y enterramiento) (Figura II-7). Las dunas frontales se forman mediante la unión de dunas embrionarias y gracias a la rápida intervención de las plantas en la disminución de la velocidad del viento. La acumulación de dunas embrionarias y el incremento del sedimento atrapado llevan a la formación de las dunas frontales. Las dunas frontales son cordones de dunas paralelos a la línea de costa, de longitud variable. Pueden medir solo unos cuantos metros de longitud o alcanzar varios kilómetros a lo largo del litoral costero. Asimismo, dependiendo de la cantidad de sedimento disponible pueden medir menos de un metro o llegar por arriba de los tres metros de altura. La dinámica y complejidad ecosistémica es mucho mayor en las dunas frontales que en las dunas embrionarias, ya que se presenta una mayor abundancia y número de especies de plantas (Figura II-8).

Figura II-7. Duna embrionaria y cubierta de vegetación en la costa de Quintana Roo. (Foto: G. Sánchez-Vigil).

Figura II-8. Dunas frontales semiestabilizadas al fondo de la playa, seguidas por un campo de dunas transgresivas tierra adentro (Foto: M.L. Martínez).

Planicie de dunas frontales

En algunas costas hay múltiples cordones de dunas, usualmente con una orientación paralela a la línea de costa, las cuales se han formado sucesivamente como dunas frontales detrás de una playa arenosa progradante (o que le gana terreno al mar por la acumulación de sedimentos). Lo anterior es el resultado del recurrente ciclo de erosión y acreción en las playas. En este ciclo, el sedimento es depositado, como en la formación de dunas frontales incipientes, para la construcción de una nueva duna frontal, frente a la duna ya establecida; en dirección a la línea de costa. La duna anterior se convierte así en un cordón paralelo a la línea de costa, generalmente separados por un canal inundable (Bird, 2010). El lado frontal de la duna (en dirección al mar) es erosionado por acción de las olas durante la época de tormenta formando un escarpe pronunciado en la duna. Subsecuentemente, durante las épocas de calma, la playa es restaurada por el depósito de sedimento y nuevas dunas incipientes son formadas en el fondo de la playa. De esta manera, comienza nuevamente el proceso de construcción de un nuevo cordón de dunas frontales establecidas, paralelas a la línea de costa. La formación de los canales se debe a la dinámica del viento entre cada uno de los cordones de dunas; la velocidad del viento es reducida por el primer cordón de dunas,

y a su vez la dirección es cambiada siguiendo la forma de la duna y erosionando el espacio entre ambos cordones (Jarmalavicius et al., 2012). Las planicies de dunas frontales frecuentemente son rápidamente colonizadas por vegetación y no alcanzan grandes alturas, sin embargo, sí pueden alcanzar muchos kilómetros de ancho (Figura II-9). Los procesos de sucesión en estos tipos de dunas son relativamente rápidos. Los primeros cordones de dunas son fijados por especies pioneras, seguidas del establecimiento de pastos. Conforme se incrementa el número de cordones de dunas, la vegetación va cambiando y la presencia de especies leñosas es más común. Por otro lado, la captación de agua de los múltiples canales interdunarios facilita la presencia y establecimiento de vegetación hidrófila. Lo anterior da lugar a un mosaico de ecosistemas y microhábitats en un solo lugar. Desde el aire, los campos de dunas frontales se identifican fácilmente porque se observan como líneas paralelas a la costa.

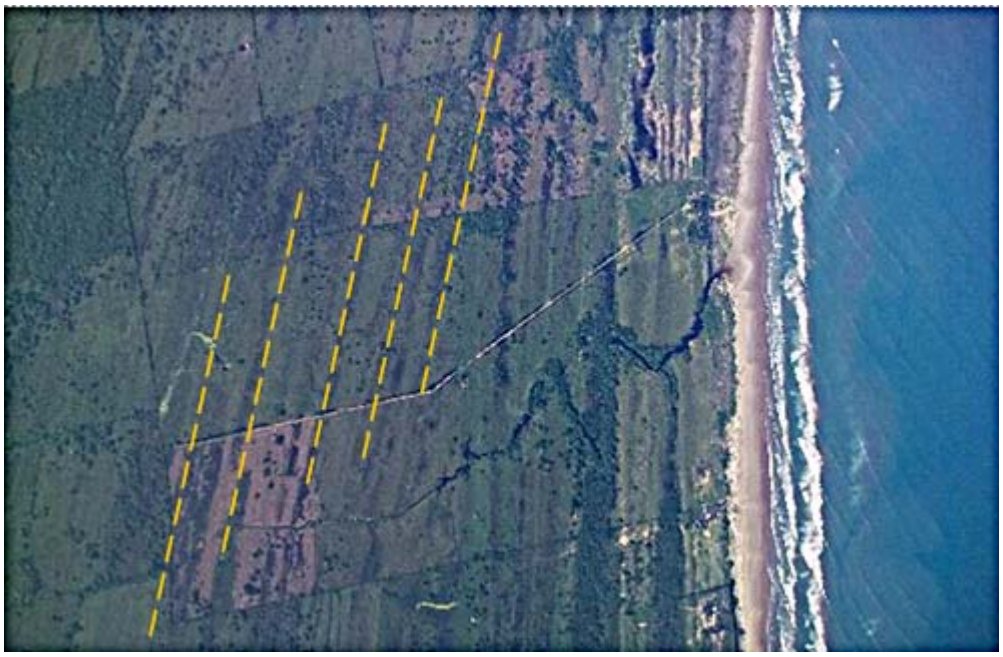

Figura II-9. Planicie de dunas frontales; norte de Veracruz. Líneas punteadas: canales interdunarios (Foto: INECOL).

Hondonadas

Las hondonadas son el resultado de procesos erosivos, y se encuentran en las partes más bajas de los sistemas de dunas. Pueden tener una gran variedad de formas, pero la mayoría se clasifican como hondonadas en forma de plato (formando un semi-círculo) (Figura II-10) o bien hondonadas alargadas (Hesp, 2000) (también llamados corredores de viento). Las hondonadas son comunes en cualquier zona costera con suelo arenoso donde haya procesos de erosión, ya sea por la acción de los vientos o por los oleajes intensos.

Figura II-10. Hondonada alargada, en forma de "corredor". En el fondo se acumulan semillas y hojarasca (Foto: J.G. García-Franco).

La formación de las hondonadas da inicio cuando ocurre una disminución de la cubierta vegetal y posteriormente la acción del viento o del oleaje acelera los procesos de erosión. Algunas de las causas naturales por las que puede haber una reducción de la cubierta vegetal son: a) erosión debido a oleajes intensos, como sucede durante tormentas y huracanes; b)

presencia de vientos muy intensos, por ejemplo, en el Golfo de México, los vientos fuertes del norte y que predominan durante la temporada de invierno, y en el Pacífico norte y Golfo de California donde los vientos conocidos como “santanas” y “westes” acarrean grandes cantidades de arena y erosionan fuertemente las dunas; c) muerte de la vegetación debido a encubrimientos con arena, más intensos de lo que naturalmente toleran las especies; d) herbivoría intensiva debida a la actividad de los herbívoros naturales (como conejos). Otras causas de pérdida de vegetación y que están asociadas con las actividades de los humanos son el pastoreo por ganado, los vehículos para “pasear” en las dunas, los caballos que llevan a las personas a paseos durante los cuales pisotean y destruyen la vegetación. Todas estas actividades llegan a matar a las plantas que han logrado detener los granos de arena y estabilizar las dunas. Sin plantas, la arena de ese sitio queda nuevamente libre para ser movida y acarreada por el viento.

Debido a que los vientos dentro de las hondonadas son mucho más intensos que afuera, las hondonadas se forman de manera relativamente rápida (Hesp, 2000). En muchas ocasiones la erosión continúa hasta que se alcanza el nivel del agua del subsuelo o bien una superficie más consolidada y menos erosionable como podría ser una capa de carbonato. Dependiendo de la proximidad al agua del subsuelo (manto freático), las hondonadas también se clasifican como húmedas, cuando se inundan al subir el nivel del manto freático, o secas, cuando nunca se inundan (Ranwell, 1972). En el caso de las hondonadas húmedas, la inundación puede durar desde unos pocos meses hasta ser permanente, formándose lagos interdunarios. El nivel de agua varía dependiendo de las fluctuaciones del mismo manto freático y del régimen local de lluvias. Los lagos que son permanentes albergan una gran variedad de animales, como patos, garzas y especies vegetales acuáticas, como los lirios acuáticos (Peralta-Peláez y Moreno-Casasola, 2009; Moreno-Casasola, 2010) (Figura II-11).

Figura II-11. En las hondonadas se pueden formar lagos interdunarios durante la época de lluvias (Foto: G. Sánchez-Vigil).

Dunas parabólicas

Las dunas parabólicas son dunas en forma de "U" invertida y, como su nombre lo indica, semejan una parábola (Figura II-12). Esta forma se hace más evidente sobre todo cuando son observadas desde arriba. Las dunas parabólicas se caracterizan por tener dos brazos y una cima, que es la parte más alta y donde se unen los brazos (Figura II-13). La cima está orientada hacia la dirección donde viajan los vientos dominantes. Además se pueden reconocer una pendiente interna y una externa. La primera está en dirección de donde viene el viento (barlovento) y la segunda en la dirección hacia donde sopla (sotavento). Las hondonadas húmedas o secas se localizan entre los dos brazos. Las dunas parabólicas se pueden formar de manera repetitiva, dando como resultado campos de dunas parabólicas que, vistos desde arriba, semejan un techo con tejas.

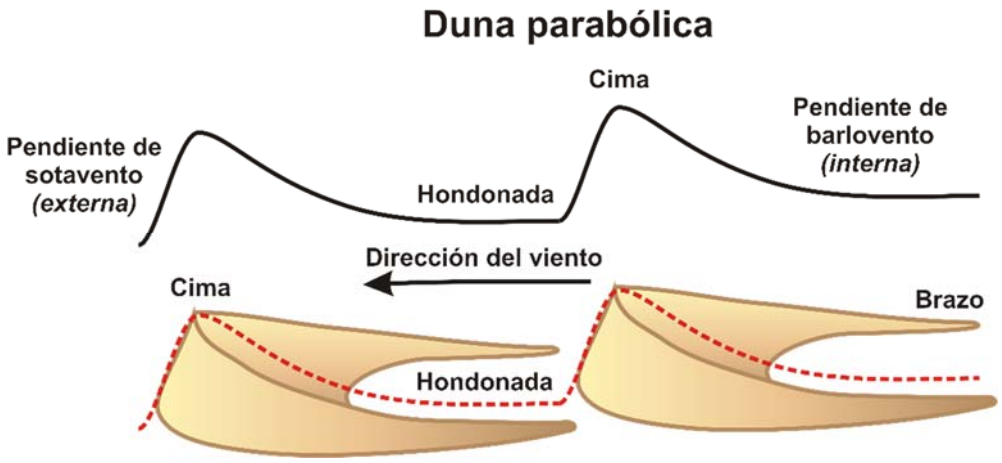

Figura II-12. Esquema que muestra las diferentes partes de una duna parabólica (Modificado de Moreno-Casasola, 1982; esquema elaborado por R. Landgrave).

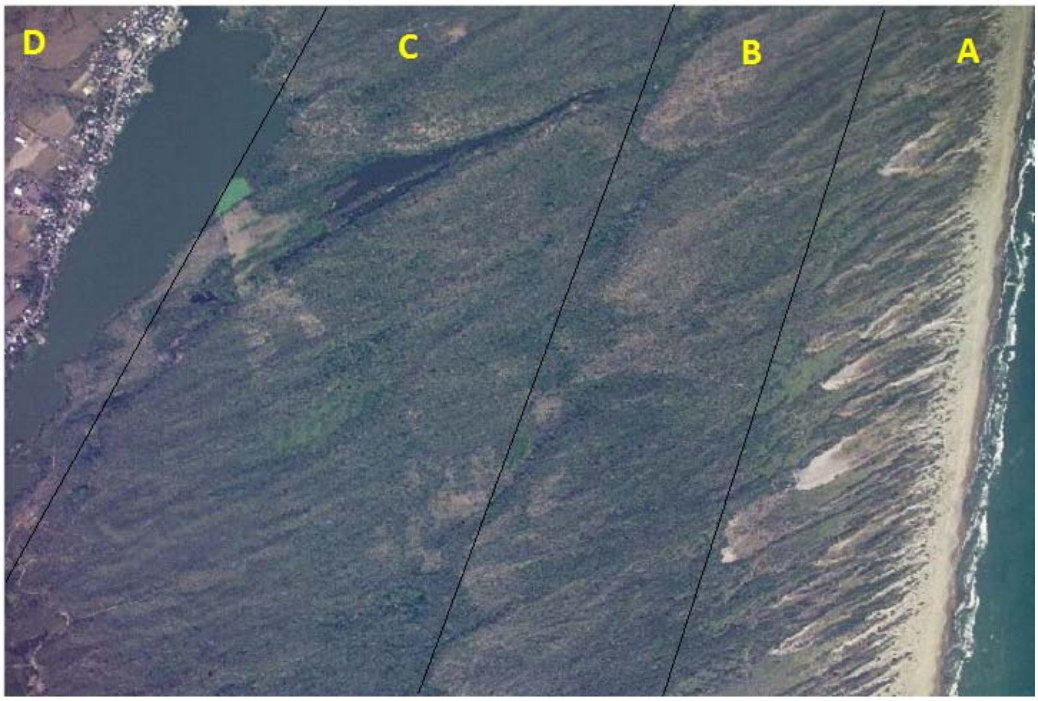

Figura II-13. Campo de dunas parabólicas con diferentes grados de estabilización: A) y B) Móviles y semimóviles; C) Estabilizadas; y D) Laguna interdunaria permanente (Foto: INECOL).

Barjanes

Los barjanes tienen forma de media luna, y se parecen a las dunas parabólicas. Sin embargo, existe una diferencia muy importante entre ambos tipos de dunas, ya que en los barjanes los brazos apuntan hacia donde avanzan los vientos predominantes, lo que es contrario a lo que ocurre en las dunas parabólicas. Es decir, en los barjanes los brazos avanzan más rápido que la cima. Además, contrario a lo que ocurre en las dunas parabólicas, la pendiente pronunciada de sotavento se encuentra entre los brazos (Figuras II-14 y II-15).

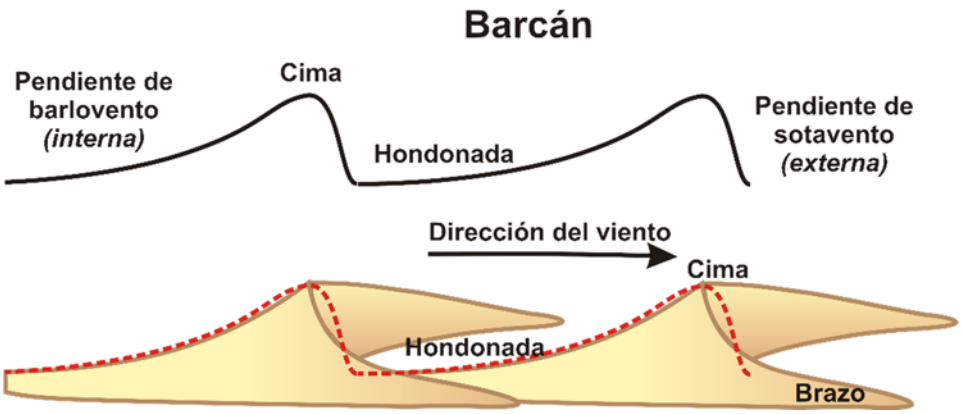

Figura II-14. Esquema mostrando las diferentes partes de una duna en forma de un barján (Esquema elaborado por Rosario Landgrave).

Figura II-15. Campos de dunas transgresivas en forma de barjanes en Baja California Sur (Foto: G. Sánchez-Vigil).

Los barjanes pueden medir de 9 a 30 metros de altura y la distancia entre la punta de un brazo y la otra puede ser de hasta 365 metros (Gallant, 1997). Al igual que las dunas parabólicas, se forman en grupos. Los geomorfólogos no comprenden exactamente cómo son las primeras etapas en la formación de los barjanes. Se piensa que inicialmente, un barján se origina a partir de un montículo de arena. Si el montículo permanece seco, entonces se van formando los brazos que gradualmente van avanzando en dirección del viento. En México, estas dunas son raras, y sólo existen en Baja California Sur y Sonora.

Dunas transgresivas

Cuando se habla de campos de dunas transgresivas, se está haciendo referencia a conjuntos de dunas que están avanzando (o que han avanzado) tierra adentro o a lo largo de la costa y que tienen una cubierta de vegetación muy escasa o nula (Figura II-16). Es decir, que están transgrediendo. Avanzan sobre todo tipo de terrenos, desde aquellos totalmente cubiertos por vegetación hasta aquellos parcialmente desnudos. También pueden avanzar sobre zonas con pendientes muy pronunciadas. Debido a su gran movilidad cuando no están cubiertas de vegetación, estas dunas también se conocen como dunas migratorias. Al igual que con los

otros tipos de dunas, pueden presentar diferentes grados de cobertura vegetal: pueden estar totalmente cubiertas por plantas o bien estar totalmente carentes de vegetación. La extensión que abarcan los campos de dunas transgresivas es muy variable, y fluctúan entre algunos cientos de metros a lo largo de las costas y tierra adentro, hasta muchos kilómetros.

Figura II-16. Campo de dunas transgresivas (Foto: G. Sánchez-Vigil).

Las dunas de los campos de dunas transgresivas pueden tener una gran variedad de formas. Por ejemplo, pueden ser ondas semejantes a las que se ven en la superficie del mar, pero su movimiento no es tan perceptible por nosotros. Pareciera como si las ondas estuvieran congeladas. Estas dunas en forma de ondas se llaman dunas transversas. También existen campos de dunas transgresivas cuya forma es principalmente parabólica.

El límite tierra adentro de los campos de dunas transgresivas se conoce como borde de precipitación, ya que es ahí donde la arena se deposita y cubre el terreno sobre el que van avanzando las dunas. Estos bordes de precipitación tienen pendientes muy pronunciadas que varían desde un ángulo de 32-34° (el máximo ángulo en el que se puede acumular la arena sin deslizarse) hasta uno de 50° cuando hay una cobertura vegetal densa. En contraste con lo

anterior, en las partes cercanas al agua es común encontrar zonas erosionadas que forman hondonadas, donde el manto freático está cercano a la superficie de la arena.

Los campos de dunas transgresivas se originan o han originado en respuesta a un conjunto de factores (Hesp, 2000): a) en respuesta a cambios climáticos o cambios en el nivel del mar, en particular los ocurridos hace 7,000 a 10,000 años; b) en regiones con un aporte abundante de sedimento y con un régimen de vientos fuertes; c) en costas con fuertes procesos erosivos tanto naturales como inducidos por las actividades humanas. En cualquiera de estas circunstancias, que dan como resultado que una gran cantidad de sedimento sea transportada hacia las playas, se pueden formar extensos campos de dunas transgresivas, sobre todo en aquellos lugares con vientos intensos y frecuentes. Aunque se tiene este conocimiento básico sobre los campos de dunas transgresivas, los mecanismos o factores directamente responsables de su formación requieren más investigación.

Dunas fósiles

Las dunas muy antiguas se denominan “duna fósiles”. Existen diferentes tipos de dunas fósiles. Por un lado, puede tratarse de una duna móvil que tenga la particularidad de no estar siendo alimentada por arena de la playa (Sociedad Geológica de Chile - http://www.sociedadgeologica.cl). Estas dunas también reciben el nombre de “dunas colgadas”. La situación geomorfológica de las dunas colgadas las hace frágiles porque no se están renovando. Un ejemplo de dunas fósiles “colgadas” son las dunas de El Rosario, en Baja California, que aunque son móviles, ya no reciben aporte de sedimentos nuevos.

Otro tipo de dunas fósiles son aquellas cuya arena ya se ha consolidado, formando una roca llamada arenisca. Es decir, se trata de “dunas petrificadas”. La arenisca es una de las rocas sedimentarias más comunes en el planeta (Flor, 1990; Vignaud et al., 2002) (Figura II-17). Se forma a partir de material acumulado por procesos de sedimentación, ya sea por agua o por aire. En el caso de la arenisca de origen costero, se forma, entre otras maneras, a partir de la arena de la playa y las dunas costeras. Una vez acumulada, la arena se compacta por la presión de los depósitos acumulados y se cementa por los minerales que se percolan entre los granos de la arena. Estos minerales funcionan como una especie de pegamento de los sedimentos, siendo los más comunes el sílice y el carbonato de calcio, los cuales se generan por la modificación de la arena cuando está bajo presión de otras capas de sedimento

(Protheros, 2004). Frecuentemente, en estas dunas petrificadas es posible observar abundantes rizolitos, que son rocas que se forman alrededor de las raíces de las plantas, dejando la cavidad donde estaba la raíz originalmente (Vignaud et al., 2002).

La mayoría de las dunas del mundo datan del Holoceno (hace unos 20 mil años). Sin embargo, existen dunas fósiles que se calcula que fueron formadas durante el Pleistoceno, hace alrededor de dos millones de años.

Figura II-17. Arenisca: roca formada a partir de la compactación y cementación de la arena (Foto: G. Sánchez-Vigil).

Dunas amarillas, cafés y grises

En algunos países del mundo se clasifica a las dunas en función del color aparente de la arena, mismo que está relacionado con las etapas sucesionales. Así, las dunas amarillas son aquellas que no tienen vegetación y que por lo tanto son muy móviles. La falta de materia orgánica les brinda un tono amarillento.

Conforme la arena se estabiliza, aumenta la cubierta vegetal y se acumula la materia orgánica, lo que hace que la arena adquiera un tono café. Las dunas semimóviles a veces se llaman dunas cafés.

Por último, las dunas grises son aquellas que ya están cubiertas de vegetación y que han desarrollado un mantillo orgánico. Además, en los países donde se usa esta clasificación colorida de las dunas, en las etapas más estabilizadas se desarrolla una capa de líquenes que le brindan el tono grisáceo a las dunas.

Es importante tener en cuenta que el color de la arena también depende de los componentes de la misma: por ejemplo, puede ser blanca por la presencia de material calcáreo, o negra por la presencia de cenizas volcánicas. En ambos casos, el color no es indicativo de estado sucesional ni de conservación. Es por ello que rara vez se utiliza esta clasificación multicolor (Ranwell, 1972).

Dunas primarias, dunas secundarias y dunas terciarias

Otra clasificación de los tipos de dunas las identifica como embrionarias, primarias, secundarias y terciarias. Las dunas embrionarias son las que se forman en el fondo de la playa y conforme se aglutinan dan lugar a las dunas frontales (Hesp y Walker, 2013). Éstas son las que reciben el impacto directo del oleaje producido por las mareas astronómicas y las marejadas de tormentas. Atrás de las dunas embrionarias y frontales se encuentran las dunas primarias, que pueden formar cordones de dunas. En las dunas primarias el movimiento de la arena es intenso y la influencia marina es fuerte, por lo que la vegetación característica de estas dunas es tolerante a la salinidad y al movimiento de arena. Las dunas secundarias se encuentran tierra adentro, y la influencia marina es mucho menor. Aquí el movimiento de arena es reducido, puesto que la cobertura vegetal es mayor. Se comparan con las dunas semi-móviles. Por último, en las dunas terciarias el sustrato tiene una mayor estabilización y el movimiento de arena es prácticamente nulo (San Martín et al., 1992).

Cómo evolucionan unas a otras, estabilización

La estabilización de las dunas cobra importancia desde varios puntos de vista: cuando se busca hacer un uso forestal de la vegetación, cuando las dunas están cerca de un poblado y no se quiere que la arena cubra las calles y las casas, para evitar los daños que causa el movimiento de la arena a la infraestructura urbana. La estabilización siempre es parte de un

proceso donde unas especies germinan y crean un microambiente donde se facilita la germinación y el establecimiento de otras especies que pueden llegar a formar una cubierta vegetal densa. Es decir, hay tres tipos de estadios dentro de la dinámica natural de las dunas costeras: a) dunas en formación y móviles; b) dunas semi-estabilizadas y c) dunas totalmente estabilizadas. En los tres tipos de estadios pueden existir espacios inundables en las partes más bajas y cercanas al agua del subsuelo. Estas zonas inundables se conocen como hondonadas húmedas o lagos interdunarios, mencionados anteriormente.

En el paso de una duna móvil a una estabilizada, primero existe una cubierta vegetal constituida por plantas herbáceas y después esta vegetación herbácea es sustituida por vegetación leñosa, tanto arbustiva como arbórea. Este recambio de especies es un proceso natural y frecuente. Pero también ocurre en dirección contraria, ya que como se vio anteriormente, la arena puede ponerse nuevamente en movimiento debido a la muerte de plantas por procesos naturales, factores indirectos inducidos por el hombre o por actividades humanas de impacto directo sobre las dunas. Al quedar la arena descubierta, el proceso de colonización y estabilización da inicio nuevamente. La dinámica de las dunas y su interacción con la playa (su fuente de sedimentos), con las plantas y el viento lleva justamente a un proceso de estabilización- movilidad que se repite constantemente.

El hecho de que naturalmente existan dunas sin vegetación, es decir móviles, significa que no siempre se debe reforestar. De hecho, existen plantas exclusivas de dunas costeras que crecen mejor cuando son enterradas por la arena, justamente porque han evolucionado bajo el movimiento constante de la arena que las entierra. Por tanto, solamente se debe reforestar cuando la duna está estabilizada por una cubierta de vegetación natural como son los pastizales y matorrales, y además se tiene un objetivo.

Topografía y microhábitats

Una característica común de las dunas costeras es su heterogeneidad topográfica y ambiental. Esto significa que son ambientes muy variables en términos de su tamaño, longevidad y movilidad. Por ejemplo, las dunas costeras pueden ser pequeñas acumulaciones con una breve duración, o bien pueden estar formadas por grandes volúmenes de arena y ser

relativamente persistentes y duraderas. La extensión de las dunas hacia tierra adentro abarca desde unos cuantos pocos metros hasta cerca de 10 km y también es muy posible que tengan diferentes grados de movilidad, la cual está directamente relacionada con la cantidad de cubierta vegetal con que cuenten (Moreno-Casasola, 1986). Cuando carecen de vegetación son sumamente móviles y ganan y pierden arena constantemente, en respuesta a la acción del viento (Figura II-18). Cuando las dunas están parcialmente cubiertas por vegetación son llamadas semi-móviles (Figura II-19) y, como su nombre lo implica, la arena no es completamente móvil. Finalmente, las dunas estabilizadas (Figura II-20) están totalmente cubiertas por plantas y su arena prácticamente no tiene ningún movimiento. A menudo, los sistemas de dunas están conformados por un mosaico complejo de dunas móviles, semimóviles y estabilizadas distribuidas en áreas relativamente pequeñas, aumentando así la heterogeneidad ambiental (Figura II-21).

Figura II-18. Paisaje de dunas móviles en Baja California Sur (Foto: G. Sánchez-Vigil).

Figura II-19. Dunas semi-móviles en el estado de Sonora (Foto: G. Sánchez-Vigil).

Figura II-20. Dunas estabilizadas en el estado de Veracruz (Foto: J.G. García-Franco).

Figura II-21. Mosaico de dunas móviles y estabilizadas en Sinaloa (Foto: O. Jiménez-Orocio).

Tipos de dunas en México

En México existen tanto dunas costeras como dunas interiores. Las dunas costeras se encuentran, como su nombre lo dice, en las costas, y las dunas interiores están principalmente en los desiertos de Chihuahua y Sonora. Algunas de estas son utilizadas en actividades mineras (Chihuahua). En este trabajo solamente se presenta información sobre las dunas costeras. La superficie total de dunas en México suma 808,711 hectáreas, lo cual es similar a lo cubierto por los manglares (Cuadro II-1). La extensión y tipos de dunas presentes en cada estado son muy variables. En todos los estados existen dunas frontales y planicies de dunas frontales (excepto en Baja California). Las dunas parabólicas se encuentran en Baja California Sur, Veracruz, Oaxaca, Baja California, Tamaulipas y Jalisco. Las dunas en forma de barjanes son exclusivas de Baja California Sur y Sonora. En Veracruz y Tabasco hay cuerpos de agua y hondonadas inmersos en los sistemas de dunas (Cuadro II-1).

Cuadro II-1. Superficie acumulada (hectáreas) de los diferentes tipos de dunas y total para cada estado costero de México. También se muestra el porcentaje que la superficie total de dunas por cada estado representa respecto al total nacional.

Estado	Dunas frontales	Planicie de dunas frontales	Parabólicas	Transgresivas	Barjanes	Cuerpo de agua	Total por estado	% respecto al total nacional
Baja California Sur	5,013	3,123	227	207,844	5,418		221,625	27.4
Veracruz	343	35,384	38,774	31,619		473	106,592	13.2
Sinaloa	1,263	57,876		31,592			90,731	11.2
Tabasco	145	72,225		2,115		168	74,653	9.2
Nayarit	752	46,937					47,690	5.9
Oaxaca	1,213	37,796	5,330	776			45,116	5.6
Campeche	259	43,275					43,534	5.4
Sonora	1,190	4,280		37,028	53		42,551	5.3
Baja California	1,707		1,896	24,410			28,014	3.5
Tamaulipas	1,658	3,194	1,809	20,344			27,005	3.3
Chiapas	1,740	21,616					23,357	2.9
Guerrero	1,225	19,245					20,470	2.5
Quintana Roo	2,520	9,757					12,278	1.5
Yucatán	218	11,266		0			11,484	1.4
Colima	68	7,344					7,412	0.9

Michoacán	565	2,600					3,166	0.4
Jalisco	1,351	1,204	478				3,034	0.4
Total por tipo	21,233	377,123	48,514	355,728	5,470	641	808,711	
Superficie total de dunas en México							808,711	

Para condensar la información, en el análisis nacional de las dunas costeras se agruparon todas las dunas frontales (dunas frontales y campos de dunas frontales) en una sola categoría. Del mismo modo, los campos de dunas transgresivas con barjanes se integraron en la categoría de dunas transgresivas. Los cuerpos de agua no se incluyeron en este análisis global, ya que en la escala nacional cubren una superficie reducida. Sin embargo, esto no implica que no sean relevantes. Se analizan en detalle en el diagnóstico de los estados.

A nivel nacional, casi el 50% de las dunas costeras son dunas frontales (de baja altura, paralelas a la línea de costa) y el 45% son dunas transgresivas. Las dunas parabólicas son mucho más escasas, y representan menos del 10% de todas las dunas mexicanas (Figuras II-22 y II-23).

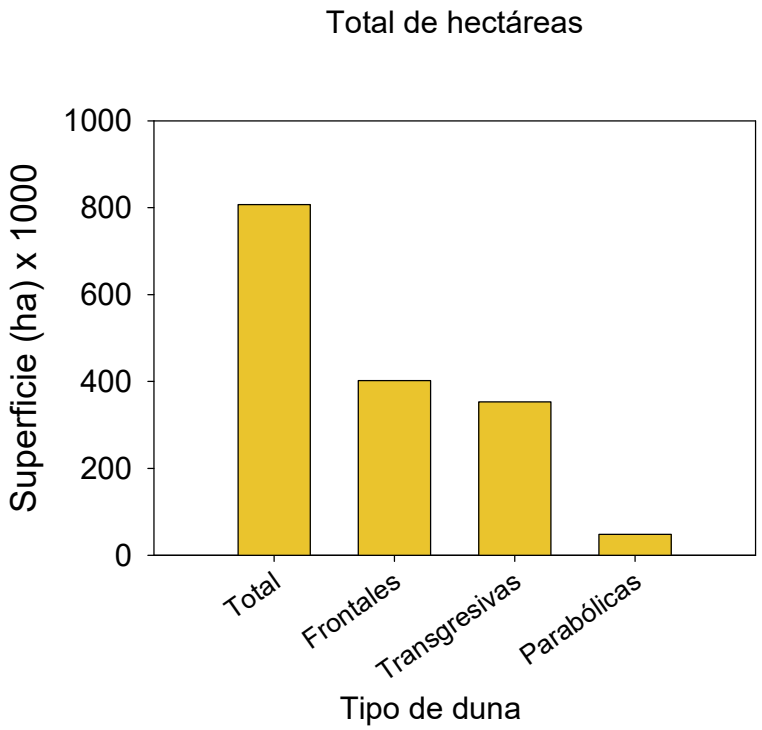

Figura II-22. Superficie total de dunas costeras presentes en México y superficie que cubren las geoformas más abundantes.

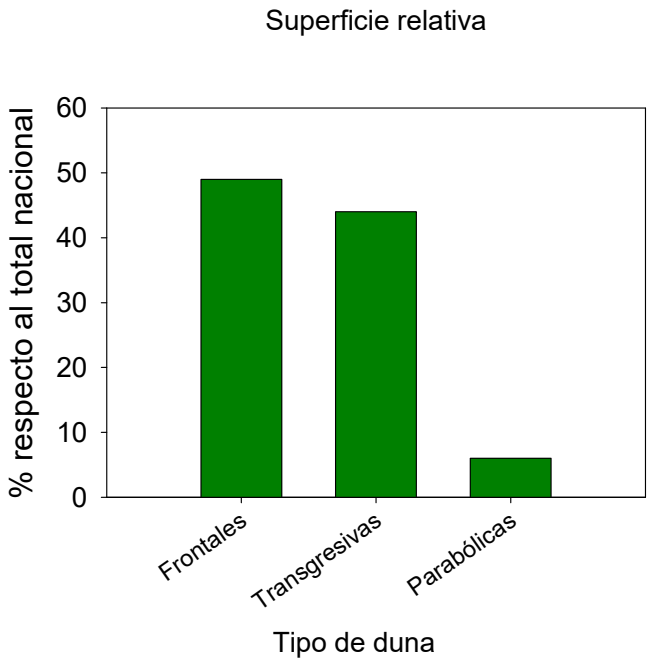

Figura II-23. Porcentaje relativo que cubre cada tipo de duna en el país.

Las dunas costeras en los estados

A nivel nacional, los estados que contienen las superficies más extensas de dunas costeras son, en orden decreciente, Baja California Sur, Veracruz, Sinaloa, Tabasco y Nayarit (Figura II-24). Todos los estados costeros tienen dunas, aunque su superficie sea muy pequeña como es el caso de Jalisco y de Michoacán (Cuadro II-1).

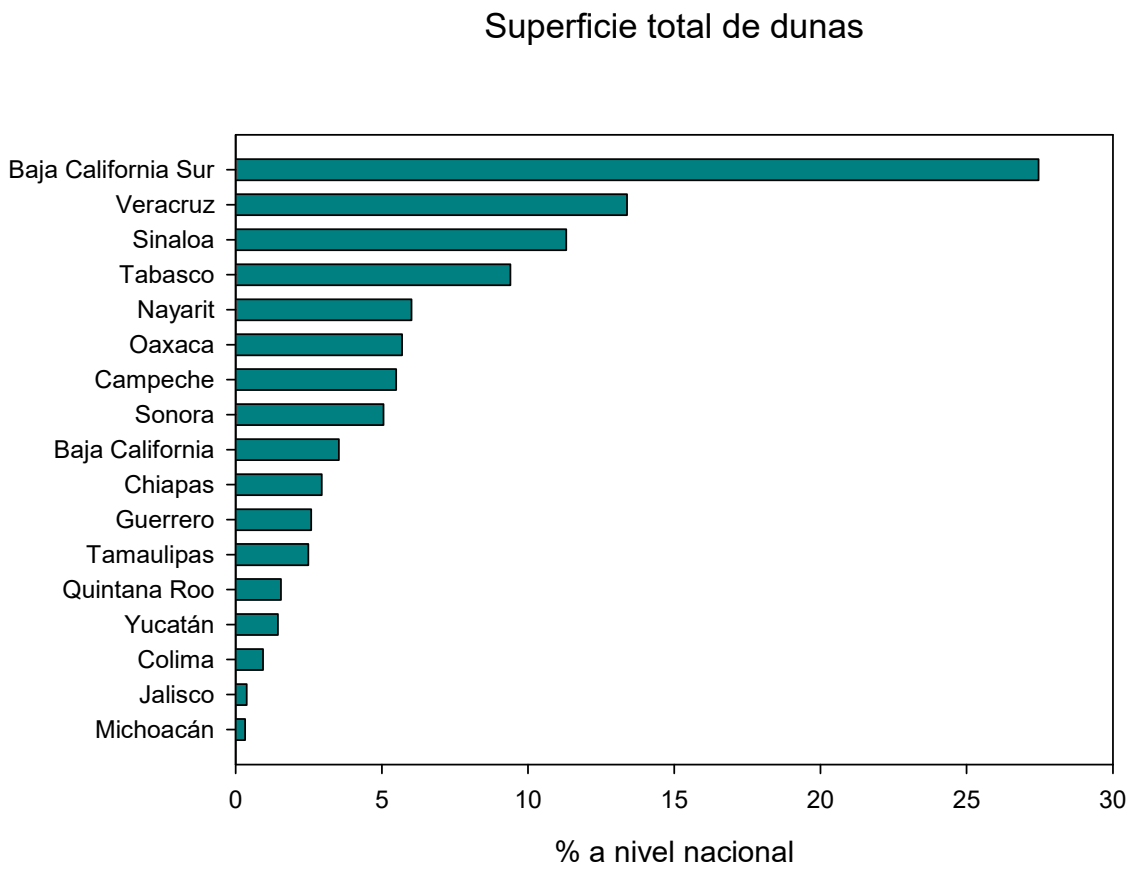

Figura II-24. Porcentaje de la superficie relativa de dunas que tienen todos los estados costeros.

Cuando se analizan los diferentes tipos de dunas a nivel estatal, se observa que Tabasco, Sinaloa, Nayarit, Campeche, Oaxaca y Veracruz son los que tienen las mayores extensiones de dunas frontales (Figura II-25). En algunos estados, como Jalisco, se observan grandes campos de dunas individuales (montículos) que son formadas por la deposición de arena alrededor de algún objeto, siendo los más comunes las plantas. Estas dunas reciben el nombre de *nebkas,* y cuando se unen unas con otras pueden formar dunas frontales.

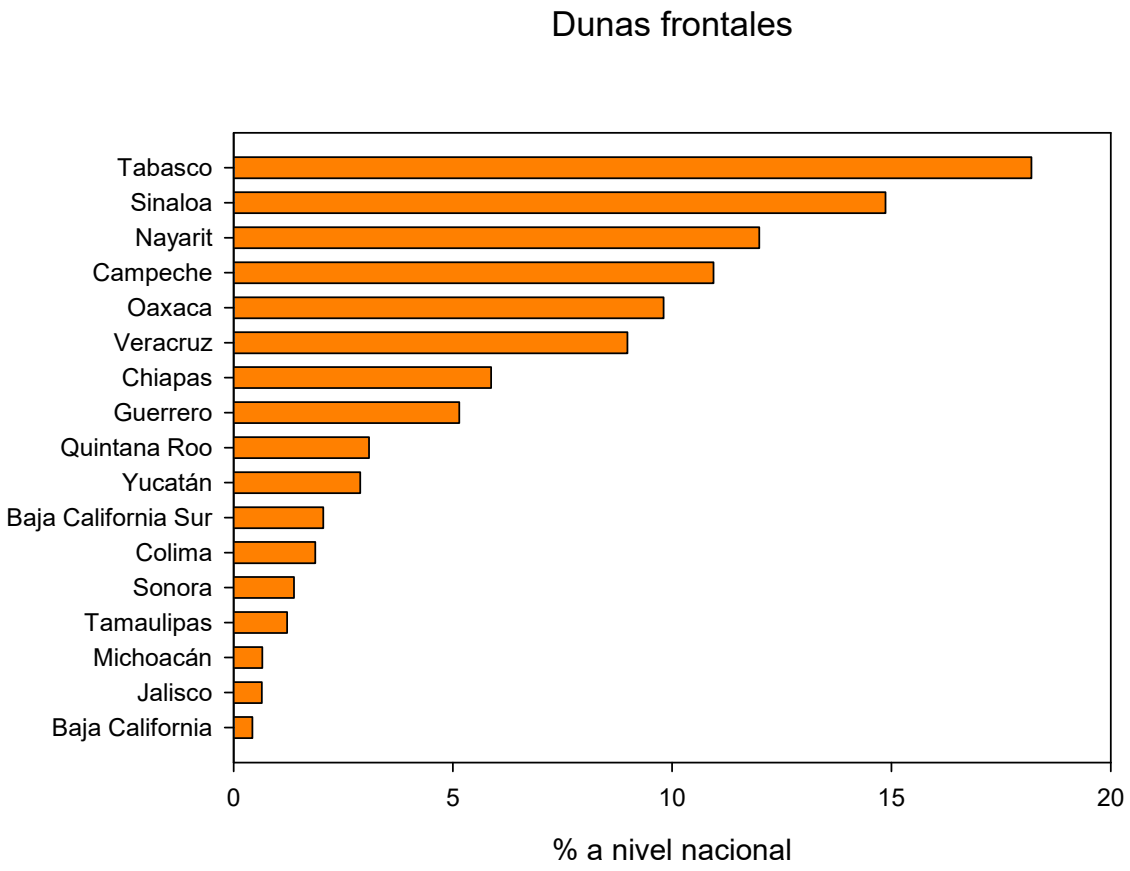

Figura II-25. Porcentaje de la superficie relativa que representan las dunas frontales de cada estado respecto la extensión total nacional de dunas frontales.

En contraste con lo anterior, las dunas parabólicas y las transgresivas son mucho menos abundantes, y solamente están presentes en unos pocos estados. En el caso de las dunas parabólicas, más del 80% se encuentran en Veracruz, y son mucho menos frecuentes y extensas en Oaxaca, Tamaulipas, Jalisco y Baja California Sur. No hay dunas parabólicas en los otros estados (Figura II-26). Una situación similar se observa en las dunas transgresivas, las cuales son muy abundantes en Baja California Sur, aunque también están presentes en Sonora, Veracruz, Sinaloa, Baja California, Tamaulipas, Tabasco y Oaxaca. Tampoco existen dunas transgresivas en los otros estados (Figura II-27).

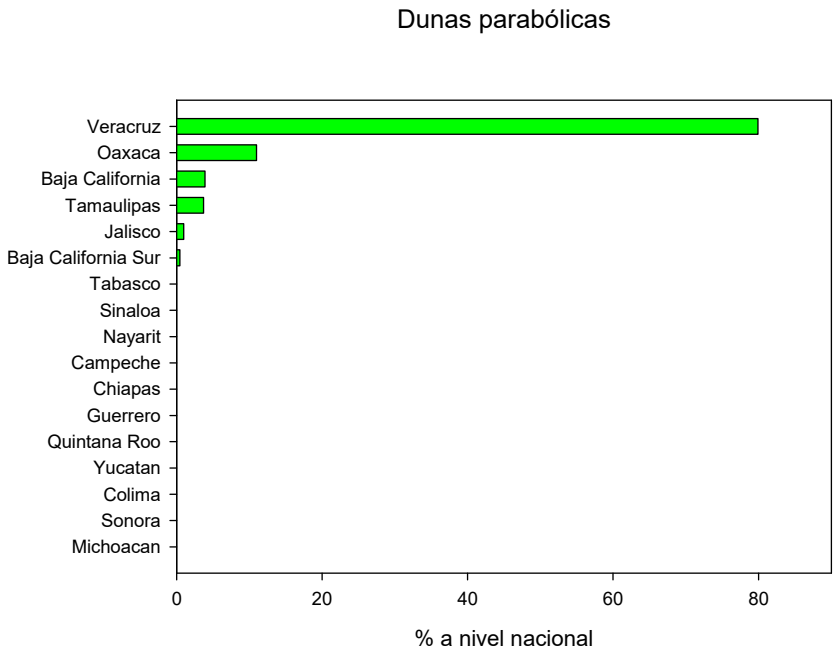

Figura II-26. Porcentaje de la superficie relativa que representan las dunas parabólicas de cada estado respecto la extensión total nacional de dunas parabólicas.

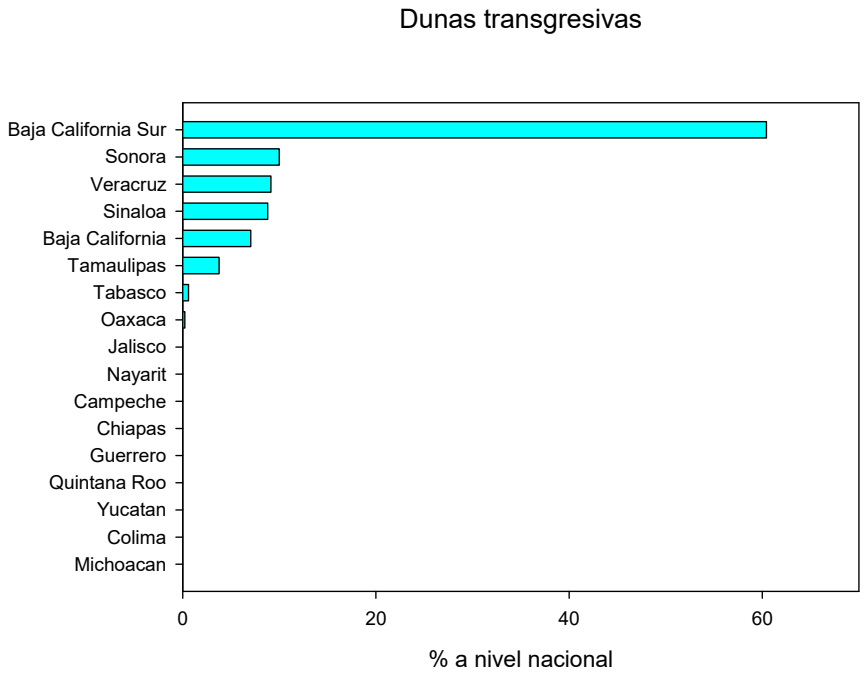

Figura II-27. Porcentaje de la superficie relativa que representan las dunas transgresivas de cada estado respecto la extensión total nacional de dunas transgresivas.

Hondonadas y planicies de inundación

Las hondonadas húmedas e inundables, así como las planicies inundables representan una superficie mucho menor que las dunas costeras y no son apreciables en la escala de trabajo de este diagnóstico. Sin embargo, son ambientes importantes que dan diversidad al ecosistema de dunas costeras. En un mismo sistema de dunas puede haber varias hondonadas inundables ya sean temporales o permanentes. Se pueden encontrar en la playa o en la depresión que se forma entre los brazos de una duna parabólica o de una duna transgresiva.

Cuando las dunas se mueven, las hondonadas también migran. El viento sigue teniendo su misma función, siempre por delante de la pendiente de sotavento, adquiriendo velocidad en la parte más baja y levantando la arena hasta que aflora el manto freático, de agua dulce o con una salinidad muy baja. La vegetación no siempre puede migrar y establecerse a la misma velocidad, por lo que hay hondonadas totalmente desprovistas de plantas. En el caso de las hondonadas permanentes, o sea lagos interdunarios, el tamaño puede variar, desde una hasta 150 hectáreas (Peralta-Peláez y Moreno-Casasola, 2009). En estos casos la vegetación es abundante, tanto a la orilla como flotando. Como el agua es permanente, se forman humedales que incluyen desde selvas inundables, popales y tulares, o bien vegetación cuyas hojas cubren la superficie del cuerpo de agua (Moreno-Casasola, 2010). Estos lagos interdunarios pueden considerarse como un ecosistema inmerso dentro de las dunas ya que posee características propias y flora y fauna especialmente adaptada a la inundación, muchas veces, endémicas. En Yucatán son muy interesantes estas lagunas porque en ellas crecen especies de las selvas secas aledañas, y en Veracruz hasta crecen árboles de selvas inundables.

Las planicies se encuentran donde no hay mucho viento y no hay posibilidad de formación de montículos de arena. Muchas veces son suelos lodosos cercanos o entremezclados con manglares o marismas. Estas planicies se forman en las zonas de transición entre las dunas y los humedales salobres y salinos como son los manglares y las marismas. Las islas de barrera, como parte de sus características propias, tienen una cara hacia el mar y otra hacia una laguna costera salobre (como en el caso de la Laguna Bojórquez y sus manglares frente a Cancún) o salinas a hipersalinas, como la Laguna Madre en Tamaulipas (Figura II-28). Se forma un gradiente de inundación y salinidad que va cambiando lentamente. Algunas especies de

plantas pueden vivir en estas zonas de transición. Hay otros casos en los que no hay un cuerpo de agua de por medio, sino una transición de vegetación arbórea de dunas a vegetación de manglar, por ejemplo en algunas zonas de Quintana Roo y de Chiapas (Moreno-Casasola y Espejel, 1986). Se conoce poco del funcionamiento de estos gradientes o zonas de transición incluyendo su distribución en el país. Nuevamente se requiere de una escala de trabajo más fina. Con el conocimiento que se tiene actualmente de los sistemas de dunas del país, no se puede cuantificar la superficie de las hondonadas, lagos y planicies de inundación, y en muchos casos tampoco se puede precisar su distribución.

Figura II-28. Zona de transición entre las dunas y las marismas de Laguna Madre, Tamaulipas (Foto: G. Sánchez-Vigil).

Referencias bibliográficas

Agardy, T., P. Bridgewater, M.P. Crosby, J. Day, P.K. Dayton, R. Kenchington, D. Laffolley, P. McConney, P.A. Murray, J.E. Parks y L. Peau. 2003. Dangerous targets? Unresolved issues and ideological clashes around marine protected areas. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 13: 353–367.

Bird, E.C. 1996. Beach management. Nueva York: John Wiley & Sons.

Bird, E.C. (Ed.). 2010. Encyclopedia of the World's Coastal Landforms: Encyclopedia of the world's coastal landforms (Vol. 1). Dordrecht: Springer Netherlands.

Espejel, E., P. Peña-Garcillán, y O. Jiménez-Orocio. 2013. Flora de playas y dunas de México. Informe Técnico Final Conabio HJ007.

Flor, G. 1990. Tipología de dunas eólicas. Procesos de erosión-sedimentación costera y evolución litoral de la provincia de Huelva (Golfo de Cádiz occidental, sur de España). *Estudios Geológicos,* 46: 99-109.

Gallant, R.A. 1997. The story of dunes: sand on the move. USA: Franklin Watts. A Division of Grolier Publishing.

Hesp, P.A. 2000. Coastal sand dunes: form and function. Coastal dune vegetation network. Technical Bulletin No. 4. Massey University, New Zealand.

Hesp P.A. y I.J. Walker. 2013. Coastal dunes. En F. John y J.F. Shroder (Eds.), Treatise on geomorphology, Volume 11 (pp. 328-355). San Diego: Academic Press.

Jarmalavičius, D., J. Satkūnas, G. Žilinskas, y D. Pupienis. 2012. Dynamics of beaches of the Lithuanian coast (the Baltic Sea) for the period 1993–2008 based on morphometric indicators. *Environmental Earth Sciences,* 65: 1727-1736.

Leyva C., I. Espejel, E. Arellano, C. Arredondo, S. Delhumeau, N. Calderón de la Barca, A. Sánchez y E. Cruz. 2009 Apropiación de espacios naturales como espacios públicos (http://futurocostaensenada.files.wordpress.com/2009/07/cleyva2.pdf).

Martínez, M.L. y P. Moreno-Casasola. 1996. Effects of burial by sand on seedling growth and survival in six tropical sand dune species. *Journal of Coastal Research,* 12: 406-419.

Martínez M.L., A.M. Maun y N.P. Psuty. 2004. The fragility and conservation of the world´s coastal dunes: geomorphological, ecological and socioeconomic perspectives. En M.L. Martínez y N. Psuty (Eds.), Coastal dunes: ecology and conservation (pp. 355-370). Berlin: Springer-Verlag.

Moreno-Casasola, P. 1982. Ecología de la vegetación de dunas costeras: factores físicos. *Biotica,* 7: 577 602.

Moreno-Casasola, P. 1986. Sand movement as a factor in the distribution of plant communities in a coastal dune system. *Vegetatio,* 65: 67-76.

Moreno-Casasola, P. y I. Espejel. 1986. Classification and ordination of coastal dune vegetation along the Gulf and Caribbean Sea of Mexico. *Vegetatio,* 66: 147 182.

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

Nordstrom, K.F., N.P. Psuty y R.W.G. Carter. 1990. Coastal dunes: form and process (Vol. 2). New Jersey: John Wiley & Sons Inc.

Packham, J.R. y A.J. Willis. 1997. Ecology of dunes, Salt marsh and shingle. Cambrige: Chapman & Hall. University Press.

Peralta-Peláez, L.A., y P. Moreno-Casasola. 2009. Composición florística y diversidad de la vegetación de humedales en los lagos interdunarios de Veracruz. *Boletín de la Sociedad Botánica de México,* 85: 89-99.

Pilkey, O.H., J. Bullock y B.A. Cowan. 1998. The North Carolina shore and its barrier islands. EUA: Duke University press.

Protheros, D. 2004. Sedimientary geology. New York, NN: W.H. Freeman and Company.

Pye, K. y Tsoar, H. 1990. Aeolian sand and sand dunes. Londres: Unwin Hyman.

Ranwel, D. 1972. Ecology of salt marshes and sand dunes. Londres: Chapman and Hall.

Ranwell, D.S. y R. Boar. 1986. Coastal dune management guide. Norwich: Institute of Terrestrial Ecology, Abbots Ripton.

San Martin, J., C. Ramírez y C. San Martín. 1992. La flora de las dunas chilenas y sus adaptaciones morfológicas. *Bosque,* 13: 29-39.

Seingier, G., I. Espejel y J.L. Ferman. 2009 Cobertura vegetal y marginación en la costa mexicana. *Investigación Ambiental*, 1:54-69.

Vignaud, P., P. Duringer, H.T. Mackaye, A. Likius, C. Blondel, J.R. Boisserie, L. Bonis, V. Eisenmann, M.E. Etienne, D. Geraadsk, F. Guy, T. Lehmann, F. Lihoreau, N. López-Martínez, C. Mourer-Chauvire, O. Otero, J.C. Rage, M. Schuster, L. Viriot, A. Zazzo y M. Brunet. 2002. Geology and paleontology of the Upper Miocene Toros-Menalla hominid locality, Chad. *Nature,* 418: 152-155.

Capítulo III: Análisis de uso y situación actual de las dunas costeras de México

Jiménez-Orocio, O., I. Espejel, M.L. Martínez, P. Moreno-Casasola, D. Infante-Mata y N. Rodríguez-Revelo. 2014. Uso actual de las dunas y situación actual. En M.L. Martínez, P. Moreno-Casasola, I. Espejel, O. Jiménez-Orocio, D. Infante-Mata y N. Rodríguez-Revelo (Eds.), Diagnóstico general de las DC de México (pp. 81-94) México, D.F.: Comisión Nacional Forestal. ISBN 978-607-8383-17-7.

Uso de las dunas costeras

Entre todos los ecosistemas costeros, las dunas son las que han recibido la mayor presión. Muchos sistemas se han transformado de manera irreversible a través de las actividades del hombre, tanto de manera accidental como intencionalmente (Carter, 1991). La presión sobre los ecosistemas costeros se ha incrementado por la tendencia humana de migrar hacia las costas, ya sea por las actividades turísticas o para escapar de conflictos económicos o sociales que estén ocurriendo tierra adentro (Brown y McLachlan, 2002). Se ha calculado que para el año 2020, el 60% de la población mundial se encontrará a menos de 60 km de la costa, ejerciendo una presión aun mayor (UNCED, 1992). Entre todos los ecosistemas de la costa, las playas y dunas costeras son y probablemente continuarán siendo los más explotados y deteriorados (Nordstrom, 2008). Ha sido en los últimos cincuenta años cuando estos ecosistemas se han estudiado de manera objetiva y el conocimiento generado se ha integrado a las prácticas de manejo en muchos países. En México apenas es en los últimos 10 años cuando se ha empezado a valorar estos ecosistemas y a buscar su conservación y restauración. Instituciones como CONAFOR y CONABIO han impulsado proyectos para generar información, y otras como el INECC han empezado a desarrollar recomendaciones para su manejo, sobre todo desde el punto de vista turístico (Silva-Casarín et al., 2013).

Utilización de las dunas costeras

Las dunas costeras, como ecosistemas, se han utilizado principalmente como base de actividades recreativas (sandsurf, motociclismo, caminatas, asolearse, relajarse y contemplar el mar, entre otras). Sus recursos vegetales han sido y siguen siendo utilizados como madera para construcción y utensilios, leña, alimentos, cercas, medicinas, entre otros. Asimismo, la arena que las forma se ha usado como un material de construcción y como recurso minero (cuarzo, feldespato, hierro, sílice, entre otros). También, las dunas como ecosistemas, son de gran relevancia para otras actividades como la investigación científica y tienen otros valores como es la prestación de servicios ambientales. A continuación se hará una descripción más detallada de los principales usos en México.

Turismo y recreación.- Este uso está ligado a la urbanización de las costas. A nivel mundial, el turismo internacional es una de las actividades económicas más crecientes en las últimas décadas, y representa ingresos millonarios para los países visitados. Los viajes de descanso y recreación, en especial de lo que se conoce como "sol y playa" son los objetivos del turismo más frecuentes e importantes en todo el mundo, y por décadas, México ha estado entre los primeros 10 países más visitados por turistas extranjeros (Organización Mundial del Turismo –OMT, 2012). En los últimos 50 años los turistas internacionales en México han aumentado continuamente, al igual que los ingresos económicos relacionados con esta actividad (Figura III-1).

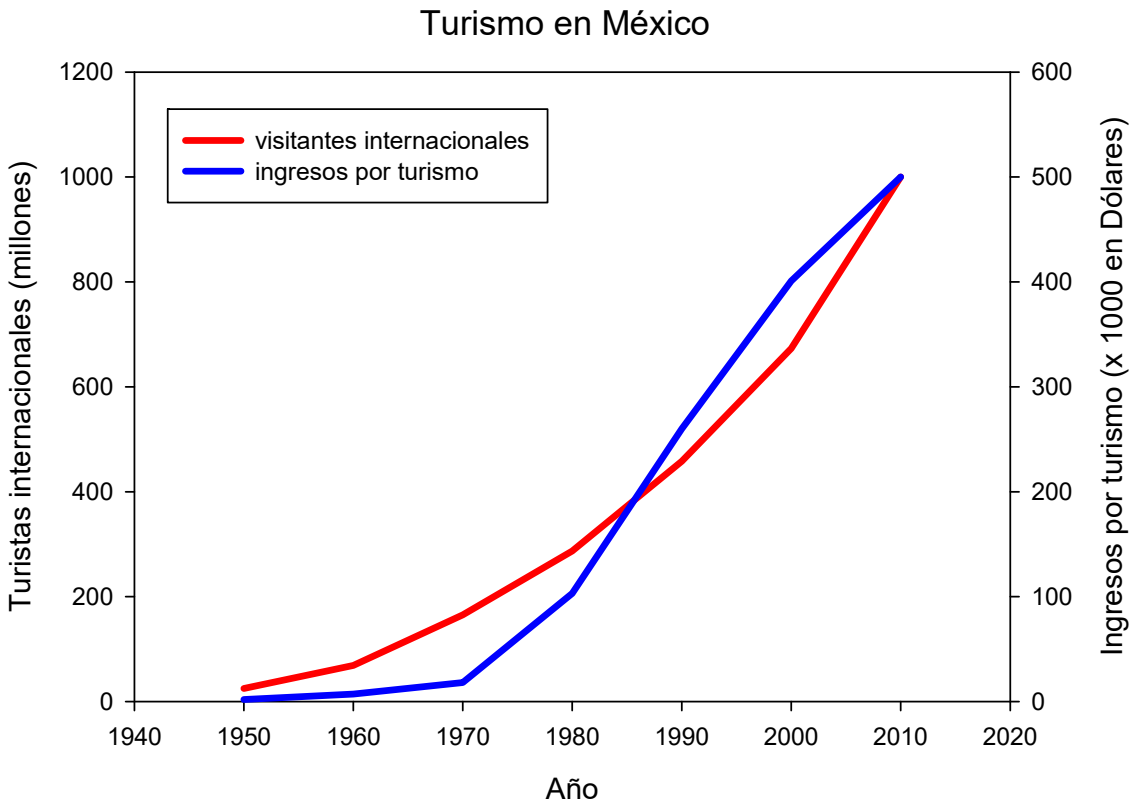

Figura III-1. Turistas internacionales e ingresos económicos que ha recibido México en los últimos 25 años (Secretaría de Turismo, 2013).

Entre todos los destinos posibles que ofrece México a sus visitantes extranjeros, las playas se encuentran entre los lugares más frecuentados por turistas nacionales y extranjeros. En 1991, Cancún, Acapulco, Mazatlán y Veracruz fueron los destinos preferidos en las costas mexicanas. En 2005 se repitió el patrón, pero además se incluyó Puerto Vallarta. Estos resultados indican que entre el 40 y el 50% de los turistas prefieren destinos ubicados en la playa (Cuadro III-1). Solamente el 30% de los destinos más frecuentados por los turistas nacionales se encuentran en la costa, mientras que entre el 50 y el 60% de las localidades más visitadas por los turistas se encuentran en la playa. Las playas más visitadas por los turistas mexicanos son Acapulco, Veracruz y Mazatlán (en 1991) y Acapulco, Veracruz y Cancún (en 2005). En cambio, los destinos de playa con más visitantes internacionales fueron Cancún, Acapulco, Puerto Vallarta, Ensenada, Los Cabos y Mazatlán (en 1991) y Cancún, Los Cabos, Puerto Vallarta, Ensenada y Cozumel (en 2005).

Cuadro III-1. Los diez destinos turísticos principales en términos de la cantidad de turistas en 1991 y 2005 (modificado de Propin-Frejomil y Sánchez Crispín 2007). En azul se resaltan los destinos ubicados en la costa.

	1991					
	Turistas Nacionales		Turistas Internacionales		Turistas Totales	
Orden	Localidad	Cantidad	Localidad	Cantidad	Localidad	Cantidad
1	Guadalajara	2,014,882	Cancún	1,428,638	Cd. de México	2,338,511
2	Cd. de México	1,551,812	Cd. de México	786,699	Guadalajara	2,150,572
3	Acapulco	1,251,615	Rosarito	400,225	Cancún	1,903,556
4	Tijuana	901,280	Acapulco	329,041	Acapulco	1,580,656
5	León	850,846	P. Vallarta	308,715	Tijuana	1,184,668
6	Veracruz	836,985	Ensenada	300,139	León	896,753
7	Monterrey	759,492	Tijuana	283,388	Mazatlán	869,059
8	C. Juárez	753,711	Los Cabos	246,254	Veracruz	853,834
9	Morelia	666,559	Mazatlán	229,259	Monterrey	852,265
10	Mazatlán	639,800	Mérida	190,861	Cd Juárez	823,825

	2005					
	Turistas Nacionales		Turistas Internacionales		Turistas Totales	
Orden	Localidad	Cantidad	Localidad	Cantidad	Localidad	Cantidad
1	Cd. de México	8,166,598	Cd. de México	3,242,005	Cd. de México	11,408,603
2	Acapulco	3,617,361	Cancún	2,134,180	Acapulco	3,775,597
3	Guadalajara	1,974,660	Los Cabos	696,061	Cancún	3,072,413
4	Veracruz	1,576,595	P. Vallarta	554,560	Guadalajara	2,192,004
5	Monterrey	1,252,552	Rosarito	323,741	Veracruz	1,641,539
6	Cancún	938,233	Ensenada	277,840	Monterrey	1,511,068
7	León	933,088	Cozumel	265,844	P. Vallarta	1,341,891
8	Tijuana	884,446	Monterrey	258,516	Tjuana	1,132,236
9	Puebla	843,998	Tijuana	247,790	Mazatlán	988,668
10	Oaxaca	808,649	Mérida	228,263	Oaxaca	963,860

Actualmente en México, el crecimiento turístico en zonas costeras se ha desarrollado a través de cuatro mecanismos (Amador y Moreno-Casasola, 2006) y en todos ellos ha habido un crecimiento sobre las dunas costeras, incluyendo las dunas frontales:

a) Crecimiento de sitios turísticos con base en poblados establecidos, en los cuales se hacen nuevas inversiones y se transforman las pautas de desarrollo. Son pequeñas urbanizaciones, poblados rurales o de pescadores que cambian drásticamente su actividad y en los que los pobladores se incorporan en el servicio a los turistas, generalmente con bajos salarios. Se les llama **"**destinos de playa tradicionales" e incluyen en el Pacífico a Acapulco, La Paz, Guaymas, Manzanillo, Mazatlán, Puerto Escondido y Puerto Vallarta y Cozumel en el Caribe. En el 2010 estos centros recibieron 9,408,453 turistas y ofertaron 50,699 cuartos de hotel, siendo el destino preferido de los turistas nacionales (Secretaría de Turismo, 2013).

b) Creación de polos de desarrollo turístico integrado, en los que se escoge un sitio de gran atractivo natural y se planea la infraestructura para el sitio. Se da énfasis a las instalaciones turísticas más que a la creación de una nueva ciudad. Ejemplos de ello son Cancún, Bahías de Huatulco, Ixtapa-Zihuatanejo, Loreto y Los Cabos. En el 2010 recibieron 6,231,946 turistas para una oferta de 49,468 cuartos, siendo el turismo internacional el más frecuente en estos sitios (Secretaría de Turismo, 2013).

c) Crecimiento de puertos que traen consigo infraestructura y necesidades de urbanización para los propios trabajadores. Se generan empleos de manera directa e indirecta, por lo que son fuertes atractivos para migrantes y provocan un crecimiento de la mancha urbana. Ejemplos de ello son el puerto de Veracruz y Tuxpan, entre otros. En ellos existen otros atractivos turísticos (áreas naturales protegidas, zonas arqueológicas o coloniales, valores naturales) por lo que se estimula también la industria turística.

d) Pobladores locales, principalmente de zonas urbanas, construyen una segunda casa en la costa. Todos buscan una vista del mar y acceso inmediato a la playa. Progreso, en Yucatán, es un caso típico e histórico, así como fue Acapulco, en los años 50. Las casas se multiplican en una línea paralela a la costa. Este tipo de desarrollo es común cerca de las ciudades costeras en casi todos los estados del país. Destacan Baja California (corredor Tijuana-Ensenada), Yucatán (Progreso-Sisal-Telchac), Veracruz (Costa Esmeralda), Sonora (Puerto Peñasco y Bahía Kino), entre otros.

En estos sitios, la recreación en playas y dunas es de dos tipos:

a) Recreación activa, especialmente con motocicletas y vehículos de todo terreno así como campos de golf. Esta actividad de uso de las dunas como pistas de motos y carros se ha acentuado en los últimos años. El piloto de una moto o vehículo de este tipo encuentra gran diversión no sólo en pasar por una pista muchas veces, sino en construir nuevos caminos. La formación de nuevos caminos implica pasar sobre las plantas destruyéndolas. Además, se compacta la arena destruyendo los nidos de pequeños mamíferos y reptiles. Casi todas las playas del país, cerca de las ciudades o de poblados turísticos, escogen una playa o duna para rentar motos. El problema es más acentuado en las playas del norte del país, ya que es un pasatiempo de los norteamericanos que visitan estas ciudades donde hay menos restricciones que en Estados Unidos. En Baja California las dunas de la playa municipal de Ensenada se destruyeron en su totalidad en 20 años por este nocivo uso; en Baja California Sur (playa El Coyote), en Sonora (Puerto Peñasco) y en Veracruz (Chachalacas) se dan ejemplos claros de este pasatiempo (Figura III-2).

Figura III-2. Chachalacas y Ensenada: uso de cuatrimotos y destrucción de dunas. (Foto: G. Sánchez-Vigil).

b) Recreación pasiva, se refiere a caminatas, *sandsurf*, paseo en bicicletas, que aprovechan las formas de las dunas y la arena para divertirse. En varios sitios del país se aprovechan estas actividades y se relacionan con programas de educación ambiental donde se instruye a los visitantes sobre los valores de las dunas y otros ecosistemas costeros cercanos. Hay

programas que han funcionado durante muchos años, destacando los de La Mancha en Veracruz y en la barra arenosa de Punta Banda en Ensenada. Asimismo, en casi todas las playas turísticas, especialmente donde anidan tortugas, hay grupos de guías explicando la función de las playas y dunas. Dentro de los usos pasivos está la contemplación. Las dunas costeras constituyen paisajes con una gran belleza escénica que sirve para esparcimiento espiritual, como lo aseguran los expertos de dunas costeras (de la Vega, 2011), los usuarios de las playas mexicanas (Espejel et al., 2007; Cervantes et al., 2008) y que se evidencia en algunos sitios como Chachalacas (Veracruz) quienes usan el término "tranquilo" para referirse a las dunas costeras ubicadas a unos kilómetros de su localidad (Wojtarowski-Leal, 2011). Numerosas obras de arte, fotografías y libros muestran la belleza de estos ecosistemas (Moreno-Casasola e Infante-Mata, 2010).

Es común que los desarrollos turísticos crezcan de tal forma que los atractivos naturales que ofrecían se vean afectados por el mismo desarrollo. El modelo de desarrollo turístico (ciclo de vida de Butler, 1980) que se adoptó en el mundo costero, de hoteles junto al mar, ha sido el principal detonante de la pérdida de playas y dunas costeras y por lo tanto, la consecuente reducción de la protección costera, aquí y en el mundo entero. En México, Cancún es un ejemplo clásico de este fenómeno. Cancún es una isla de barrera que fue totalmente urbanizada. Esta otrora hermosísima isla, mide 22 km de largo y antes de 1970, estaba cubierta por dunas costeras, con diversos tipos de vegetación, desde comunidades de pioneras y matorrales con palmas, hasta selvas. Actualmente cuenta con campos de golf, hoteles, clubs privados y centros comerciales (Figura III-3). Alrededor de 600,000 personas habitan la ciudad cuya infraestructura turística en gran parte está construida sobre dunas costeras (Seingier et al., 2009), por lo que ya no existen ni las dunas ni la vegetación costera que Espejel (1986) describió para Cancún y zonas aledañas. La desaparición de las dunas costeras aumentó la vulnerabilidad de los propios desarrollos frente al impacto de los huracanes, cada vez más intensos. Un ejemplo de esta vulnerabilidad incrementada es lo que ocurrió con el huracán Stan, en el 2005. Este huracán afectó a Guatemala, El Salvador y el Sureste de México, causando inundaciones y deslaves que resultaron en la muerte de 1,600 a 2,000 personas. El daño total estimado fue de 2 mil millones de dólares. Antes de Stan pasaron Gilberto y Wilma, el más destructivo de los huracanes (Silva -Casarín et al., 2009). Además

de los daños en las construcciones, estos huracanes se llevaron consigo el tesoro más preciado de Cancún: sus playas y dunas costeras.

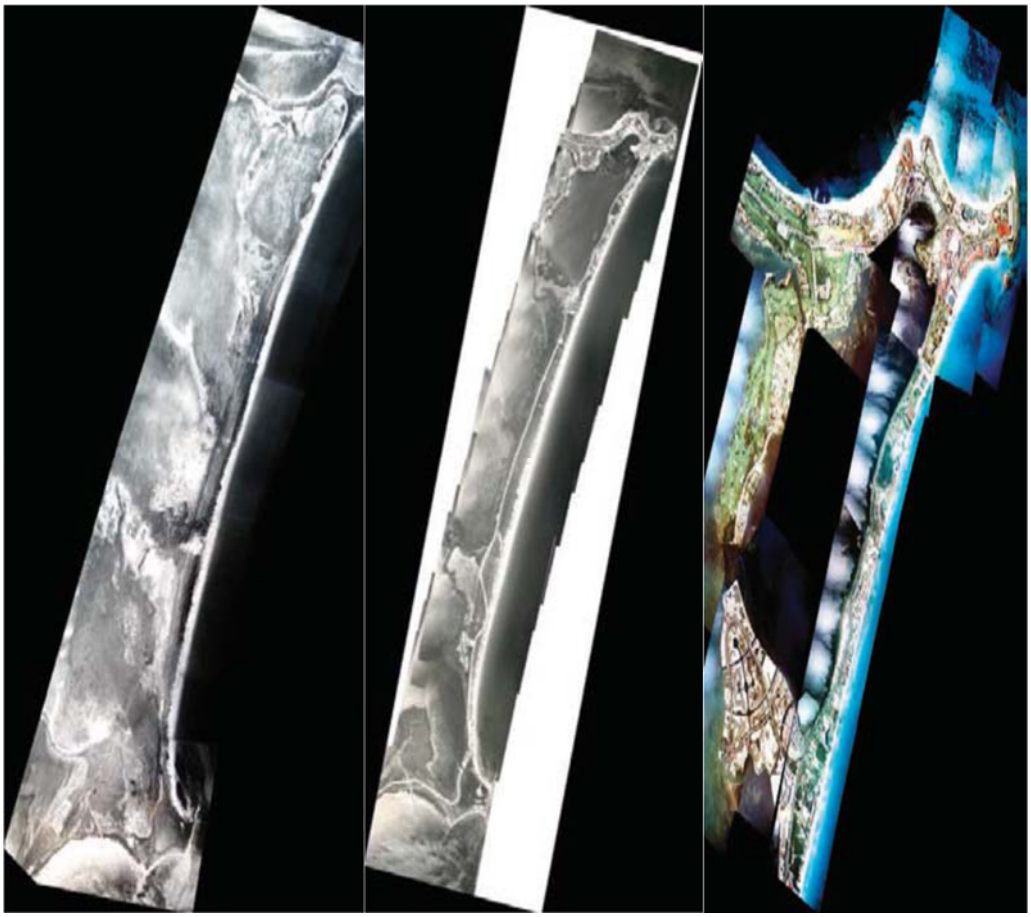

Figura III-3. Desarrollos turísticos en Cancún de 1960 a 1999 **a)** 1960; **b)** 1983 y **c)** 1999. (Fotos propiedad de Instituto de Ingeniería, UNAM)

Agricultura y ganadería.- Los pobladores locales también cultivan sobre las dunas, sobre todo en las partes donde las plantas nativas de los médanos han aportado materia orgánica, haciendo el suelo más fértil. Entre los cultivos más usuales están el cacahuate, el pipián y la sandía. Más recientemente la caña de azúcar está cubriendo extensiones grandes, y como el manto freático en la zona costera está cerca de la superficie, se extrae agua para su riego. Estos cultivos se ubican en zonas protegidas, es decir que existen médanos estabilizados entre la playa y los cultivos, que son los que reciben el impacto de los vientos, la salinidad y el

movimiento de arena. En los huertos de los pobladores establecidos en zonas de médanos se cultivan árboles frutales como el chicozapote y el mango.

Durante el *boom* del henequén en Yucatán (1880-1910) (Zuleta, 2004), en las dunas se cultivó *Agave angustifolia.* Aún quedan vestigios de las plantas, las cuales ya forman parte de las comunidades vegetales de las dunas costeras yucatecas (Espejel, 1984; Torres et al., 2010).

El cultivo más extendido en las dunas es el de la palma de coco (*Cocos nucifera*), especie muy utilizada desde la época de la Colonia Española en nuestro país. Durante la última mitad del siglo pasado se cultivó para extraer la copra y grandes zonas de médanos fueron cubiertas con este cultivo. Hoy en día se ha extendido una plaga, el amarillamiento letal del coco, producido por una bacteria patógena (*Phytoplasma*) que es transmitida por insectos y causa la muerte de la palma en pocos meses. Con variedades resistentes, el coco sigue siendo utilizado ampliamente por las comunidades (González-Marín et al., 2012).

Una de las principales transformaciones de la cobertura vegetal de las dunas se produce por el uso ganadero. Esta actividad se realiza con diferentes grados de intensidad. Algunas comunidades introducen ganado en dunas estabilizadas y utilizan el fuego para abrir espacios o inducir rebrotes de pastos o tallos nuevos, como los tallos modificados (cladodios) del nopal (*Opuntia* spp.) en Jalisco por ejemplo. Para intensificar la actividad e incrementar el número de cabezas de ganado se tala la vegetación y se introducen pastos exóticos como estrella de África (*Cynodonplectostachium, Cynodonnlemfluensis*) y pasto privilegio (*Panicum maximum*), entre otros (Travieso-Bello et al., 2006). En algunas zonas la búsqueda para ampliar el terreno bajo uso ha hecho que se utilicen las dunas frontales, provocando una pérdida de la cubierta vegetal nativa que mantiene la forma de las dunas.

Minería.- Las mineras extraen arena, carbón mineral, cobre, hierro y cromo, e incluso titanio y carbonato de calcio (Carter, 1991), cuarzo, feldespato (Rodríguez et al. 2014). Las actividades mineras son “a cielo abierto”, se extrae la arena y se traslada a donde se va a usar, por ejemplo en la construcción de carreteras, o se exporta. Actualmente hay un mercado fuerte de minerales, por lo que se está promoviendo la minería en todo el país. Los proyectos mineros generan un severo deterioro ambiental, por lo que tienen como condicionante

restaurar los sitios. De esta manera, aumentará la necesidad de proyectos de restauración y reforestación de dunas donde las actividades mineras han sido abandonadas.

Investigación y servicios ambientales

Actividades científicas y educativas

La gran diversidad de climas y especies donde ocurren las dunas costeras da como resultado ecosistemas diversos y dinámicos que han sido tema de interés ecológico desde hace más de 100 años. Desde el siglo XIX, las dunas costeras han sido objetos importantes de estudio dentro de la ecología. Ya en 1835 Steinheil publicó resultados de investigaciones sobre la vegetación de dunas costeras de Holanda (van der Maarel, 1993). Posteriormente, el norteamericano Henry Chandler Cowles publicó en 1898 una investigación detallada sobre la vegetación de las dunas costeras ubicadas en la costa del Lago Michigan (en EUA), donde demostró que los ecosistemas cambian a lo largo del tiempo. A partir de estos estudios surgieron varias teorías ecológicas como la sucesión, que se refiere a los cambios en los ecosistemas y el reemplazo de las especies a lo largo del tiempo. Estos conocimientos permiten comprender el funcionamiento de todos los ecosistemas del planeta.

El dinamismo acelerado de los ecosistemas de dunas costeras, convierte a estos sistemas en laboratorios naturales donde es posible analizar los mecanismos naturales de regeneración, cuyo conocimiento es esencial para proyectos de restauración y reforestación (Moreno-Casasola et al., 2008; de la Vega, 2011; Álvarez-Molina et al., 2012; Moreno-Casasola et al., 2013).

Por otro lado, la tolerancia a las condiciones ambientales tan limitantes (Maun, 1994; 1998) que caracteriza a estos ecosistemas también ha hecho interesante el estudiarlos desde varios puntos de vista: evolutivo, fisiológico e incluso en términos utilitarios. El conocimiento de los mecanismos y de los límites de tolerancia de las especies tiene utilidad potencial para proyectos de restauración y manejo de dunas costeras. La similitud en las respuestas de los organismos ante las condiciones ambientales tan limitantes, a pesar de ser especies con diferentes historias evolutivas, también es tema de interés para los ecólogos, puesto que

ofrece la oportunidad de estudiar la manera en que han surgido respuestas semejantes en especies muy distintas, lo que se conoce como “convergencias evolutivas”.

Servicios ambientales

Las dunas costeras, como otros ecosistemas, proveen recursos naturales como son alimento, bebida, combustible, material para construcción, abrigo y productos farmacéuticos. Pero otro tipo de beneficios que no habían sido apreciados sino hasta recientemente, son los servicios sin los cuales los humanos dejarían de existir. Estos servicios incluyen procesos de purificación del agua y del aire, descomposición de la basura, regulación del clima, regeneración de la fertilidad del suelo, mitigación de sequías e inundaciones, polinización de los cultivos y de la vegetación natural, dispersión de semillas, ciclo y movimiento de nutrientes, control de plagas, protección de los rayos ultravioleta del sol, y producción y mantenimiento de la biodiversidad, la cual es fundamental para sostener los procesos anteriores. Esta colección de servicios se conoce como *servicios ambientales* y se refiere al conjunto de condiciones y procesos a través de los cuales los ecosistemas naturales y las especies que los conforman, ayudan a mantener y complementar la vida humana (Daily, 1997; Daily et al., 1997). Por tanto es muy importante reconocer, no solamente a nivel científico sino también social y gubernamental, que los ecosistemas de dunas costeras proveen tanto recursos, incluyendo los forestales, como también una gama de servicios ambientales de enorme valor para la sociedad.

En la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA, 2005) se elaboró un sistema de clasificación de los servicios ambientales basado en cuatro líneas conceptuales (Figura III-4). Se conjuntaron los servicios ambientales en cuatro grupos.

1. Soporte: son los necesarios para la producción de los demás servicios ambientales (el ciclo de nutrientes, la fotosíntesis).
2. Aprovisionamiento: son los productos que obtenemos de los ecosistemas (como alimentos, leña, fibras).
3. Regulación: son los beneficios que se obtienen a partir de la regulación de procesos que se producen gracias al buen funcionamiento del ecosistema (como la polinización, la regulación de enfermedades, regulación del clima).

4. Culturales: son los beneficios no materiales que se obtienen de los ecosistemas (recreativo, turístico, estético, espiritual).

Figura III-4. Clasificación de los servicios ambientales (MEA, 2005).

Como complemento de la clasificación de los servicios ambientales, el grupo constituido para realzar la Evaluación del Milenio (MEA, 2005) determinó que los servicios ambientales están relacionados con el bienestar humano (Figura III-5). Así por ejemplo, los servicios de aprovisionamiento están fuertemente relacionados con el suministro de materiales que son esenciales para una vida decorosa; los servicios de regulación afectan la seguridad y la salud; los servicios culturales afectan la cohesión social (MEA, 2005).

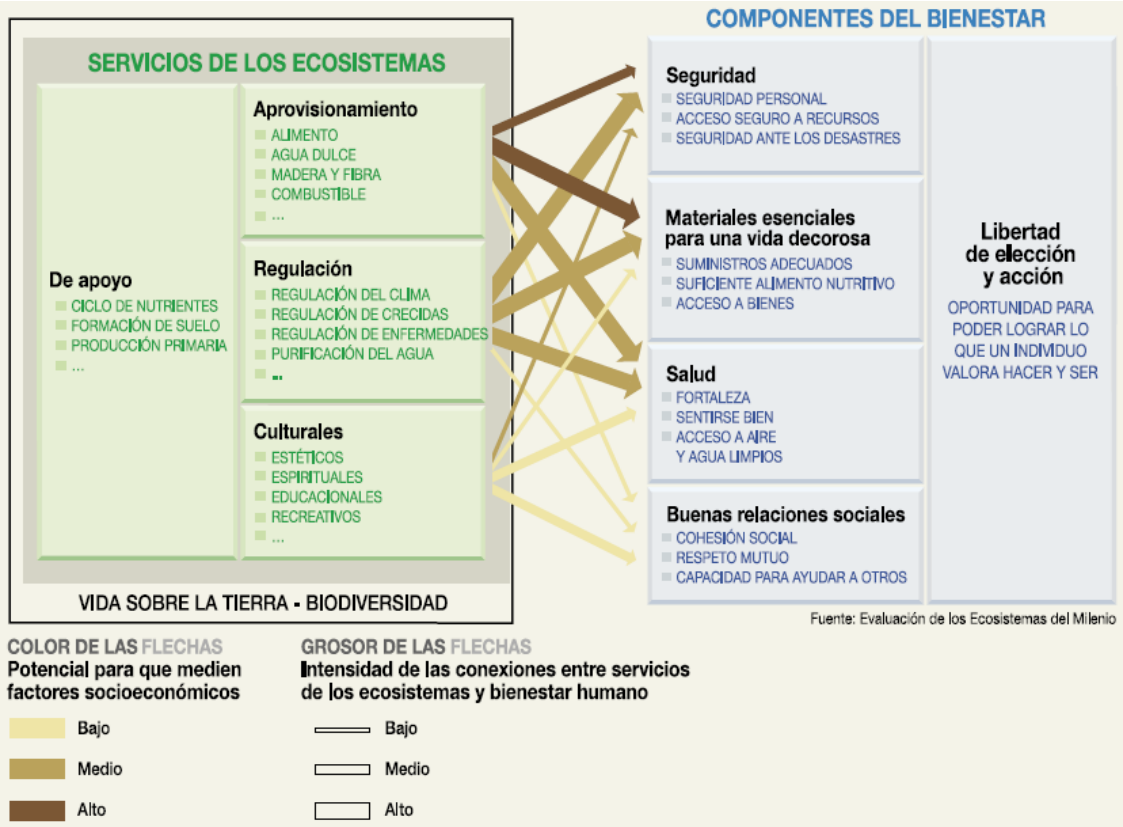

Figura III-5. Relación de los servicios ambientales con los componentes del bienestar humano (MEA, 2005).

Las dunas costeras de México, como las de todo el mundo, ofrecen diferentes servicios ambientales que abarcan las cuatro clases. Por ejemplo, son servicios de apoyo al contribuir al ciclo de nutrientes, al ciclo del agua y a la producción primaria. Proveen de servicios de aprovisionamiento al obtenerse madera, fibra, productos farmacéuticos, ornamentales, etc., cuando a sus especies las transformamos en un recurso natural. Ofrecen servicios de regulación especialmente al brindar protección contra tormentas y huracanes, al purificar el agua, mitigar las inundaciones y ser un ambiente para la polinización. Asimismo, en las dunas se dan servicios culturales para la recreación, la contemplación de su belleza estética, para el trabajo de los científicos y para el beneficio del espíritu.

En diferentes regiones del país, los servicios ambientales pueden variar en importancia, por ejemplo, si atrás de las dunas hay infraestructura urbana o agropecuaria, las dunas costeras

ofrecen un servicio de regulación como es la protección a inundaciones ocasionadas por el embate de las olas. Si hay selvas tropicales en las dunas, ofrecen el servicio de aprovisionamiento de especies útiles. Si están bien conservadas, ofrecen servicios culturales para actividades relacionadas al bienestar físico y espiritual y para la investigación científica, así como servicios de aprovisionamiento por su germoplasma representado en su biodiversidad. Y todas, en todo el país, aunque estén deterioradas, prestan el servicio de apoyo para que se lleven a cabo los ciclos de la vida.

La destrucción y fragmentación de las características naturales (dinámica hidro-geomorfológica y de la vegetación) de las dunas costeras resulta en la pérdida de los servicios ambientales que permiten y mejoran la vida en la costa mexicana.

Situación actual en México

La superficie total cubierta por dunas costeras en México suma 808,711 ha, y éstas se encuentran en diferentes estados de conservación y grados de amenaza. En un análisis aproximado, se calcula que se ha transformado la tercera parte de las dunas del país (principalmente a usos urbanos y agropecuarios) y el resto permanece natural.

En la figura III-6 se presenta el mapa del México costero. De acuerdo con el INEGI, una población se considera rural cuando tiene menos de 2,500 habitantes, mientras que la urbana es aquella donde viven más de 2,500 personas. En el 2010, se contabilizaron 47 ciudades de más de 5,000 habitantes (Cuadro III-2), aunque sólo cinco son grandes ciudades costeras que tienen frente de mar, las cuales han sido total o parcialmente construidas sobre dunas (Cancún, Acapulco, Veracruz, Mazatlán y Ensenada). Otras ciudades costeras tienen frente de mar pero han crecido sobre acantilados, como Huatulco en Oaxaca y Tijuana en Baja California, que es una ciudad de más de un millón de habitantes, pero solo una colonia es costera y ha crecido sobre dunas (Playas de Tijuana). Veracruz es el estado con más localidades urbanas costeras (23) que albergan entre 2,800 y medio millón de habitantes. En el cuadro 2 se presentan las 47 ciudades costeras mexicanas de más de 10,000 habitantes que han perdido total o parcialmente el servicio ambiental de protección costera que ofrecen las dunas. Todos los centros urbanos de 2,500 habitantes o más suman un total de 3,944,957

personas que viven en ciudades sobre dunas costeras. Asimismo son 3,301 poblados rurales (de menos de 2,500 habitantes) donde viven 197,460 habitantes. En total tenemos que en el 2010 vivían sobre las dunas fragmentadas, con usos agropecuario y urbano, 4,142,417 personas.

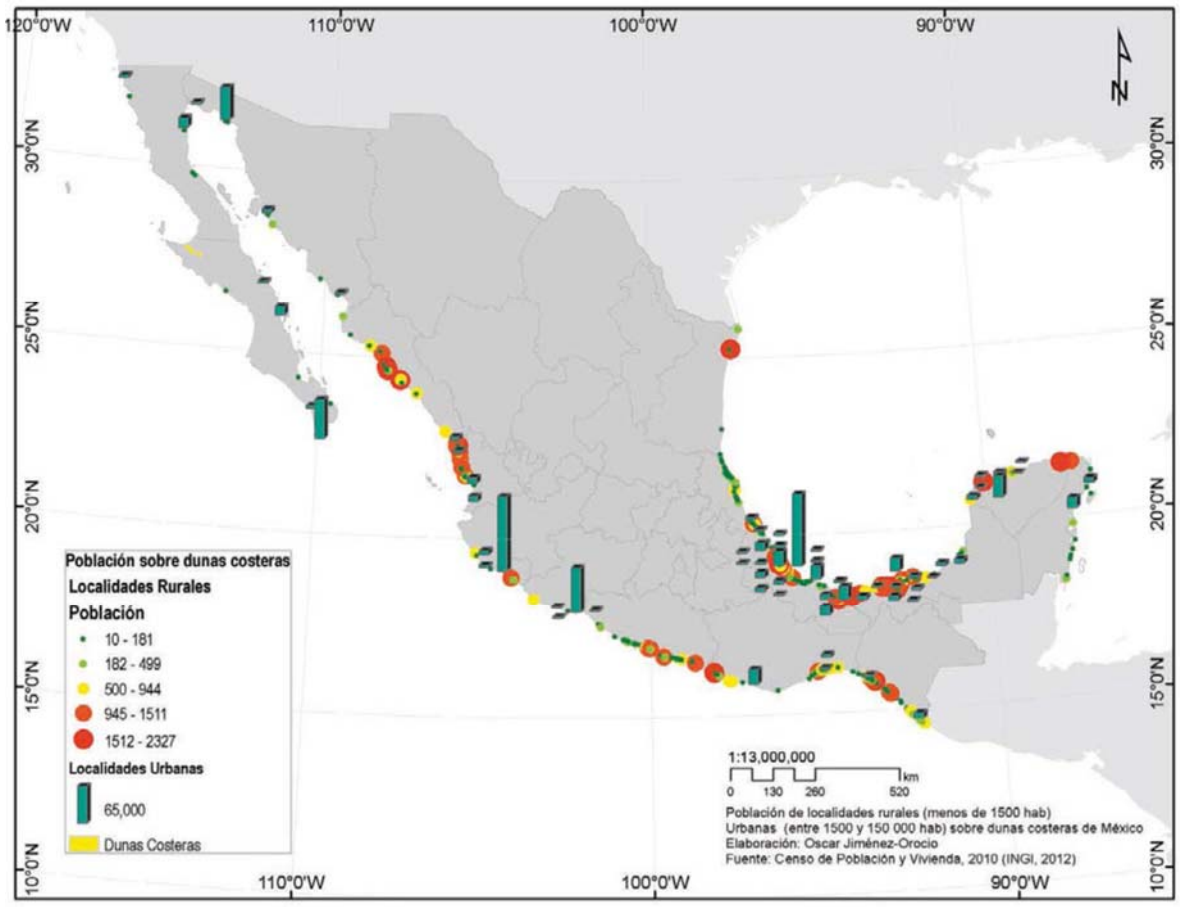

Figura III-6. Principales ciudades costeras en México (entre 1,500 y 150,000 habitantes) y poblados rurales costeros construidos sobre dunas total o parcialmente. Dunas completo incorpora todos los tipos de usos (fragmentadas, con usos agropecuario y urbano) y las naturales.

Cuadro III-2. Principales ciudades costeras de más de 3,000 habitantes que han perdido el servicio ambiental de protección de la línea de costa por haber abatido las dunas costeras.

Estado	Municipio	Ciudad	Población total
Baja California	Ensenada	Ensenada	279,765
	Total Ensenada		279,765
	Mexicali	San Felipe	16,702
	Total Mexicali		16,702
	Playas de Rosarito	Primo Tapia	4,921
	Total Playas de Rosarito		4,921
Total Baja California			301,388

Baja California Sur	La Paz	Todos Santos	5,148
	Total La Paz		5,148
	Loreto	Loreto	14,724
	Total Loreto		14,724
	Los Cabos	Cabo San Lucas	68,463
	Total Los Cabos		68,463
	Mulegé	Heroica Mulegé	3,821
	Total Mulegé		3,821
Total Baja California Sur			92,156
		Ciudad del Carmen	169,466
		Isla Aguada	6,204
		Nuevo Progreso	4,851
		Sabancuy	7,286
		San Antonio Cárdenas	4,206
	Total Carmen		194,548
Total Campeche			194,548

		Puerto Madero (San	
Chiapas	Tapachula	Benito)	9,557
	Total Tapachula		9,557
	Tonalá	Cabeza de Toro	3,413
	Total Tonalá		3,413
Total Chiapas			12,970

Colima	Manzanillo	Manzanillo	130,035
	Total Manzanillo		130,035
Total Colima			130,035

Guerrero	Acapulco de Juárez	Acapulco de Juárez	673,479
	Total Acapulco de Juárez		673,479
	La Unión de Isidoro Montes de Oca	Petacalco	2,715
	Total La Unión de Isidoro Montes de Oca		2,715

Total Guerrero			676,194

Jalisco	Cihuatlán	Barra de Navidad	4,324
		San Patricio (Melaque)	7,569
	Total Cihuatlán		11,893
Total Jalisco			11,893

Michoacán de Ocampo	Lázaro Cárdenas	Bahía Bufadero (Caleta de Campos)	2,580
		Ciudad Lázaro Cárdenas	79,200
		Playa Azul	3,139
	Total Lázaro Cárdenas		84,919
Total Michoacán de Ocampo			84,919

Nayarit	Compostela	La Peñita de Jaltemba	9,102
	Total Compostela		9,102
	San Blas	San Blas	10,187
	Total San Blas		10,187
Total Nayarit			19,289

Oaxaca	San Mateo del Mar	Colonia Juárez	2,803
		San Mateo del Mar	5,734
	Total San Mateo del Mar		8,537
	San Pedro Mixtepec - Dto. 22 -	Puerto Escondido	25,902
	Total San Pedro Mixtepec -Dto. 22 -		25,902
Total Oaxaca			34,439

Quintana Roo	Benito Juárez	Puerto Morelos	9,188
		Cancún	628,306
	Total Benito Juárez		637,494
	Tulum	Tulum	18,233
	Total Tulum		18,233
Total Quintana Roo			655,727

Sinaloa	Escuinapa	Isla del Bosque	5,820
		Teacapán	4,252
	Total Escuinapa		10,072
	Mazatlán	Mazatlán	381,583
	Total Mazatlán		381,583
Total Sinaloa			391,655

Sonora	Hermosillo	Bahía de Kino	6,050
	Total Hermosillo		6,050
	Huatabampo	Yavaros (Isla las Viejas)	3,692
	Total Huatabampo		3,692

	Puerto Peñasco	Puerto Peñasco	56,756
	Total Puerto Peñasco		56,756
	San Luis Río Colorado	Golfo de Santa Clara	3,967
	Total San Luis Río Colorado		3,967
Total Sonora			70,465

Tabasco	Cárdenas	Coronel Andrés Sánchez Magallanes	6,913
	Total Cárdenas		6,913
	Centla	Cuauhtémoc	3,589
		Frontera	22,795
		Ignacio Allende	3,408
		Simón Sarlat	3,044
		Vicente Guerrero	8,188
	Total Centla		41,024
Total Tabasco			47,937

Tamaulipas	Ciudad Madero	Ciudad Madero	197,216
	Total Ciudad Madero		197,216
Total Tamaulipas			197,216

Veracruz de Ignacio de la Llave	Alvarado	Alvarado	23,128
		Antón Lizardo	6,003
	Total Alvarado		29,131
	Boca del Río	Boca del Río	9,947
		Veracruz	126,507
	Total Boca del Río		136,454
	Coatzacoalcos	Allende	23,620
		Coatzacoalcos	235,983
		Fracc. Ciudad Olmeca	16,074
		Lomas de Barrillas	8,915
		Puerto Esmeralda	3,826
	Total Coatzacoalcos		288,418
	Nautla	Nautla	3,040
	Total Nautla		3,040
	Tecolutla	Tecolutla	4,591
	Total Tecolutla		4,591
	Veracruz	Colinas de Santa Fe	6,211
		Delfino Victoria (Santa Fe)	3,896
		Fracc. Costa Dorada	3,660
		Fracc. El Campanario	3,543
		Fraccionamiento Geovillas los Pinos	12,840
		Las Bajadas	4,829

		Lomas de Río Medio Cuatro	2,882
		Los Torrentes	4,665
		Oasis	3,325
		Río Medio [Granja]	2,895
		Valente Díaz	25,700
		Veracruz	428,323
	Total Veracruz		502,769
Total Veracruz de Ignacio de la Llave			964,403

Yucatán	Dzilam de Bravo	Dzilam de Bravo	2,374
	Total Dzilam de Bravo		2,374
	Progreso	Chelem	3,509
		Chicxulub (Chicxulub Puerto)	6,010
		Chuburná	1,929
		Progreso	37,369
	Total Progreso		48,817
	Telchac Puerto	Telchac Puerto	1,722
	Total Telchac Puerto		1,722
	Celestún	Celestún	6,810
	Total Celestún		6,810
Total Yucatán			59,723

Total general	3,944,957

Entre los mexicanos que viven en ciudades construidas sobre dunas costeras, los estados con el mayor porcentaje son Veracruz (24%), Guerrero (18%), Quintana Roo (17%) y Sinaloa (10%). En la figura III-7 se puede apreciar la población que vive en estas ciudades en cada estado costero.

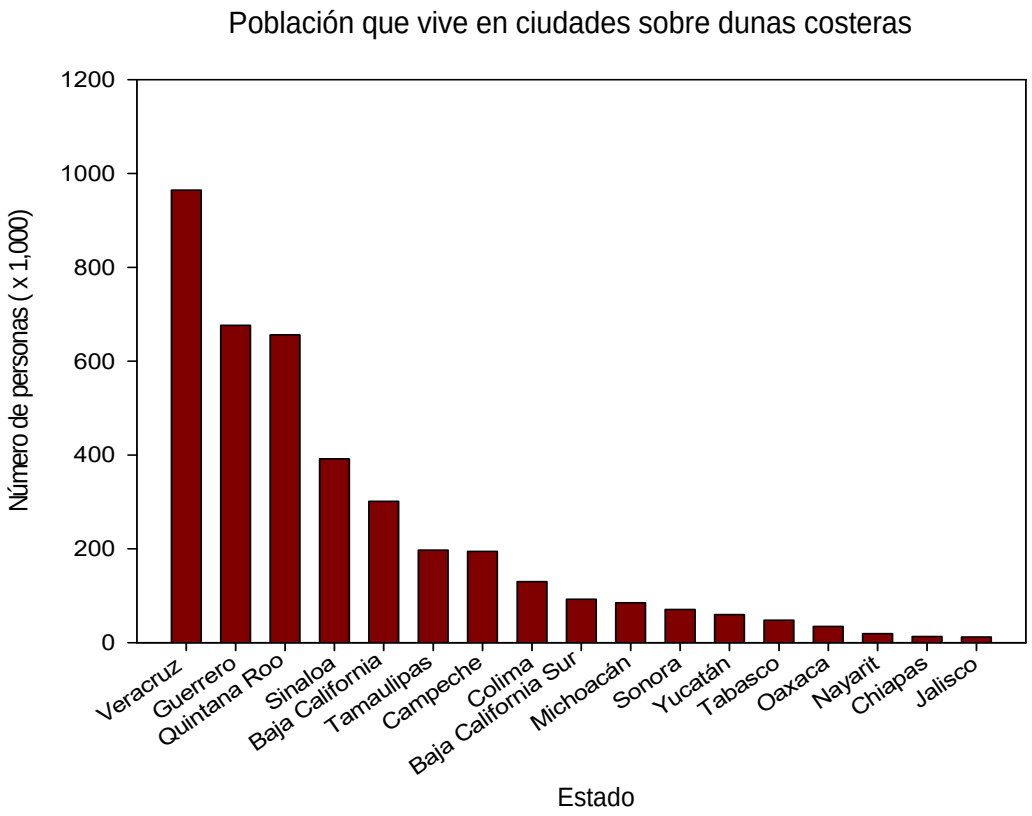

Figura III-7. Número de habitantes que vive en ciudades sobre dunas costeras en cada uno de los estados con litoral en la República Mexicana.

Se consideran dunas amenazadas, aquellas en las que se han construido poblados, porque las abaten y se pierden los servicios ambientales, en especial el de protección a las mismas localidades costeras. Es una amenaza porque aumenta la vulnerabilidad de la población que en ellos habita. Por ejemplo, se encontró que la mitad de las localidades rurales de México (Figura III-6 y III-7) que están construidas sobre dunas están en el sur del Golfo de México (Figura 8). Veracruz tiene el 27% de las localidades del país construidas sobre dunas, Tabasco el 13% y Campeche el 10%. En el sureste se encuentran el 21% de las localidades construidas sobre dunas costeras (Quintana Roo, 11% y Chiapas, 10%). Según Seingier et al. (2009), en Veracruz y Oaxaca se encuentran también los municipios más marginados. El caso de Veracruz es prioritario para su atención en restauración y reforestación de dunas costeras porque además de tener una población marginada, ésta es muy vulnerable a impactos por huracanes e inundaciones, por el hecho de haber crecido sobre dunas costeras y perdido el servicio ambiental protector que éstas ofrecen.

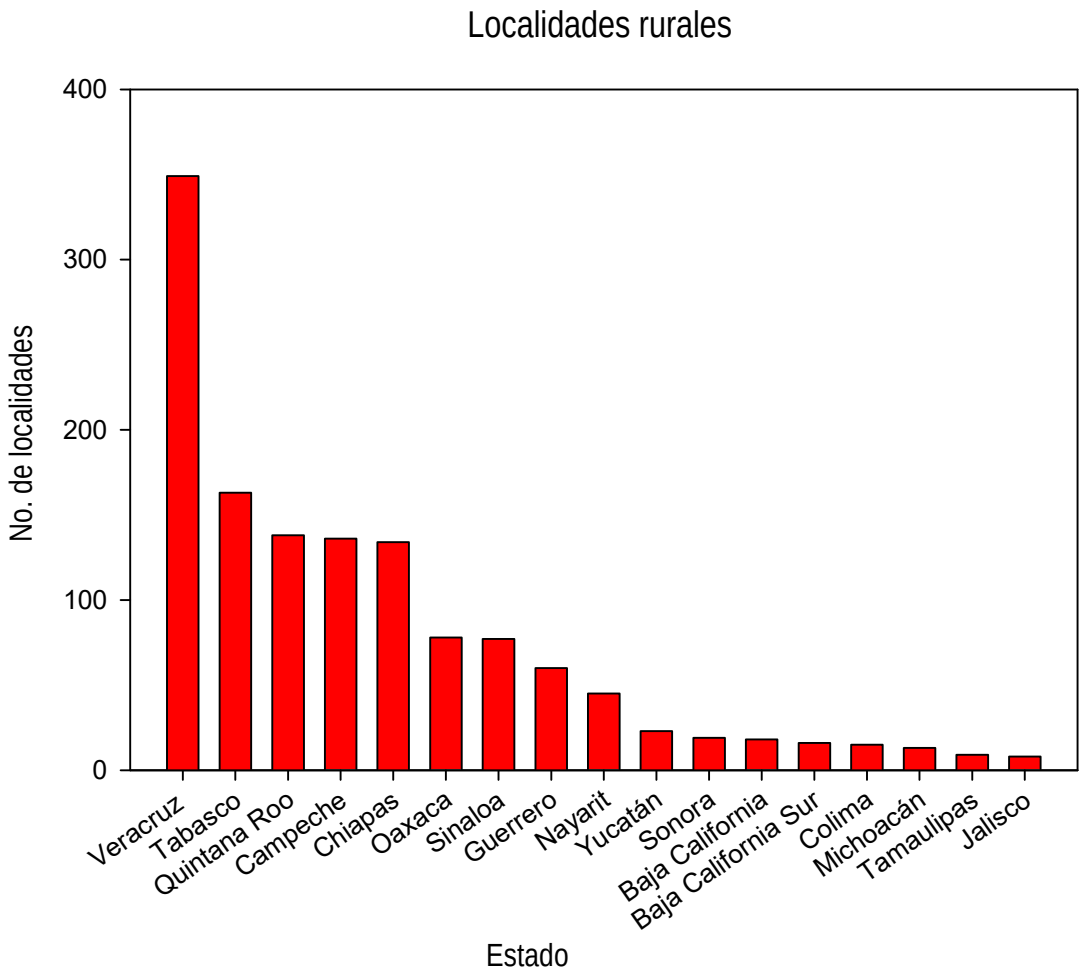

Figura III-8. Número de localidades rurales registradas en 2010 (según INEGI) y que están ubicadas sobre dunas costeras.

Hay casos interesantes que vale la pena comentar. Por ejemplo en Cancún se reportan más de 600,000 habitantes y como se ha mencionado, su municipio es el que más dunas ha perdido, aunque en todo el estado sólo hay 11 localidades donde 3,107 personas viven sobre dunas.

Para priorizar necesidades de restauración y reforestación a nivel nacional habría que empezar por los estados con más población rural sobre dunas, ya que son las más vulnerables (Figura III-9). Por ejemplo, hay fraccionamientos en el municipio de Veracruz, que son del

tamaño de ciudades en otros estados; en el cuadro 2 se puede observar que el Fraccionamiento Ciudad Olmeca tiene 16,074 habitantes casi la misma cantidad que la ciudad de San Felipe en Mexicali, Baja California. Estas poblaciones, que han abatido sus dunas y construido sobre de ellas, tienen severos problemas de inundación.

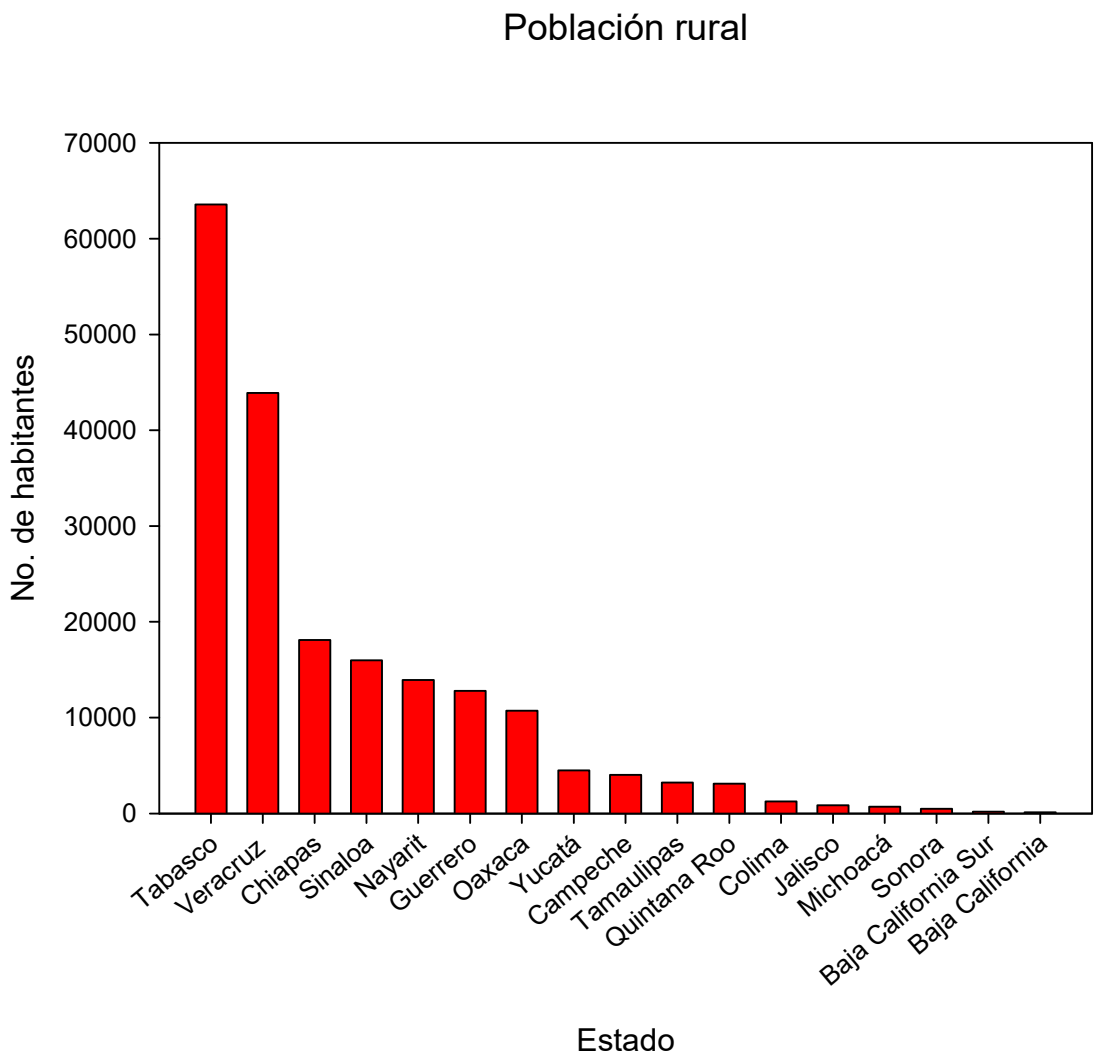

Figura III-9. Población rural (habitantes de localidades menores de 2,500 habitantes) que vive sobre dunas costeras.

Los fraccionamientos mencionados anteriormente en el municipio de Veracruz, y que fueron construidos sobre las dunas (Figura III-10), tienen severos problemas de inundación.

Además, en la temporada de nortes son cubiertos con arena. Por ello, es importante elaborar una estrategia para no crear nuevas zonas de riesgo a inundación por el abatimiento de las dunas (por ejemplo, nuevos desarrollos turísticos en Altata, Sinaloa; Cabo Cortés, Baja California Sur, etc.). Es importante utilizar casos como los del Puerto de Veracruz (Veracruz) y Cancún (Quintana Roo) como ejemplos de lo que no se debe hacer para evitar el aumento del riesgo a inundación en la costa. Por lo tanto, es importante desarrollar una estrategia para la atención de la vulnerabilidad costera basada en dos líneas de trabajo, la primera con énfasis en la conservación de las dunas existentes que aún no han sido alteradas y la segunda en la restauración y reforestación de las dunas, como barreras de protección costera.

Figura III-10. Fotografía de casas habitación en un fraccionamiento de Veracruz después de un norte, donde los vientos mueven la arena, afectando a la población. (Foto: G. Sánchez Vigil).

Usos prevalecientes de las dunas costeras mexicanas

A partir del análisis de las dunas costeras en las imágenes de *Google Earth* se clasificaron los usos de las dunas en cinco clases (Figura III-11). Se consideran dunas costeras aquellas con y sin vegetación como se explicó en el capítulo de geomorfología.

1. Naturales. Condiciones naturales sin ningún disturbio aparente. Cuando hay vegetación, en principio es nativa (por experiencia de los autores, aunque en áreas del trópico húmedo pueden dominar los pastizales ganaderos y entonces se consideran en la clase 3), pero en esta escala no se puede apreciar el grado de calidad de la misma, es decir, no es posible apreciar la proporción de cobertura vegetal de plantas introducidas. En estudios de escala más fina, habrá que seleccionar si las dunas requieren conservarse o restaurarse (reforestarse).
2. Fragmentadas.- Fragmentación moderada causada por la presencia de carreteras, brechas y accesos a la playa. Las dunas fragmentadas son propicias para establecer planes de restauración o reforestación, ya que son las que todavía pueden regresar a ser dunas con vegetación natural. Se requiere de una estrategia de restauración local para definir el uso de las brechas, por ejemplo pueden ser utilizadas como senderos de interpretación ambiental.
3. Uso agropecuario.- Actividades agrícolas y pecuarias (ganadería extensiva), además de la presencia de carreteras, brechas y accesos a la playa.
4. Mixtas.- Presencia de numerosas actividades o infraestructura que modifica la cobertura vegetal como es una combinación de brechas, caminos y carreteras, actividades agropecuarias y asentamientos humanos dispersos. Estas zonas mixtas generalmente ocupan las planicies de dunas frontales que abundan en Chiapas, Nayarit, Oaxaca, Veracruz y Tabasco, donde hay cordones de dunas paralelas cubiertos de parcelas de cultivo y ganadería entremezclados con varios asentamientos pequeños. En algunos casos, forman parte de las zonas suburbanas de las principales ciudades costeras. Es importante considerar la posibilidad de restaurar o reforestar los remanentes de dunas mixtas, porque el paisaje rural costero es un conjunto de usos donde hay parches de dunas restauradas con vegetación recuperada o reforestada y entremezclada entre campos agropecuarios y pequeños poblados.
5. Urbanizadas. Dunas abatidas y modificadas con asentamientos urbanos en más del 75% de la superficie. En esta clase de dunas, es importante conservar lo que queda de dunas y analizar si es necesario restaurar o reforestar los remanentes. En general los remanentes de dunas que quedan entre las construcciones, son las dunas frontales que junto a las playas, son utilizadas para recreación. En estos casos hay que elaborar

estrategias particulares por ciudad, que contemplen planes de restauración y reforestación, pero sobretodo de manejo integrado de la playa para que puedan coincidir actividades de recreación y conservación.

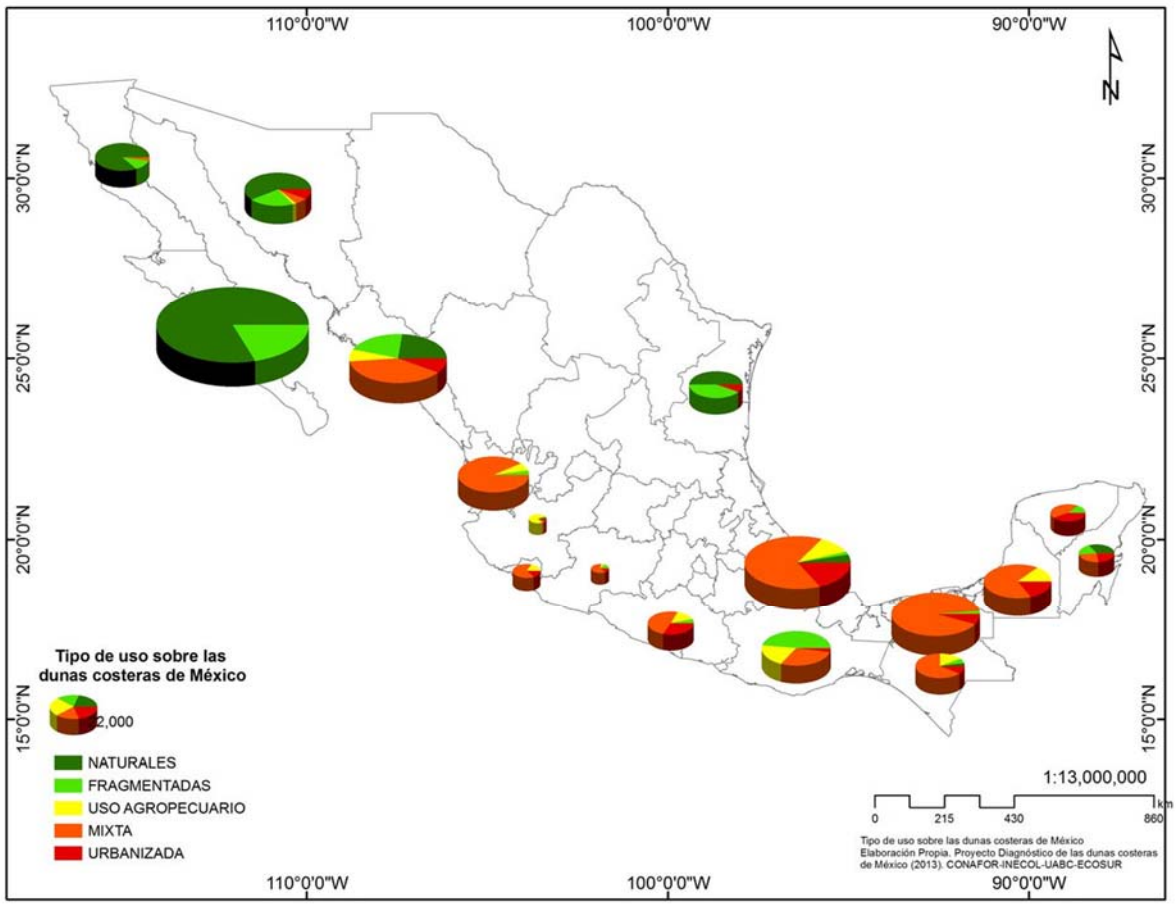

Figura III-11. Tipos de usos de dunas de México en cada uno de los estados. Una descripción de las cinco clases de usos puede verse en el texto.

De acuerdo con la clasificación de usos de las dunas se observó que casi la mitad de las dunas costeras mexicanas (48%) mantienen su estado natural o están fragmentadas por caminos (tonos de verdes de la figura III-12) y en la otra mitad (46%) su vegetación ha sido sustituida por cultivos o pastizales para ganadería o ha sido totalmente abatida para desarrollos urbanos (amarillo, naranja y rojo de la figura III-12). Es importante hacer notar que todavía la tercera parte (34%) de todas las dunas mexicanas mantienen la vegetación natural o son médanos no

fragmentados, ni con agricultura ni urbanizados (verde oscuro de la figura III-12) y otra proporción equivalente es mixta (es decir, tiene todos los usos) donde el uso natural podría mantenerse como tal, para no perder los remanentes de dunas naturales. Asimismo, en estas áreas de uso mixto, como vive gente sobre las dunas, podrían plantearse proyectos de restauración/reforestación. Es en las dunas con uso de suelo mixto que se refleja el paisaje costero tradicional mexicano. En estas zonas, si se conservan los remanentes naturales y se restauran y/o reforestan los fragmentados y de mala calidad, se podrán mantener dichos paisajes de la costa mexicana y se evitará que aumente la vulnerabilidad de la población costera.

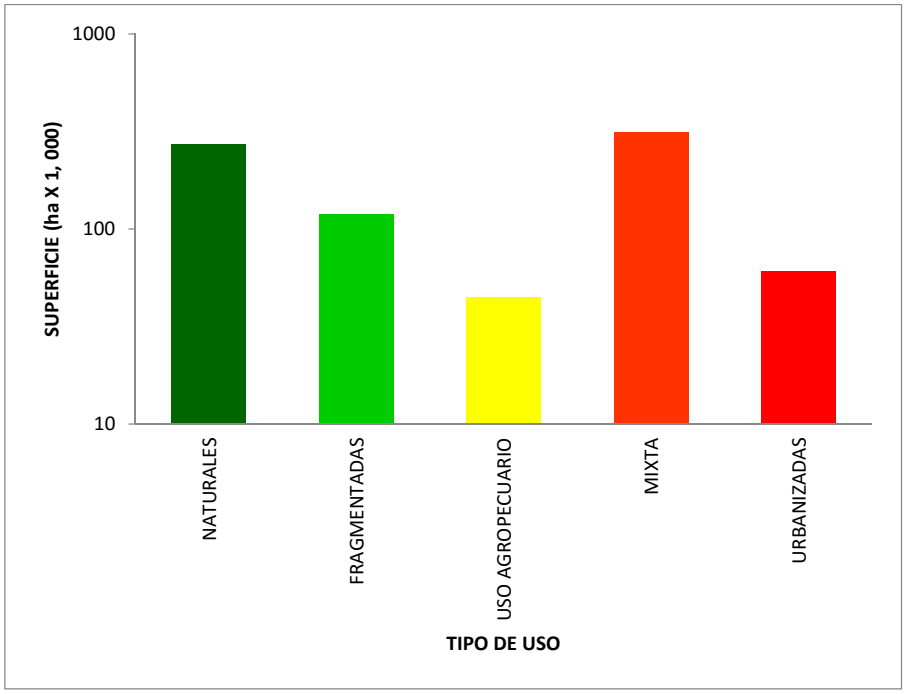

Figura III-12. Tipos de uso en las dunas costeras de México.

Las dunas frontales son las más abundantes del país como se vio en el capítulo II. La mayoría de las dunas frontales estabilizadas del país tienen todos los tipos de usos (ver columna de clase mixta) (Figura III-13). También hay dunas de este tipo que sólo están fragmentadas por múltiples brechas, caminos y carreteras. Aunque Yucatán no es de los estados con más dunas frontales (ocupa el décimo lugar), es un ejemplo para demostrar la fragmentación de las dunas costeras, ya que casi todo el estado (con excepción de las áreas con laguna y manglar) lo

cruza una carretera o un camino costero. Una proporción muy baja de dunas frontales estabilizadas tiene uso agropecuario o está urbanizada; sin embargo las poblaciones que viven sobre estas dunas, son las que más riesgo de inundación tienen por elevamiento del nivel del mar. Por las características propias del sustrato, la mayoría de las dunas frontales semimóviles (las móviles son tan pocas que no se aprecian en la figura III-13) no han sido utilizadas (uso natural) o están fragmentadas. Una proporción muy baja de este tipo de dunas tiene usos mixto o agropecuario.

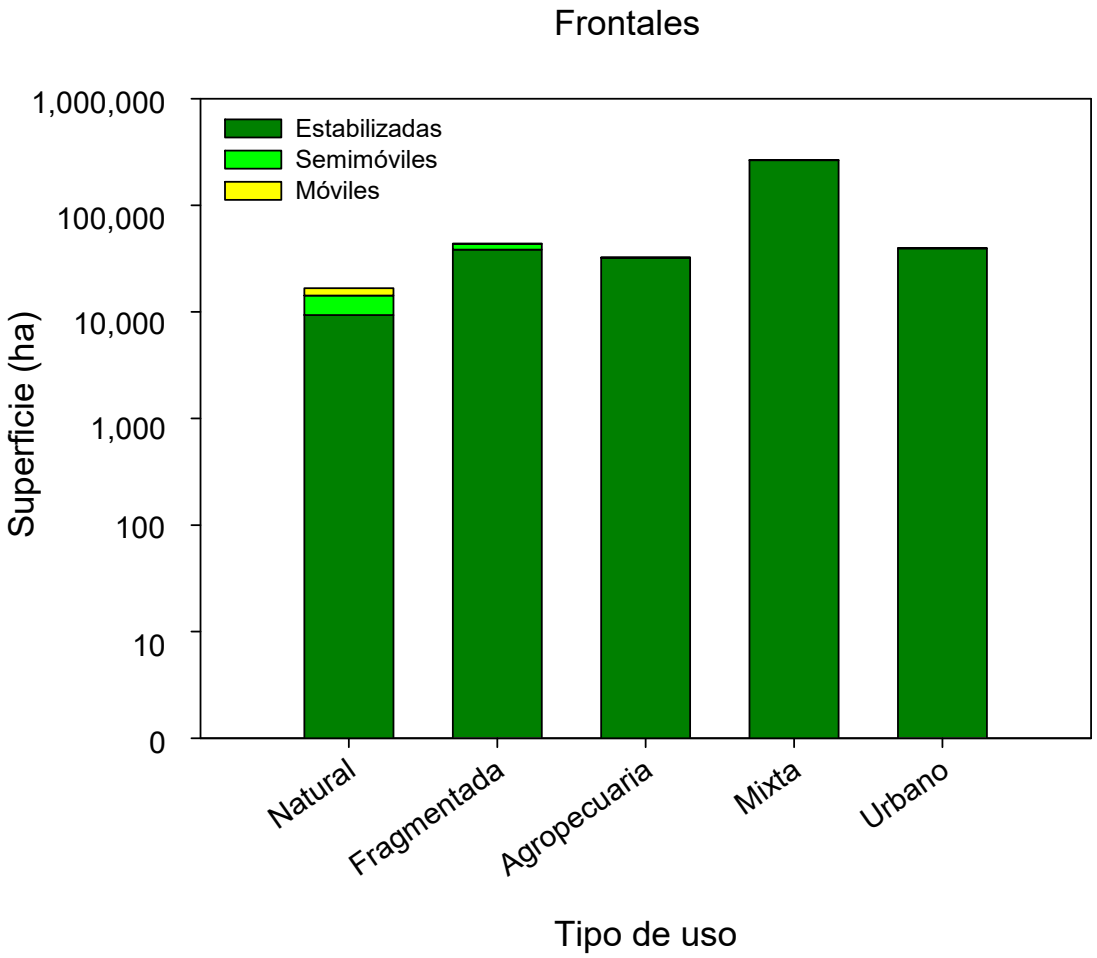

Figura III-13. Tipos de usos de las dunas frontales, según su tipo de movilidad.

Las dunas parabólicas son escasas, con una distribución muy puntual como se vio en el capítulo 2 y es Veracruz el estado con mayor cantidad de dunas parabólicas. Este tipo de

dunas se encuentran en una situación similar a las dunas frontales, la mayoría de las que están estabilizadas, tienen uso mixto; es decir, su vegetación natural ha sido sustituida por usos agropecuario y urbano y están fragmentadas (Figura III-14). Por las características del sustrato, las dunas parabólicas semimóviles y móviles (por su escases no se aprecian en la figura III-14) permanecen con el uso natural o han sido fragmentadas por caminos y brechas, por lo que sería importante concretar la protección de las primeras y, dependiendo del tipo de camino que las fragmenta, se podrían restaurar las dunas parabólicas semimóviles y móviles fragmentadas.

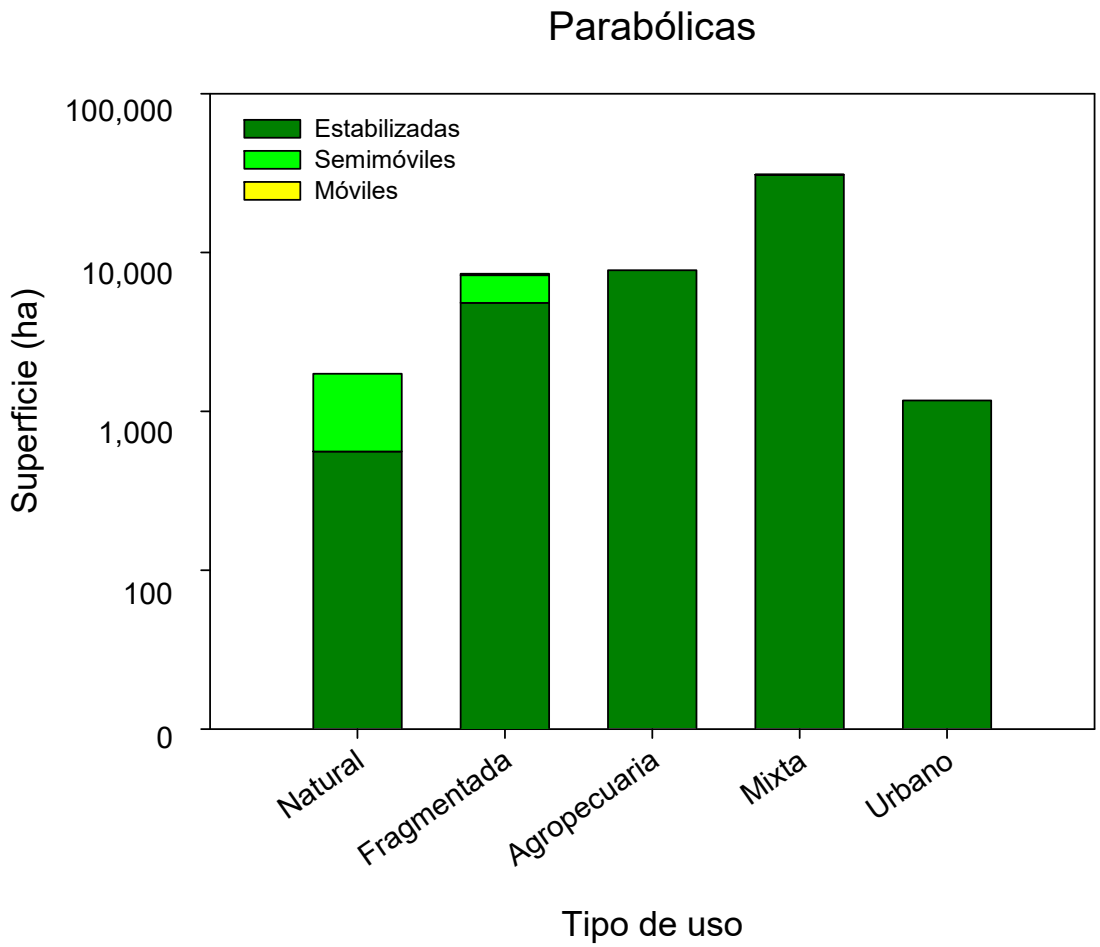

Figura III-14. Estado de conservación de las dunas parabólicas, según su movilidad.

La situación de las dunas transgresivas es diferente de los otros dos tipos de dunas (Figura III-15), su superficie es menor que las frontales pero mayor que las parabólicas, aunque

también tienen una distribución restringida (ver capítulo II). En este caso, la mayor superficie con dunas transgresivas móviles, semimóviles y estabilizadas se encuentran básicamente en Baja California Sur, donde por la aridez y aislamiento se mantienen naturales. Una proporción menor está fragmentada por caminos (muchos son de motos y vehículos de todo terreno) y algunas pocas carreteras que las cruzan. Las dunas transgresivas con todos los grados de estabilización son las que menos han sido sustituidas por campos agropecuarios. Los Huaves de Oaxaca son el único grupo indígena que usa las dunas en un sistema agrícola tradicional, con un manejo extraordinario de las dunas transgresivas (Zizumbo-Villarreal y Colunga-García-Marin, 1982). Asimismo, una proporción menor de este tipo de dunas estabilizadas han sido urbanizadas básicamente extrayendo la arena y aplanando el terreno. De la figura III-15 se desprende la necesidad de enfatizar la restauración y/o reforestación de las pocas pero importantes dunas frontales con uso agropecuario y urbano y fragmentadas (clase mixta) del país.

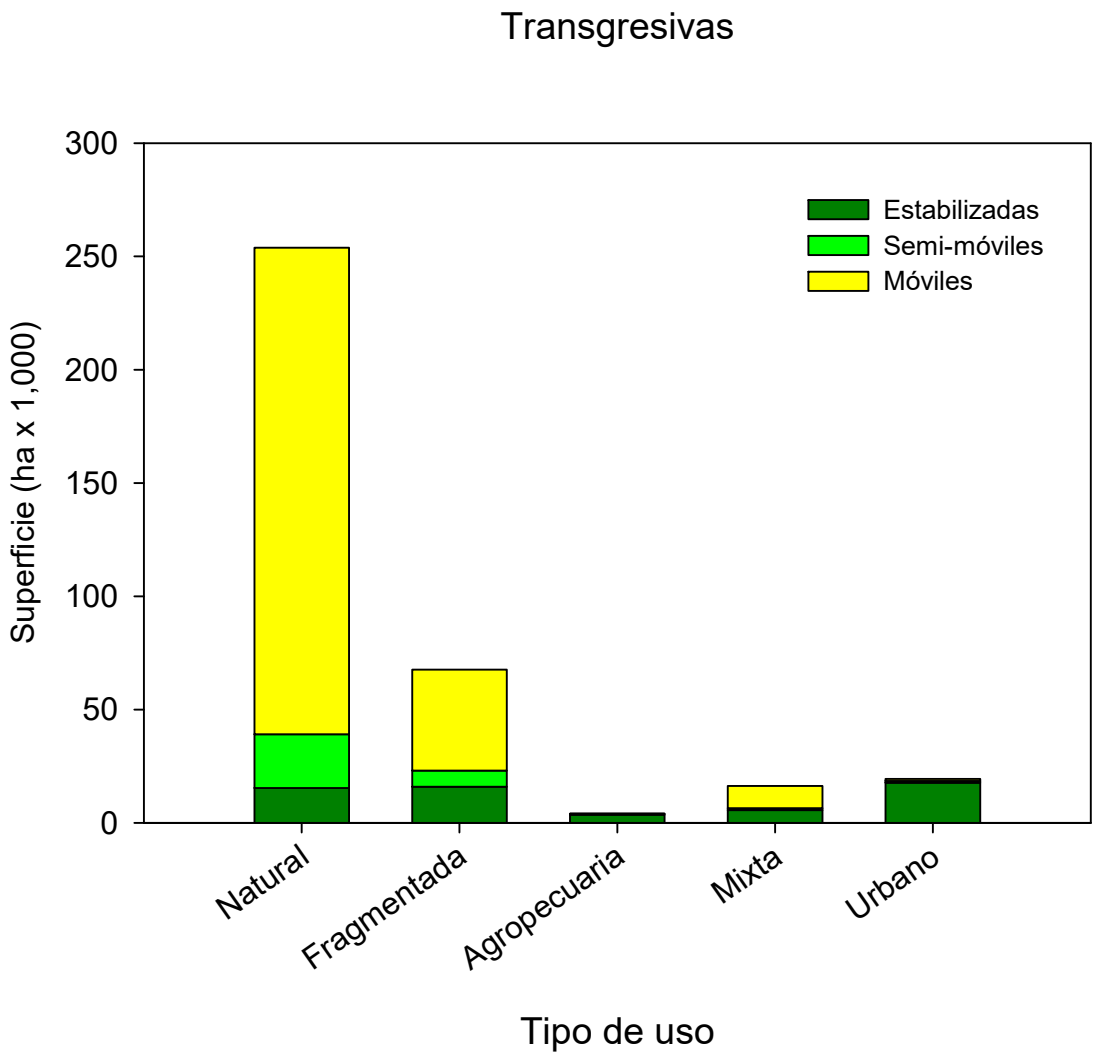

Figura III-15. Estado de conservación de las dunas transgresivas, según su movilidad.

Para definir una estrategia de restauración y/o de reforestación a nivel nacional, es importante considerar el uso actual y la calidad de las dunas costeras del país. Asimismo, es importante relacionar esta información con la población actual y las tendencias de crecimiento de las ciudades.

En primer lugar es necesario considerar la distribución actual de los tipos de usos de dunas del país (que se muestra en el mapa de la figura III-11 de este capítulo) donde se muestran áreas de dunas donde prevalece el uso natural y por ende es urgente promover la conservación de las dunas que aún quedan. Asimismo, hay una proporción importante de todos los tipos

de dunas y grados de estabilización que están fragmentadas. Si son carreteras y caminos de acceso, poco se puede hacer, pero si con brechas causadas por vehículos recreativos, valdría la pena hacer planes de manejo locales que los concentren en pistas particulares y se restauren/reforesten las dunas que esta actividad fragmentó.

En segundo lugar se observa que la mayor parte de las dunas del país tiene un uso mixto, es decir, hay agricultura, ganadería, numerosos poblados pequeños y miles de kilómetros de brechas, caminos y carreteras que las atraviesan. En las dunas con uso mixto, se pueden mantener los usos recreativos activos y pasivos que fueron mencionados al principio del capítulo, como el *sandsurf*, las motos, las caminatas, la contemplación, si éstos son repartidos con equidad y bajo un estricto plan de manejo en el cual se busque minimizar los conflictos, restaurar los daños y beneficiar a la población local mediante compensaciones, ya que se debe tener en mente que el deterioro de las dunas incrementa su vulnerabilidad. Estas dunas con uso mixto, como se dijo anteriormente, son las que representan el paisaje costero nacional, que es especialmente diverso.

En resumen, la mayor parte de las dunas del país son frontales y transgresivas. Las frontales están más uniformemente repartidas ya que todos los estados costeros tienen dunas frontales. La mayoría de estas dunas están fragmentadas, por lo que se sugiere que sean la prioridad nacional de restauración y/o de reforestación, según las necesidades particulares de cada localidad. Las dunas frontales además ofrecen el servicio ambiental más importante ante escenarios de cambio climático con elevación del nivel del mar, que es el de la protección de los pobladores y de la infraestructura costera, que es su patrimonio económico. Asimismo, la diversidad de especies de plantas de playas en las dunas frontales no es tan grande como la de dunas tierra adentro, que incluye decenas de herbáceas y en algunas regiones de arbustos. No se conocen los requisitos de germinación, establecimiento y sobrevivencia de la mayoría de las especies pero se debe promover su investigación en un corto plazo ya que son hierbas y arbustos de rápido crecimiento. Con esto se resaltaría el uso de investigación y educación que se sugiere en el capítulo como un uso prioritario.

Las dunas transgresivas están menos uniformemente repartidas en las costas de México, de hecho son sólo siete estados en que tienen el problema de estar cubiertas por agricultura y ganadería. El estado que tiene más dunas de este tipo es Baja California Sur, donde no son

dunas estabilizadas (como es el caso de Guerrero Negro) y por lo tanto no han sido, ni podrán ser cultivadas.

Las dunas parabólicas son casi exclusivas de Veracruz y es urgente proteger las que todavía están en estado natural. La presión poblacional sobre las dunas de este estado es la más alta del país, por lo que es importante fijar prioridades de conservación y restauración/reforestación en este estado, que además es el que cuenta con mayor información sobre la flora y ecología de sus dunas costeras.

Causa preocupación el uso minero que se propone en dunas transgresivas y parabólicas, porque son las que poseen mayores volúmenes de arena. A la fecha, el uso minero no se detecta directamente en el análisis realizado, pero en el futuro existe la posibilidad de que aparezca, en la escala utilizada, como un nuevo uso. Por ahora, las dunas fragmentadas, en algunos sitios indican que hay caminos y brechas para el acceso a la arena (por ejemplo, en Socorro, Baja California). Sin embargo, no es una constante en la costa nacional, ya que los proyectos mineros todavía son muy puntuales y heterogéneos a nivel de país. Cuando el uso minero prevalezca, los proyectos de restauración/reforestación serán prioritarios, por lo que es importante apoyar las investigaciones sobre necesidades de germinación y establecimiento de especies de dunas costeras en todo el país.

México es un país considerado megadiverso por el gran número de especies de plantas y animales que lo habitan, así como por el alto número de ecosistemas que alberga (www.conabio.gob.mx). En este capítulo puede apreciarse también la riqueza geomorfológica del ecosistema de dunas costeras, y cómo su distribución a lo largo de costas con distinto clima, dirección e intensidad de los vientos, historia geológica y aporte de sedimentos, ha creado y mantenido distintos tipos de sistemas que han beneficiado a los pobladores locales. Sin embargo, en este momento, ante la vulnerabilidad a los efectos del cambio climático, se requiere revalorar la función protectora de las dunas y garantizar su conservación.

Referencias bibliográficas

Álvarez-Molina, L.L., M.L. Martínez, O. Pérez-Maqueo, J.B. Gallego-Fernández y P. Flores. 2012. Richness, diversity and rate of primary succession over 20 yr in tropical coastal dunes. *Plant Ecology,* 213: 1597-1608.

Amador, E. y P. Moreno-Casasola. 2006. Turismo alternativo en los municipios costeros: en búsqueda de un desarrollo sustentable. En P. Moreno-Casasola, E. Peresbarbosa y A.C. Travieso-Bello (Eds), Estrategias para el manejo integral de la zona costera: un enfoque municipal (Vol. III: 971-988). Xalapa, Ver.: Instituto de Ecología A.C. - Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SEMARNAT)-Gobierno del Estado de Veracruz.

Brown, A.C. y A. Maclachlan. 2002. Sandy shore ecosystems and the threats facing them: some predictions for the year 2025. *Environmental Conservation,* 29: 62-77.

Butler, R. (1980). The concept of a tourist area cycle of evolution: Implications for management of resources. *Canadian Geographer,* 24: 5-12.

Carter, R.W.G. 1991. Coastal environments. Gran Bretaña: Academic Press.

Cervantes, O., I. Espejel, E. Arrellano y S. Delhumeau. 2008. Users' perception as a tool to improve beach planning and management. *Environmental Management*, 42: 249-264.

Cowles, H.C. 1898. The ecological relations of the vegetation on the sand dunes of Lake Michigan. *Botanical Gazette,* 27: 97- 117.

Daily, G.C. 1997. Introduction: What are ecosystem services? En G.C. Daily (Ed.), Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems (pp 1-10). Washington, D.C.: Island Press.

Daily, G.C., S. Alexander, P.R. Ehrilich, R. Goulder, J. Lubchenco, P.A. Matson, H.A. Mooney, S. Postel, S.H. Schneider, D. Tilman, y G. Woodwell. 1997. Ecosystem services: benefits supplied to human societies by natural ecosystems. En Issues in ecology 2. Ecologial Society of America.

de la Vega, T. 2011. Propuesta de interpretación ambiental para el ecosistema de dunas costeras: el caso de Punta Banda, Ensenada. Tesis de Maestría en Manejo de Ecosistema de Zonas Áridas. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México.

Espejel, I. 1984. La vegetación de las dunas costeras de la península de Yucatán I. Análisis florístico del estado de Yucatán. *Biótica*, 9: 183-210.

Espejel, I. 1986. La vegetación de las dunas costeras de la península de Yucatán II. Sian Ka'an. *Biótica,* 11: 7-24.

Espejel, I., A. Espinoza-Tenorio, O. Cervantes, I. Popoca, A. Mejía y S. Delhumeau. 2007. Proposal for an integrated risk index for the planning of recreational beaches: use at seven mexican arid sites. *Journal of Coastal Research*. Special Issue 50. Proceedings. International Coastal Symposium. Queensland Australia. SI 50: 47-51.

González-Marín, R.M., P. Moreno-Casasola, R. Orellana y A. Castillo. 2012. Palm use and social values in rural communities on the coastal plains of Veracruz, Mexico**.** *Environment, Development and Sustainability,* 14: 541-555.

Maun, M.A. 1994. Adaptations enhancing survival and establishment of seedlings on coastal dune systems. *Vegetatio*, 11: 59-70.

MEA (Millennium Ecosystem Assessment). 2005. Ecosystems and human well-being: Biodiversity synthesis. Washington, DC: World Resources Institute

Moreno-Casasola, P. 2010. Veracruz: mar de arena. , Xalapa, Ver.: Comisión del Estado de Veracruz para la Conmemoración de la Independencia Nacional y de la Revolución Mexicana. Gobierno del estado de Veracruz.

Moreno-Casasola, P., M.L. Martínez y G. Castillo-Campos. 2008. Designing ecosystems in degrades tropical sand dunes. *Ecoscience,* 15: 44-52.

Moreno-Casasola, P., M.L. Martínez, G. Castillo-Campos y A. Campos. 2013. The impacts on natural vegetation following the establishment of exotic *Casuarina* plantations. En M.L. Martínez, J.B. Gallego-Fernández y P.A. Hesp (Eds.), Coastal dune restoration (Capítulo 14: 217-233). Berlin: Springer Verlag.

Nordstrom, K.F. 2008. Beach and dune restoration. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.

OMT (Organización Mundial de Turismo). 2012. Panorama OMT del turismo internacional. OMT.

Propin-Frejomil E. y A. Sánchez-Crispín. 2007. Tipología de los destinos turísticos preferenciales en México*. Cuadernos de Turismo,* 19: 147-166.

Rodríguez-Revelo, N., G. Rendón-Márquez, I. Espejel, O. Jiménez-Orocio y M.L. Martínez. 2014. Análisis de proveniencia de las arenas del complejo de dunas parabólicas El

Socorro, Baja California, México, mediante una caracterización mineralógica y granulométrica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana,* 66:355-363.

Secretaría de Turismo 2000. Estudio de gran visión del turismo en México: Perspectiva 2020. México D.F., 174 pp.

Secretaría de Turismo, 2013. www.sectur.gob.mx

Seingier, G., I. Espejel y J.L. Fermán. 2009. Cobertura vegetal y marginación en la costa mexicana. *Investigación Ambiental,* 1: 54-69.

Silva-Casarín, R., G. Ruiz-Martínez, I. Mariño-Tapia, G. Posada-Vanegas, E. Mendoza-Baldwin, y E. Escalante-Mancera. 2012. Manmade vulnerability of the Cancun beach system: The case of hurricane Wilma. *CLEAN Soil, Air, Water*, 40: 911–919.

Torres, W., M. Méndez, A. Dorantes, y R. Durán. 2010. Estructura, composición y diversidad del matorral de duna costera en el litoral yucateco. *Boletín de la Sociedad Botánica de México,* 86: 37-51.

Travieso-Bello, A.C., R. Gómez, P. Moreno-Casasola. 2006. Los cultivos, los pastizales y los acahuales. En P. Moreno-Casasola (Ed.), Entornos Veracruzanos: la costa de La Mancha (pp 261-272). Xalapa, Ver.: Instituto de Ecología A.C.

UNCED (United Nations Conference on Environment and Development). 1992. Protection of oceans, all kinds of seas, including enclosed and semi-enclosed seas, and coastal areas and the protection, rational use and development of their living resources (Capítulo 17: 139-155). Agenda 21, United Nations Conference on Environment and Development.

van der Maarel, E. 1993. Dry coastal ecosystems: polar regions and Europe. Países Bajos: Elsevier Science Publishers.

Wojtarowski-Leal, A. 2011. Concepción y relación de la población adulta de Barra de Chachalacas, Veracruz, con su entorno natural: una aproximación etno-ecológica. Tesis de Maestría. Colegio de Veracruz. Xalapa, Ver., México.

Zizumbo-Villarreal, D. y P. Colunga-García Marín. 1982. Los Huaves: apropiación de los recursos naturales. México D.F.: Universidad Autónoma de Chapingo.

Zuleta, M.C. 2004. Hacienda pública y exportación henequenera en Yucatán 1880-1910. México D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.

Capítulo IV: Análisis del papel de las áreas naturales protegidas en la conservación de las dunas costeras de México

Jiménez-Orocio, O., I. Espejel, P. Moreno-Casasola y N. Rodríguez-Revelo. 2014. Necesidades de conservación. En M.L. Martínez, P. Moreno-Casasola, I. Espejel, O. Jiménez-Orocio, D. Infante-Mata y N. Rodríguez-Revelo (Eds.), Diagnóstico general de las Dunas Costeras de México (pp. 95-103) México, D.F.: Comisión Nacional Forestal. ISBN 978-607-8383-17-7.

Definición de conservación

La conservación de la naturaleza es un concepto que comienza a ser reconocido mundialmente cuando el sector ambiental emerge como tal y es a partir del Informe Brundtland en 1987 cuando esta visión se vuelve determinante. Antes de esta fecha clave, el cuidado de la naturaleza estaba implícito en los sectores forestal y pesquero. Estos sectores se guiaban por intereses económicos, por lo que dejaban de lado el cuidado de las especies sin valor directo en el mercado. Solo recientemente, en las últimas tres décadas, se han incorporado conceptos como biodiversidad y geo-conservación en la agenda política mundial a la cual México se ha sumado desde el inicio.

La conservación de la naturaleza tiene dos acepciones; a) la conservación de las especies como poblaciones que están en peligro de desaparecer por el decreciente número de individuos y su limitada distribución y b) la conservación de ecosistemas cuya composición, estructura o función tiene un grado de alteración incluyendo la disminución de su cobertura original.

Las medidas de conservación que se han diseñado en el país responden a estas dos visiones. Para conservar especies cuyas poblaciones están amenazadas con desaparecer se diseñó la NOM-059-SEMARNAT-2010, en la cual se pueden encontrar los listados de especies de flora y fauna mexicana sujetas a protección especial, amenazadas, en peligro de extinción y probablemente extintas en el medio silvestre (http://www.biodiversidad.gob.mx/especies/catRiesMexico.html). Las medidas para

conservar una especie útil son vedas, número y tamaño mínimo de extracción y prácticas de cultivo entre otras, que imponen los sectores agropecuario, forestal y pesquero.

Para conservar ecosistemas se creó el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP), con diferentes tipos que se diferencian en el tamaño y grado de conservación. Las más pequeñas no permiten que haya ningún uso que no sea el ecoturismo y la investigación, ni personas viviendo en ellas (por ejemplo Santuarios y Parques) mientras que las más grandes tienen ciudades dentro y usos agropecuarios y turísticos (por ejemplo las Áreas de Protección de Flora y Fauna y Reservas de la Biosfera). Para 2012 el país contaba con 176 Áreas Naturales Protegidas (ANP) clasificadas actualmente en: Reservas de la Biosfera (41), Parques Nacionales (67), Áreas de Protección de Flora y Fauna (37), Monumento Natural (5), Santuario (18) y Áreas de Protección de Recursos Naturales (8), con una superficie total que cubre 25,387,972 ha (http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos). También hay otras medidas de conservación de ecosistemas en los cuales se incorpora el desarrollo de actividades económicas intentando el diseño de un gradiente de usos donde el no uso corresponde a la conservación de ecosistemas clave embebidos en una matriz agrícola, forestal o urbana. Algunos de ellos son los instrumentos de política ambiental de planeación y los planes de desarrollo urbano de los centros de población donde los municipios son los ejecutantes, por lo que pueden modificarse cada tres años. El instrumento nacional denominado Ordenamiento Ecológico del Territorio (OET) es normativo y puede ser regional, local o marino (http://www.semarnat.gob.mx/temas/ordenamientoecologico/Paginas/OrdGenTerr.aspx).

Además del Ordenamiento a nivel nacional, todo México cuenta con ordenamientos marinos (decretados – Golfo de California y Golfo de México – y por decretar –Pacífico norte y Pacífico sur–), donde la costa se considera zona de influencia. Asimismo hay ordenamientos locales o regionales en los estados y municipios costeros, especialmente en corredores donde prevalece el uso turístico (Riviera Maya, Riviera Mexicana, Los Cabos-San José, Tijuana-Ensenada, San Felipe-Puertecitos, entre muchos otros).

Otros instrumentos reconocidos y que son esquemas de protección novedosos son los sitios Ramsar, que enfatizan el desarrollo sustentable de los humedales y su fauna, especialmente las aves (http://ramsar.conanp.gob.mx/lsr.php). Algunos de los sitios denominados como

Ramsar, combinan especies y ecosistemas como las playas designadas para la protección de las arribazones y anidación de tortugas. Los sitios Ramsar tienen una connotación internacional y su objetivo es la conservación de las aves migratorias pero también el hábitat donde obtienen alimento y se reproducen. Estos sitios se destinan a conservación, muchos establecen medidas de manejo especiales cuando arriban las tortugas y también conservan al ecosistema de playas-dunas costeras, por lo menos de las dunas frontales. Otro instrumento que se implementó en los últimos años fue la certificación de playas limpias, donde se incorporan los primeros cordones de dunas con vegetación de buena calidad para obtener la certificación. Las certificaciones son para playas recreativas y también para aquellas con prioridades de conservación (http://www.semarnat.gob.mx/playas/Paginas/inicio.aspx). El problema con este esquema es que es costoso y, por ejemplo, la primera playa certificada para conservación se encuentra en Veracruz y no se ha renovado. Baja California recientemente certificó una playa cerca de la ciudad de Ensenada con la condicionante de restaurar la vegetación, eliminando las especies introducidas y recuperando la vegetación nativa que la caracteriza. La renovación de la certificación y la instrumentación de esquemas de restauración donde hay que remover la vegetación introducida, son acciones costosas, por lo que estos esquemas son alternativas interesantes pero deben venir acompañadas de un presupuesto adicional, con el que no cuenta la mayoría de los municipios costeros del país.

En conclusión, las ANP son hasta la fecha el instrumento oficial más eficiente, destinado a la conservación de la naturaleza, por lo que en este capítulo se hará referencia a ellas, así como a los sitios Ramsar, que las conservan indirectamente.

Conservación de playas y dunas costeras en México

En la costa mexicana a nivel federal hay 41 Reservas de la Biosfera, 67 Parques Nacionales, 37 Áreas de Protección de Flora y Fauna, 5 Monumentos Naturales, 18 Santuarios, y 8 Áreas de Protección de Recursos Naturales. Asimismo hay 275 ANP estatales, 138 sitios Ramsar y un número considerable de playas para anidación de tortugas, básicamente en Oaxaca, Michoacán, Tamaulipas y Baja California Sur. Cabe mencionar que algunas áreas tienen doble denominación. Como ninguna de las ANP existentes fue diseñada expresamente para

la conservación de las dunas costeras, no todas tienen dunas. Estos ecosistemas quedan dentro de ellas como un componente adicional a otros ecosistemas o especies objetivo.

En total, un poco más de la mitad de las playas y dunas del país está dentro de alguna ANP (344,677 ha que significan el 57%). Se contabilizaron 344,677 ha de playas y dunas (Cuadro IV-1) protegidas en ANP federales, es decir, un poco menos que la mitad (43%) de las playas y dunas del país. Asimismo, se encontraron 14,724 ha de playas y dunas en ANP estatales (2% de las 808,711 ha de playas y dunas de México).

Se encontraron proporciones muy desiguales entre la superficie de dunas que cada estado del país protege y la superficie que no protegen (Figura IV-1). Destaca la distribución desigual de la superficie costera protegida por el sistema de ANP federal. Por ejemplo, Campeche y Tamaulipas son los estados que más protegen superficie de playas y dunas, seguidos por los dos estados de la Península de Baja California. Esto se explica porque estos estados tienen una gran superficie costera declarada como ANP y las Reservas de la Biosfera más grandes del país se encuentran en ambas penínsulas mexicanas. Contrasta Colima que no tiene ninguna ANP costera federal que proteja sus casi siete mil hectáreas de playas y dunas. Es interesante notar que Veracruz es el estado, después de Baja California Sur, que más superficie de playas y dunas tienen, pero es también el estado con menos ANP federales que las protejan (1.4%). Estados que protegen más o menos la mitad de su superficie de playas y dunas son Quintana Roo (63%), Yucatán (48%) y Chiapas (42%).

Cuadro IV-1. Superficie de dunas en Áreas Naturales Protegidas federales (CONANP) de la costa mexicana.

ANP	Hectáreas de dunas
Alto Golfo de California y Delta del Rio Colorado	5,881
Bahía de Loreto	105
Cabo San Lucas	53
Chamela-Cuixmala	60
El Vizcaíno	173,476

Huatulco	26
Isla Contoy	207
Islas del Golfo de California	19,305
La Encrucijada	9,957
Laguna de Términos	38,595
Laguna Madre y Delta del Río Bravo	24,221
Lagunas de Chacahua	1,328
Los Tuxtla	1,503
Manglares de Nichupté	220
Marismas Nacionales Nayarit	16,058
Meseta de Cacaxtla	228
Pantanos de Centla	17,402
Playa Ceuta	98
Playa de Escobilla	30
Playa de La Bahía de Chacahua	17
Playa de Maruata y Colola	18
Playa de Mismaloya	143
Playa de Puerto Arista	38
Playa de Rancho Nuevo	32
Playa de Tierra Colorada	17
Playa El Tecuan	15
Playa El Verde Camacho	64
Playa Mexiquillo	26
Playa Piedra de Tlacoyunque	27
Playa Teopa	5
Ría Celestun	2,720
Ría Lagartos	3,204
Sian Ka´an	3,077
Valle de Los Cirios	23,229

Yum Balam	3,290
Total	344,677
Total general	808,711

En la figura IV-1 se muestra la distribución de las ANP que tienen dunas costeras. A pesar de los esfuerzos de conservación, Rodríguez-Cardozo et al. (en revisión) encuentra que, según los datos de INEGI (2010), aunque la mitad de los municipios costeros tienen una ANP o una porción de alguna, no está protegido el 22% del territorio municipal costero. Estos autores también encontraron que el 7% de las localidades de los municipios costeros está dentro de ANP y calculan que, al igual que en las ANP terrestres, en 2010 vivían dentro de ellas el 2% de la población municipal.

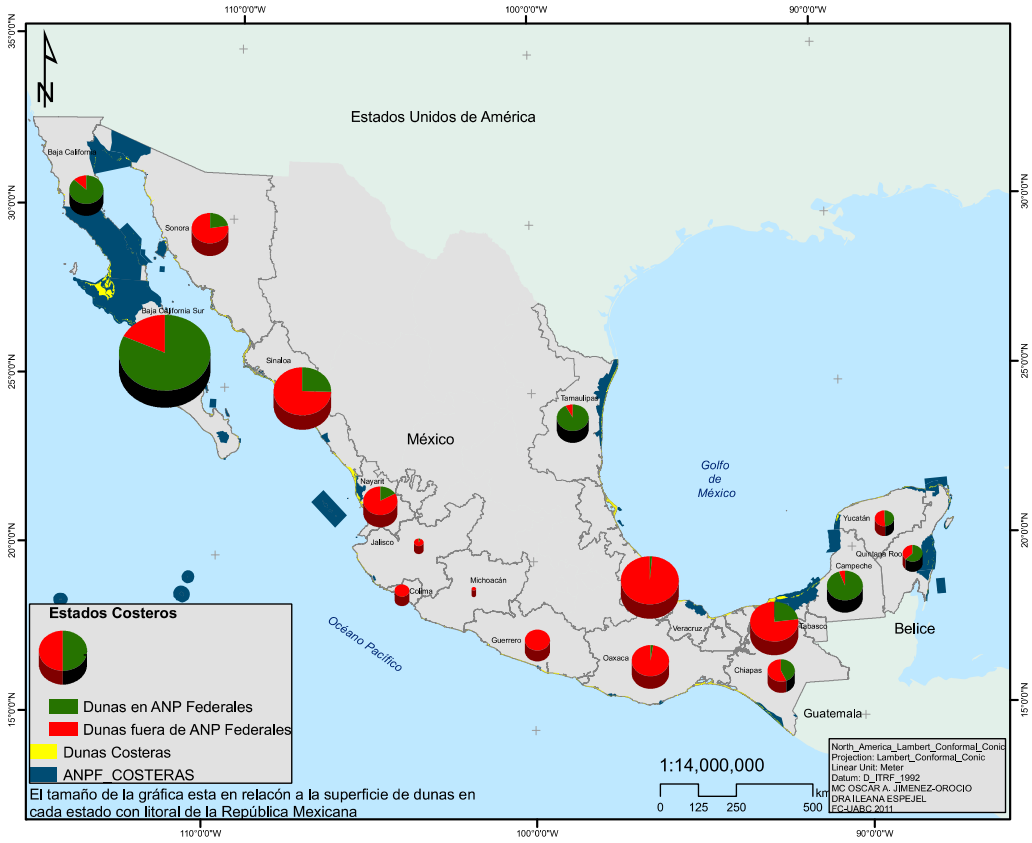

Figura IV-1. Distribución de ANP federales y estatales en proporción de la superficie de playas y dunas costeras de cada estado.

Es preocupante notar que los estados donde hay más actividades portuarias y turísticas, son también los estados donde menos protegidas están las dunas costeras (Guerrero, Veracruz, Michoacán, Oaxaca, Jalisco y Nayarit), con la excepción de Quintana Roo. Algunos de ellos como son Veracruz y Nayarit son muy vulnerables a desastres naturales debidos al cambio climático y la elevación del nivel del mar, sin embargo en estos estados no se está protegiendo uno de los ecosistemas que mayor protección brinda a las costas. Sorprenden estados como Oaxaca, con casi 45,000 hectáreas de playas y dunas, que sólo protege el 2.5% de ellas dentro de un ANP; mientras que Sonora, con una cantidad similar (42,254 ha) de playas y dunas, protege casi la cuarta parte de su superficie (22.5%).

Cabe mencionar que las ANP estatales sólo cubren el 2% de las dunas del país (Cuadro IV-2), y no existe ningún área protegida municipal que conserve las playas y dunas. En cambio, recientemente se ha definido una superficie mínima de playas y dunas que están destinadas a la conservación y que han sido denominadas ANP voluntarias. Algunas organizaciones de la sociedad civil están promoviendo este tipo de zonas conservadas de manera relativamente exitosa como en Baja California, Baja California Sur y Sonora.

Cuadro IV-2. Playas y dunas dentro de Áreas Naturales Protegidas (ANP) estatales

ANP estatal	Hectáreas de dunas
Ciénega del Fuerte	119
El Cabildo Amatal	672
El Gancho Murillo	1,176
Estero El Soldado	2
Estero San José del Cabo	19
La Encrucijada	10,031
Los Petenes	497
Médano del Perro	5
Navachiste	1,030
Refugio Estatal de Flora y Fauna Laguna Colombia	105
Refugio Estatal de Flora y Fauna Sistema Lagunar Chacmochuch	21
Reserva de Dzilam	102
Reserva El Palmar	946
Total general	14,725

En la figura IV-2 se muestra el complemento a las ANP, que son los sitios Ramsar, ubicados en zonas de dunas costeras. Muchos se sobrelapan con las ANP, especialmente en ambas

penínsulas (Baja California y Yucatán), pero cubren los vacíos encontrados en el Pacífico y en el golfo de México.

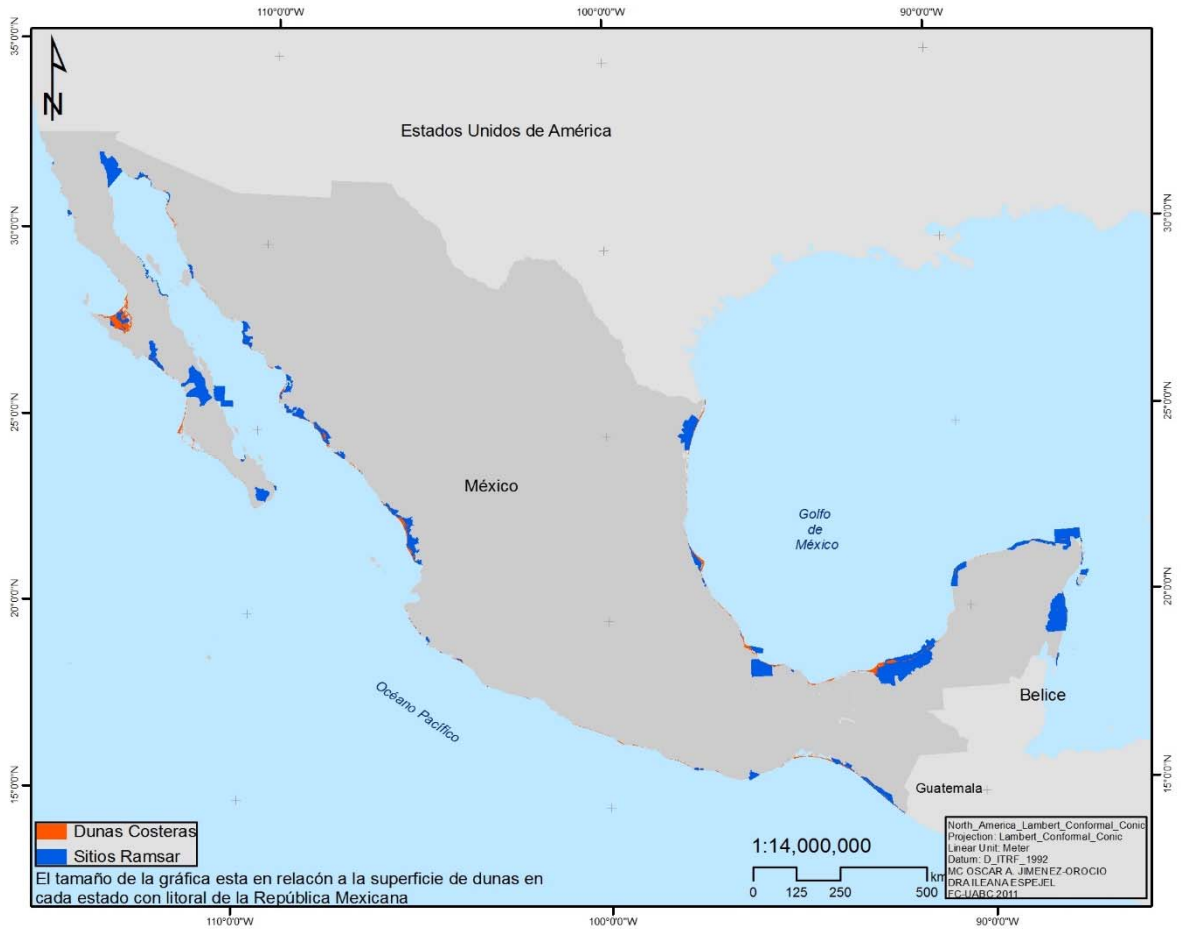

Figura IV-2. Sitios Ramsar de México donde hay presencia de dunas costeras

Necesidades de conservación

A partir del análisis de las ANP que incluyen dunas costeras es posible visualizar las necesidades actuales que se tienen de conservación. Por un lado es importante diferenciar lo que se puede hacer en el 57% de las playas y dunas ya protegidas dentro de ANP y por otro, en el 43% de playas y dunas fuera de ANP. A continuación se dan algunos ejemplos.

- En cada una de las regiones se deben identificar los ecosistemas de dunas costeras con características únicas y buscar las alternativas de conservación adecuadas con el fin de mantener estos centros únicos de concentración de especies y sus características paisajísticas o geomorfológicas.
- Los resultados del análisis de las dunas costeras de este capítulo, indican que es urgente crear una estrategia para proteger las playas y dunas de los seis estados con menor superficie de playas y dunas protegidas. Se debe poner atención especial al estado de Veracruz, cuya riqueza florística ha sido documentada (Moreno-Casasola et al., 1998, 2011; Espejel et al., 2013) y cuyas costas se han reconocido como vulnerables (Martínez et al*.,* 2006 y Oropeza-Orozco, et al., 2011).
- Sólo en el norte y centro de Veracruz está bien representada en las ANP la flora de pastizales y selvas sobre dunas estabilizadas (desde Tamiahua hasta Alvarado), pero solamente un remanente de selva y una zona de pastizales están protegidos en la reserva privada de La Mancha (CICOLMA). Hasta la fecha las dunas móviles no están protegidas, aunque se están haciendo esfuerzos para lograr su protección.
- En el Pacífico norte la flora de dunas costeras está bien representada en el ANP del Valle de los Cirios en Baja California. Sin embargo la zona mediterránea, como es la duna conocida como El Socorro, donde además ya empezó una explotación minera, no tiene ningún tipo de protección, y su vegetación no está representada en otras regiones. También la flora del Golfo de California con El Vizcaíno en Baja California Sur está bien representada en las ANP, pero no las zonas de mayor endemismo, como es Cabo Pulmo, donde también existe la amenaza de una nueva ciudad turística cuyo desarrollo está proyectado exactamente sobre las dunas y playas.
- En el Pacífico sur, sólo en Huatulco se conserva una pequeña muestra de la flora de Oaxaca. Aunque hay muchas playas tortugueras, éstas protegen las playas pero no necesariamente las dunas costeras más allá del primer cordón de dunas.
- En el Caribe, la flora de dunas está protegida en Campeche, en la barras arenosas que cubre el ANP de Laguna de Términos (aunque esta barra esté urbanizada, no deja de ser parte del ANP). En Yucatán, las ANP como Celestún y Ría Lagartos protegen vegetación de dunas. Pero el núcleo de biodiversidad de las dunas yucatecas es San Benito y no está protegido; de hecho está a la venta para desarrollos urbanos. En

> Quintana Roo, Sian Ka´an podría ser un buen representante de la flora de dunas caribeñas, pero gran parte de su franja de dunas costeras aparece en los ordenamientos territoriales de la zona como superficie para desarrollos turísticos y de hecho ya hay muchas construcciones que no siempre respetaron la flora de las dunas.

Se utilizó el análisis aplicado para estimar los usos a que están sujetas las dunas, cuyos resultados pueden verse en el capítulo anterior. Se conformaron cinco clases de uso. La primera clase, denominada "natural", es aquella con muy buena calidad, ya que las condiciones naturales se encuentran sin ningún disturbio aparente. El segundo tipo es "fragmentada", y tiene buena calidad pero también la presencia de carreteras, brechas y accesos a la playa. La tercera clase se denomina "uso agropecuario" y se consideró de calidad regular, ya que hay actividades agrícolas y ganadería extensiva, además de la presencia de carreteras, brechas y accesos a la playa. La cuarta clase consiste en las dunas a las que se les llamó "mixtas" o de mala calidad, por la presencia de numerosas actividades o infraestructura que modifica la cobertura vegetal, como es una combinación de brechas, caminos y carreteras, actividades agropecuarias y asentamientos humanos dispersos. Finalmente, las de muy mala calidad se denominaron "urbanizadas" y corresponden a las zonas donde hay dunas abatidas y modificadas con asentamientos urbanos en más del 75% de su superficie. En la figura IV-3 se muestra que dentro de las ANP el 74% de las dunas costeras no muestran daños propios del desarrollo de actividades humanas ya que el 58% presenta muy buena calidad y el 16% presentan deterioro por fragmentación debido a la presencia de brechas, caminos y carreteras (buena calidad). Por el contrario, fuera de las ANP, solo el 30% de las dunas costeras tiene estas calidades (sin intervención 16% y fragmentadas 14%).

Las ANP ofrecen mayor seguridad para llevar a cabo experimentos de campo que permiten conocer su funcionamiento, la ecología de sus especies, la fauna que las habita y los servicios ambientales que prestan. Sin embargo, la mitad de las dunas del país están fuera de un ANP y por lo tanto son más susceptibles de pasar a una calidad menor (es decir, que las destrocen para construir sobre de ellas o las transformen a cultivos o pastizales). Una prioridad es que en algunas de las dunas de mala calidad dentro de las ANP, se diseñen programas de recuperación de las dunas mediante planes de manejo que no permitan el acceso a las brechas,

que se recuperen algunas playas evitando el paso constante de los bañistas, que se monitoree y asegure que no hay invasión de especies, etc. Es decir que muchas de ellas se pueden restaurar de manera pasiva a través de medidas indirectas, dejando que la duna y su vegetación recuperen naturalmente la dinámica que las caracteriza.

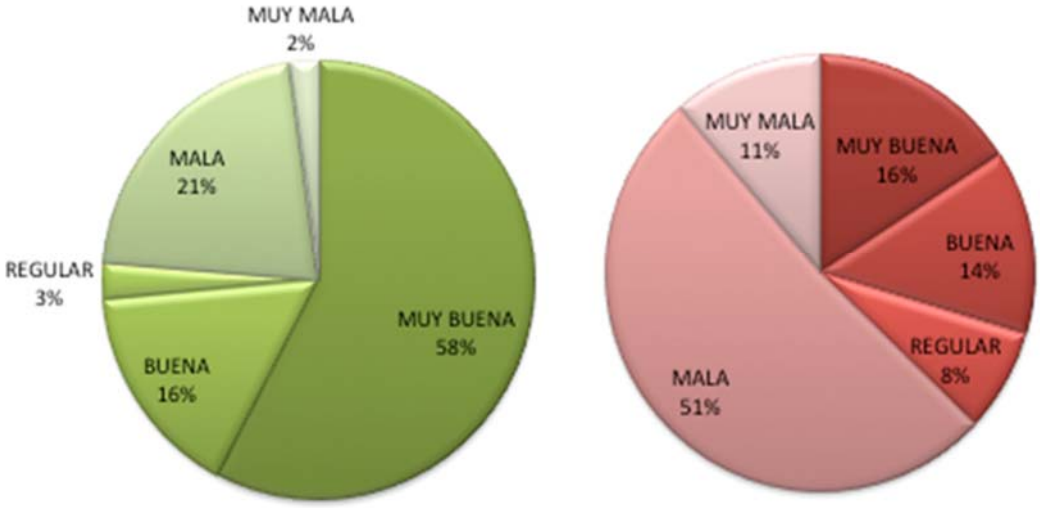

Figura IV-3. Calidad de las dunas costeras de México. En verde las dunas dentro de ANP y en rojo las dunas fuera de ANP.

En conclusión, en las ANP se pueden fomentar programas de recuperación de dunas costeras y revisar si en los planes de manejo ya están incorporadas las actividades para restauración/reforestación. Fuera de las ANP, es importante hacer uso de los instrumentos indirectos de conservación, como son los ordenamientos ecológicos, los planes de desarrollo urbano de los centros de población y la certificación de playas limpias (de conservación). En estos espacios, donde se mezclan usos agropecuarios, urbanos, recreativos e industriales, es necesario que los planes de manejo integrado incorporados a los esquemas de planeación territorial, busquen que dichas actividades se realicen preservando la biodiversidad de las dunas costeras y que fomenten una participación activa de los municipios. Una característica de las dunas es que en espacios relativamente pequeños se pueden encontrar muchas de sus especies y que, en especial las dunas frontales, pueden ser interrumpidas por construcciones

aisladas y de baja altura, pero mientras se mantengan las formas de las dunas y la flora, es posible que no se pierda su capacidad de protección de la línea de costa.

Estrategias de manejo de dunas para lograr su conservación

En los capítulos anteriores se ha explicado la importancia de las dunas como ecosistemas, los recursos y servicios que proporcionan y el papel que juegan en la vida de nuestras sociedades. Sin embargo, más de la mitad de las dunas de México quedan sin proteger. Son ecosistemas que son y seguirán siendo zonas donde se busca realizar actividades recreativas y productivas, y hoy en día constituyen puntos de desarrollo turístico. Frecuentemente el beneficio económico hace que estos ecosistemas se substituyan por edificaciones de concreto. El desarrollo sustentable busca equilibrar el uso y la conservación de la estructura y las funciones de los ecosistemas, por lo tanto es importante destinar áreas para protección, pero también hay formas de usar sin alterar los procesos ecológicos fundamentales.

Como se ha visto en capítulos anteriores, las playas y dunas costeras son ecosistemas frágiles ubicados en la zona de interacción de la dinámica del mar, de la tierra, de la atmósfera y del agua dulce. Ello hace que sean ecosistemas también sumamente dinámicos que responden a las fuerzas que ejercen presión sobre ellos. Si la atmósfera con vientos fuertes es la que ejerce presión, la arena se mueve, se erosiona en algunas zonas y se deposita en otras. Si es el mar el que ejerce presión, el oleaje golpea con mayor energía y se lleva la arena de la playa, llegando a erosionar dunas embrionarias y aun la primera duna frontal, también llamada duna primaria. Frecuentemente el mar y la atmósfera actúan conjuntamente, como sucede durante los nortes y tormentas de invierno, en las cuales la playa se hace más angosta, se producen las mayores erosiones en playas y dunas, se desestabilizan los sistemas. Cuando viene la primavera y el verano predomina la calma, y el agua de los ríos acarrea cuenca abajo los sedimentos que las corrientes marinas acarrean a las playas. Éstas se hacen más anchas. Esta dinámica se repite año con año, a veces más destructiva, a veces menos, pero es la historia constante de las playas y dunas, procesos mediante los cuales se regeneran y mantienen.

Hoy en día el hombre ha alterado este equilibrio. Entre el 70 y el 90% de las playas del mundo se está erosionando (Bird, 1996). Este autor menciona entre las principales causas la construcción de presas que retienen los sedimentos, el incremento en el nivel del mar que ha hecho que el oleaje golpee con mayor energía y más tierra adentro en las playas y la pérdida de muchos sedimentos hacia los fondos marinos, volviéndolos irrecuperables para las playas. En los desarrollos turísticos costeros, la playa es uno de los principales atractivos y su calidad guarda una relación estrecha con la capacidad de producir beneficios económicos. Una playa sin arena, rellena de piedras o grava y llena de escolleras, resulta menos atractiva para los visitantes. Esta situación hace que el mantener la arena y evitar su pérdida deba ser un objetivo de cualquier actividad que se desarrolle en un sistema de playas/dunas. Ello no significa que no pueda darse un desarrollo turístico costero, significa más bien que el proyecto deberá adaptarse a las condiciones particulares del sitio e incluir entre sus objetivos el conservar la playa y por tanto adecuar sus construcciones a estos escenarios.

Existen numerosos autores que han tratado estos temas a fondo. Los problemas de la costa y el manejo integral costero han sido revisados detenidamente y aquellos interesados pueden revisar los trabajos de Beatley et al. (1994), Viles y Spencer (1995), Bird (1996), Clark (1996), French (1997), Carter (1988) y Cicin-Sain y Knecht (1998) entre los principales. Otro grupo de autores han elaborado un conjunto de libros para las distintas zonas de Estados Unidos, en los cuales analizan las condiciones ambientales de cada zona de playa y dunas y dan recomendaciones sobre vulnerabilidad, reglas a seguir para reducir las amenazas, normas de construcción, etc. (Pilkey et al, 1984; Doyle et al., 1984; Canis et al., 1985; Bush et al., 1995; Bush et al., 1996; Komar, 1997; Pilkey et al., 1998). En México, Robles et al. (2000) elaboraron una estrategia para el manejo costero que es antecedente de la Política Nacional de Mares y Costas que trabajó recientemente la SEMARNAT (http://www.semarnat.gob.mx/transparencia/participacion/consultaspublicas/marescostasy manglares/Documents/dcto_trab_22oct10_conspub.pdf). Moreno-Casasola et al. (2006) conjuntaron diversos escritos sobre el manejo costero integral, aportando elementos para varios municipios del país. Se han planteado diversas formas de conservación de dunas, desde internacionales como Espejel et al. (2001), quienes presentan una propuesta para la frontera

norte, hasta muy localizados como el de Espejel et al. (2004a) para un sitio puntual y carismático de Baja California. Los ordenamientos ecológicos de Campeche y Baja California (Espejel et al., 2004b) presentan estrategias para protección de las playas. En Baja California Escofet et al. (1993), Espejel et al. (2007); Cervantes et al. (2008); Cervantes y Espejel (2008) y Rosas et al. (2012) han elaborado recomendaciones para el uso de las playas recreativas incorporando a los usuarios, las cuales han sido utilizadas en otros países como Argentina (Faggi et al., 2011 y Madanes et al., 2012). En el Caribe, Molina et al. (1998) desarrollaron un manual con normas prácticas para el desarrollo turístico. Más recientemente Silva-Casarín et al. (2013) elaboraron un conjunto de criterios ecológicos que proporcionan recomendaciones para regular las obras y actividades en las playas y dunas de México.

Bush et al. (1996) y Pilkey et al. (1998) plantean una serie de principios básicos para vivir en la zona costera, denominados "viviendo bajo las reglas del mar":

1. La zona costera es un ambiente único en la tierra y por tanto requiere de estrategias de manejo únicas. En la costa hay sistemas mucho más dinámicos que tierra adentro y por tanto el tipo y patrón de desarrollos urbano-turísticos que funcionan en el interior frecuentemente incrementan el riesgo en las zonas costeras.

2. Los procesos físicos costeros deben ser identificados y comprendidos desde una perspectiva integral que tenga en cuenta todos los ecosistemas costeros y sus interacciones.

3. Se debe planificar antes de hacer un desarrollo y éste debe hacerse respetando la dinámica natural de la costa y con una visión integral de la misma. El escoger adecuadamente dónde se va a ubicar una edificación es el mejor seguro contra daños. Un sitio protegido por la playa y dunas o bien elevado cuenta con más protección. Un desarrollo bien planificado no requiere el uso de sistemas de "protección costera" como son muros de contención, espigones, etcétera.

4. Las alteraciones que el desarrollo económico produce en el ambiente deben ser reparadas. Ello implica generalmente, restaurar zonas de dunas, bosques sobre dunas, humedales, manglares, selvas inundables, etc. a condiciones similares a las que tenían antes del desarrollo.

5. Todas las evaluaciones de riesgo y de mitigación en la zona costera deben manejarse dentro del marco de la elevación del nivel del mar que se está produciendo.

6. El riesgo y los daños que se pueden ocasionar a las propiedades en la zona costera son específicas de cada sitio. Cada lugar es diferente ya que presenta un conjunto único de características o condiciones que requiere soluciones únicas.

7. La mitigación de daños a la propiedad debe plantearse desde una perspectiva integral, y no sólo desde la visión de las zonas más cercanas al mar. Este enfoque es especialmente importante para las islas de barrera.

8. Las áreas de riesgo relativo pueden ser reconocidas con base en criterios bien definidos. El establecimiento de criterios y la observación directa del área en cuestión permitirán dirigir el desarrollo hacia zonas menos riesgosas, por ejemplo, donde no hay penetración del oleaje de tormenta, migración de dunas, áreas poco elevadas, etcétera.

9. Se deben evitar acciones y construcciones que generen problemas. Caminos y carreteras que llegan perpendiculares hasta la playa son puntos bajos de entrada del oleaje durante tormentas. Lo mismo sucede con cortes o eliminación de dunas de arena que frecuentemente se hacen para tener vista, acceso o edificar construcciones. Los muros de contención protegen edificios pero también reducen el tamaño de la playa, quedando mucho más expuestos al oleaje.

10. Las playas anchas y las dunas embrionarias protegen las construcciones, ya que hay más superficie para disipar la energía del oleaje durante tormentas.

11. Las dunas protegen las edificaciones, pues funcionan de igual manera que las playas.

12. Es de gran importancia conservar la arena, es decir, los sedimentos. Especialmente en las playas y dunas, el volumen de arena debe mantenerse o bien incrementarse. Al igual que el agua o el aire, es un recurso que debe conservarse.

13. La vegetación protege las edificaciones y las propiedades. Se debe mantener la cubierta de vegetación natural de las dunas y humedales, ya que brinda estabilidad a las dunas y permite el funcionamiento de los humedales.

14. Se deben proteger las unidades geomorfológicas como consecuencia del cumplimiento

de las reglas anteriores. Las playas y dunas, las marismas, manglares y selvas inundables son ambientes donde se ha producido una acumulación de sedimentos como respuesta a la dinámica costera. Cuando se altera la unidad geomorfológica, se altera la estabilidad.

A continuación, y con base en los autores arriba mencionados, especialmente en el trabajo de Silva-Casarín et al. (2013), se plantean una serie de recomendaciones que permitirán desarrollar la costa de manera sustentable.

- Siempre deben realizarse estudios del sistema en particular, considerando los tipos de dunas, su orientación y la vegetación que los estabiliza, 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 toda construcción la orientación de las edificaciones deberá disminuir la superficie de choque del viento, con base en los estudios de vientos correspondientes.
- Se deberá evitar la construcción en zonas de: (1) riesgo para la población, (2) alta vulnerabilidad, y (3) donde se forman 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.
- Se deberá mantener el flujo de sedimento entre las dunas costeras y la playa, así como la cobertura de vegetación nativa que forma las dunas, para que se mantenga la dinámica natural del sistema. De esta manera se mantiene la playa con menos problemas de erosión, y se conserva la forma y funcionamiento de las dunas.
- Tampoco se debe interrumpir el aporte de agua a hondonadas húmedas y lagos interdunarios y se debe evitar rellenarlos 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.

- Las obras de infraestructura que atraviesen las dunas como las tuberías de obras de toma y descarga 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.
- El acceso de paseantes a las playas a través de las dunas costeras deberá ser por medio de andadores elevados de material degradable y prefabricado, piloteado y no cimentado. Deben estar suficientemente elevados para permitir el crecimiento de la vegetación (al menos un metro de elevación) y el paso de sedimentos y de fauna.
- La construcción de infraestructura permanente o temporal debe quedar fuera de las dunas incipientes o embrionarias. Deberá siempre evitarse, ya que son las primeras dunas que proporcionan el servicio de protección.
- En las dunas primarias o frontales 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 cresta de estas dunas. El pilotaje deberá ser superficial, no cimentado y permitir el crecimiento de la vegetación, el transporte de sedimentos y el paso de fauna, por lo que 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 o procesos avanzados de erosión, ya que en estas zonas las dunas primarias 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.
- Las construcciones en las dunas semi-móviles (dunas secundarias) que se localicen en sitios expuestos y tengan arena (material no consolidado), sólo podrán ser de madera o material degradable y piloteadas, ubicadas detrás de la cara posterior del primer cordón.

- En sitios de dunas protegidos físicamente, donde se presente suelo desarrollado, material consolidado y pendiente menor a 20° se permitirá la construcción de infraestructura permanente.
- 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.
- En las estabilizadas (dunas terciarias) podrá haber construcciones permanentes solamente en la zona donde se presenta material consolidado, suelo desarrollado y pendiente menor a 20°.
- No se recomienda la construcción de infraestructura permanente, ni estructuras de protección, en las zonas inestables de dunas costeras de islas de barrera.
- Se construyen campos de golf sobre dunas y transforman el sistema completamente al poner pasto, sin embargo algunos dejan los *roughs* con la vegetación de dunas y de alguna manera se mantiene el paisaje. Leyva et al., (2006) mencionan las ventajas en los matorrales costeros sobre los paisajes donde toda la vegetación es introducida. Estos campos de golf cada vez son más apreciados y mantienen hábitat de aves en las lagunas y sitios de refugio para mamíferos e invertebrados pequeños.
- 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.
- Las obras y actividades que se realicen 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 debe evitar la afectación de las Áreas Naturales Protegidas, de los sitios Ramsar, y de las Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves (AICAS).

Referencias bibliográficas

Beatley, T., D.J. Brower y A.K. Schwab. 1994. An introduction to coastal zone management. Washington D.C.: Island Press.

Bird, E.C. 1996. Beach management. New York: John Wiley & Sons.

Bush, D.M., R.M.T. Webb, J. González-Liboy, L. Hyman y W.J. Neal. 1995. Living with the Puerto Rico shore. Durham, NC: Duke University Press.

Bush, D.M., O.H. Pilkey Jr. y W.J. Neal. 1996. Living by the rules of the sea. Durham, NC: Duke University Press.

Canis, W.F., W.J. Neal, O.H. Pilkey Jr. y O.H. Pilkey Sr. 1985. Living with the Alabama-Mississippi shore. Durham, NC: Duke University Press.

Carter, R.W.G. 1988. Coastal environments. An introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines. Londres: Academic Press.

Cicin-Sain, B. y R.W. Knecht. 1998. Integrated coastal and ocean management. Concepts and practices. Washington D.C.: Island Press.

Cervantes, O., I. Espejel, E. Arrellano y S. Delhumeau. 2008. Users' perception as a tool to improve beach planning and management. *Environmental Management*, 42: 249-264.

Cervantes O. y I. Espejel. 2008. A Model for the evaluation of recreational beaches: Its application in Mexico, Brazil, and the United States. *Ocean and Coastal Management*, 51: 410-419.

Clark, J.R. 1996. Coastal zone management. Handbook. New York: Lewis Publishers.

Doyle, L.J., D.C. Sharma, A.C. Hine, O.H. Piley Jr, W.J. Neal, O.H. Pilkey Sr., D. Martin y D.F. Bleknap. 1984. Living with the West Florida shore. Durham, NC: Duke University Press.

Escofet, A., I. Espejel, L. Gómez-Morín, J.L. Ferman y G. Torres-Moye. 1993. Manejo de la zona costera. En S. Salazar y N.E. González (Eds.), Biodiversidad marina y costera de México. CIQRO-CONABIO.

Espejel, I., P. Moreno-Casasola y M. Barbour. 2001. Coastal vegetation: diversity and conservation. En G. Webster y C. Bahre (Eds.), Changing Plant Life of La Frontera: Observations on Vegetation in the U.S./Mexico Borderlands. New Mexico: University of New Mexico Press.

Espejel, I., B. Ahumada, Y. Cruz y A. Heredia. 2004b. Coastal vegetation as indicators for conservation. En M.L. Martínez y N. Psuty (Eds.), Coastal sand dunes: Ecology and restoration (Capítulo 18: 297-318). New York: Springer-Verlag.

Espejel I., C. León, J.L. Fermán, G. Bocco, F. Rosete, B. Graizbord, A. Castellanos, O. Arizpey y G. Rodríguez. 2004a. Planeación del uso del suelo en la región costera del

golfo de California y Pacifico norte de México. En Arriaga-Rivera et al (Eds.) El manejo costero en México (pp. 321-340). EPOMEX-SEMARNAT-CETyS-Universidad de Quintana Roo.

Espejel, I., A. Espinoza-Tenorio, O. Cervantes, I. Popoca, A. Mejia y S. Delhumeau. 2007. Proposal for an integrated risk index for the planning of recreational beaches: use at seven mexican arid sites. *Journal of Coastal Research*. Special Issue 50. Proceedings. International Coastal Symposium. Queensland Australia. SI 50: 47-51.

Espejel, E., P. Pena-Garcillán, y O. Jiménez-Orocio. 2013. Flora de playas y dunas de México. Informe Técnico Final Conabio HJ007.

Faggi A., N. Madanes, M. Rodríguez, J. Solanas, A. Saénz y I. Espejel. 2011. Users preferences and choices in argentinean beaches. En H. Dupont (Ed.), Environmental Management (Capítulo 8: 97-208). Nova Science Publishers.

French, P.W. 1997. Coastal and estuarine management. Routledge environmental management series. New York: Routledge.

Komar, P.D. The Pacific northest coast. Living with the shores of Oregon and Washington. Durham, NC: Duke University Press.

Leyva, C., I. Espejel, A. Escofet y S.H. Bullock. 2006. Coastal landscape fragmentation by tourism development: impacts and conservation alternatives. *Natural Areas Journal,* 26: 117-125.

Madanes, N., A. Faggi y I. Espejel. 2011. Sistemas de valoración de calidad de playas turísticas. En J.R. Dadon (Ed.), Ciudad, paisaje, turismo. Frentes urbanos costeros (pp. 229-240). Buenos Aires: Gestión de Espacios Costeros (GEC), Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos Aires y Nobuko.

Martínez, M.L., J.B. Gallego-Fernández, J.G. García-Franco, C. Moctezuma y C.D. Jiménez. 2006. Assessment of coastal dune vulnerability to natural and anthropogenic disturbances along the Gulf of Mexico. *Environmental Conservation,* 33: 109-117.

Molina, C., P. Rubinoff y J. Carranza. 1998. Normas prácticas para el desarrollo turístico de la zona costera de Quintana Roo, México. Amigos de Sian Ka´an y Centro de Recursos Costeros URI, Coastal Resources Center.

Moreno-Casasola, P., S. Castillo y M.L. Martínez. 2011. Flora de las playas y los ambientes arenosos (dunas) de las costas. En CONABIO, La Biodiversidad en Veracruz: estudio

de estado. Vol I. (pp. 229-238). México, D.F.: CONABIO-Gobierno del Estado de Veracruz-Universidad Veracruzana-Instituto de Ecología, A.C.

Moreno-Casasola, P., I. Espejel, S. Castillo-Argüero, G. Castillo-Campos, R. Durán, J. Pérez-Navarro, J. León y J. Trejo-Torres. 1998. Flora de los ambientes arenosos y rocosos de las costas de México. En G.E. Halffter (Ed.) Diversidad Biológica de Iberoamérica Vol. II (pp. 177-258). Xalapa, Ver.: CYTED- Instituto de Ecología A.C.

Moreno-Casasola, P., E. Peresbarbosa y A.C. Travieso-Bello (Eds.). 2006. Estrategias para el manejo integral de la zona costera: un enfoque municipal Volumen I, II y III. Xalapa, Ver.: Instituto de Ecología A.C.-Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, SEMARNAT- Gobierno del Estado de Veracruz. (http://www1.inecol.edu.mx/costasustentable/esp/documentos/publicacionestxt.htm #Libros)

Oropeza-Orozco, O., I. Sommer-Cervantes, J. Carlos-Gómez, J.C. Preciado-López, M.A. Ortiz-Pérez y J. López-Portillo. 2011. Assessment of vulnerability and integrated management of coastal dunes in Veracruz, Mexico. *Coastal Management*, 39: 492-514.

Pilkey Jr., O.H., D.C. Sharma, H.R. Wanless, L.J. Doyle, O.H. Pilkey Sr., W.J. Neal y B.L. Gruver. 1984. Living with the East Florida shore. Durham, N.C.: Duke University Press.

Pilkey, O.H., W.J. Neal, S.R. Riggs, C.A., Webb, D.M. Bush, D.F. Pilkey, J. Bullock y B.A. Cowan. 1998. The North Carolina shore and its barrier Islands. Restless ribbons of sand. Durham, N.C.: Duke University Press.

Robles M., I. Espejel y C. Chávez (Coordinadores). 2000. Estrategia Ambiental para la gestión integrada de la zona costera de México. Propuesta. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP.

Rodríguez-Cardozo L., I. Espejel y G. Seingier (en revisión). Políticas de protección a las áreas naturales y su impacto. *Política y Cultura*.

Rosas, R., I. Espejel, O.D. Cervantes-Rosas y A. Ferrere. 2012. La percepción de la playa como un elemento importante para la certificación de playas. Ejemplo de Ensenada, Baja California, México. En D. Correa-Guía y L. Márquez (Eds.), Turismo sostenible.

Un debate para el futuro multigeneracional (Capítulo 7: 166-192). Naguanagua, Venezuela: Universidad de Carabobo.

Silva-Casarín, R., D. Pedroza, I. Espejel, P. Moreno-Casasola, M.L. Martínez, D. Infante Mata, A. Cid, M. Villatoro, M.A. Delgadillo, O. García, y E. Mendoza. 2013. Manejo de ecosistemas de dunas costeras. Criterios ecológicos y estrategias. México D.F: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Viles, H. y T. Spencer. 1995. Coastal problems. Geomorphology, ecology and society at the coast. London: Edward Arnold.

Capítulo V: Diseño y aplicación del modelo de evaluación de la vulnerabilidad de las dunas costeras de México

Introducción

Las dunas costeras (DC), un sistema natural complejo por su heterogeneidad topográfica y diversidad biológica, son ecosistemas que constantemente están expuestos a perturbaciones naturales de impacto variable (García-Mora et al., 1999). Su configuración geomorfológica depende del aporte de sedimentos, donde los factores de influencia marina y eólica juegan un papel importante. Así, el acarreo de sedimentos a través de las corrientes litorales es depositado en la playa, por acción de las olas, y depositado en el mar y transportado tierra adentro por acción eólica (Hesp, 2002; Camacho-Valdés et al., 2008). Sin embargo, en temporadas de tormentas el fuerte oleaje puede erosionar las playas, retirando sedimento; debido a que es arrastrado por la marea de tormenta de manera que se generan escarpes de erosión en los primeros cordones de dunas. En este último caso, la vegetación juega un papel importante, ya que las especies de plantas, características de dunas, disminuyen el embate de las tormentas, y son propicias para el restablecimiento de los procesos sedimentarios (Arens, 1993, Hesp et al., 2011; Gallego-Fernández y Martínez, 2011; Álvarez-Molina et al., 2012). Todo lo anterior forma parte de un proceso de erosión-recuperación y renovación del sistema. No obstante, las perturbaciones externas al sistema (antropogénicas o naturales), pueden generar un desajuste en este proceso. La intrusión de actividades antrópicas, como el cambio de uso de suelo (Oropeza-Orozco et al., 2011), la obstrucción o el desvío del aporte de sedimento (Silva-Casarín et al., 2014), o las actividades de recreación (Escofet y Espejel, 1999; Camacho-Valdés et al., 2008; Hesp et al, 2010; Muñoz-Valles et al., 2011; Lithgow et al, 2014), disminuye la capacidad de los ambientes naturales de recuperarse de estas perturbaciones o de perturbaciones de origen natural, lo que hace que estos ecosistemas sean más vulnerables hasta el punto de no poder recuperarse nunca (Martínez et al, 2006).

En un sentido amplio, el concepto de vulnerabilidad puede ser considerada dentro de la discusión sobre el análisis del riesgo del por qué un ambiente físico o una comunidad es adversamente impactada por una perturbación en específico (de Bruijn et al., 2007). Según Green y McFadden (2007) la vulnerabilidad es un concepto que relaciona los cambios en un

sistema y su capacidad de respuesta a estos. Estos mismos autores y otros, mencionan que el concepto de vulnerabilidad es usado de manera similar al concepto de riesgo, sensibilidad, exposición, capacidad de respuesta y resiliencia (Liverman, 1990; Gallopin, 2006; Füsel, 2007; Hufschmidt, 2011), y recientemente sobre la importancia de la capacidad adaptativa del sistema (Green y McFadden, 2007). En efecto, cada uno de los conceptos anteriores podría considerarse equivalente, solo que para medirlos se usan diferentes métodos de análisis (Hinkel, 2011) o se incorporan los mismos indicadores, pero computados en un orden distinto. Así pues, la vulnerabilidad es evaluada desde diferentes perspectivas de riesgo, pero siempre tienen como objetivo la evaluación de la respuesta del sistema (Adger, 2006; Füsel, 2007), es decir la respuesta de un sistema social, un ecosistema, o un socio-ecosistema, ante un disturbio natural o antrópico.

En este trabajo el concepto de vulnerabilidad de las DC se basa en la propuesta de Williams et al. (2001), quienes definen a la vulnerabilidad como a la capacidad de los sistemas arenosos de hacer frente o recuperarse después de un disturbio.

En México, los sistemas de DC se encuentran en casi el 80% de ambos litorales, pero apenas ocupan el 1% del territorio nacional (Jiménez-Orocio et al., 2014). Además, aunque en los últimos años han sido objeto de estudios para muchas investigaciones de orden ecológico (Jiménez-Orocio et al., 2015), la mayoría de la población ignora su importancia ecológica y las perciben como ambientes arenosos pobres (Moreno-Casasola, 2006) o que sirven solo como sitio para la recreación del turismo de sol y playa o para deportes todo terreno. En el país, como en el mundo, las principales actividades que los investigadores han identificado como detonantes del aumento de la vulnerabilidad de las DC son las actividades portuarias, turísticas, mineras (Williams et al, 2001; Nordstrom, 2004). No obstante, la importancia de la vulnerabilidad de los ecosistemas de playas y dunas se ha abordado poco en el país. Martínez et al. (2006), analizaron la vulnerabilidad de las costas veracruzanas siguiendo la metodología propuesta por Williamas (2001) y García-Mora et al. (2001), basándose en la cuantificación y análisis de 53 variables, distribuidas en lo que ellos consideran los 5 principales factores de perturbación de sistemas de DC (aspectos geomorfológicos, influencia eólico-marina, condición de la vegetación y presión antrópica). Por otro lado, Oropeza-Orozco et al. (2011) evalúan el impacto del cambio de uso de suelo como principal

agente de cambio y perturbación sobre los sistemas de dunas de Veracruz. Sin embargo, no existen estudios que hayan analizado la vulnerabilidad de las dunas costeras en un nivel nacional.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es aplicar un modelo de evaluación de la vulnerabilidad de las DC de México. El modelo incorpora indicadores e índices que reflejan aspectos geomorfológicos, influencia eólico-marina, condición de la vegetación y presión antrópica, los cuales han identificados los expertos mundiales en el tema como los más importantes (García-Mora, 2001; Brown y McLachlan, 2002; Feagin et al., 2005) y permiten comparaciones con otros sistemas de dunas a nivel mundial. La aplicación del modelo permite identificar los sistemas de DC con mayor prioridad para su conservación (baja vulnerabilidad) o para restauración (media-alta vulnerabilidad).

Métodos

Ambiente físico

Litoral Pacífico

En la costa del Pacífico, los dos únicos grande sistemas de planicies costeras, El Vizcaíno y la cuenca de Bahía Magdalena, se distinguen de toda la Península de Baja California. En ambos casos, la presencia de complejos lagunares permite el almacenamiento y distribución de sedimentos. Murillo de Nava y Gorsline (2000) establecen que la estructura geomorfológica de las DC de Bahía de Magdalena obedece al alto porcentaje de aporte de sediento tanto de origen eólico como fluvial, pero también a eventos geológicos que determinaron su morfología. Las DC de esta zona se han transformado en los últimos 11,000 años, de dunas frontales con nebkas en las zona cercana a la playa a grandes campos de dunas transversales y lineales que se combinan con dunas continentales (desierto del Vizcaíno) (Kasper-Zubillaga y Zollezzi-Ruíz, 2007) y con planicies y matorral costero (Bahía de Magdalena). Lo anterior también es descrito por Ortiz-Pérez y de la Lanza (2006), quienes mencionan que el fenómeno de subsidencia es generalizado en prácticamente casi toda esta costa y que se expresa a través de una fisonomía de largas y extensas islas de barrera de playas bajas, planicies de inundación, campos de dunas y salitrales, donde por lo general prevalece el relieve bajo.

Las DC de costa del Golfo de California (sobre la vertiente de la península de Baja California), a excepción de la zona de la bahía de La Paz (BCS), son pequeños cordones de dunas frontales estrechos que no rebasan los 100 m de ancho. Estos cordones de dunas generalmente se encuentran asociados a "playas tipo bolsillo" (playas en pequeñas bahías formadas en costas rocosas) o planicies aluviales. De acuerdo con Ortiz-Pérez y de la Lanza (2006), las playas arenosas son derivadas de rampas de piedemonte que descienden por medio de torrentes hacia el mar, formando abanicos deltaicos de sedimentos gruesos, o bien de playas que hacia el lado de la trascosta se encuentran precedidas de cantiles rocosos formando costas mixtas.

Sobre la costa del alto Golfo de California, desde San Felipe (BC) hasta el Golfo de Santa Clara (Son), a pesar del excesivo aporte de sedimento de la cuenca del Colorado, el clima oceánico de la zona, dado que es prácticamente la única zona costera manejada por marea (Silva-Casarín et al., 2014), influye en la acumulación de sedimentos en el frente de playa. Lo anterior, promueve la formación de islas de barrera arenosas temporales que no permiten el avance de sedimento tierra adentro. Además, dado que esta zona se encuentra ligada al gran desierto del Altar, la diferenciación entre las dunas desérticas y costeras es muy complicada.

La combinación de costas rocosas mixtas y arenosas, de la costa sonorense, determina la existencia de segmentos de costa con poca o nula presencia de cordones costeros o con sistemas de dunas frontales muy estrechos.

En la costa sur de Sonora (a partir de Bahía de Kino) y prácticamente a lo largo de toda la costa sinaloense, el cambio en clima y el incremento del aporte fluvial, debido a la presencia de grandes afluentes como los ríos Hermosillo, Yaqui y Mayo, permiten el desarrollo de grandes sistemas de islas de barreras arenosas, en la parte norte, y sistemas deltaicos paralelos a la costa, en la costa sur (Ortiz-Pérez y de la Lanza, 2006). De acuerdo con Bojórquez et al. (2008), estos sistemas deltaico-fluviales se extienden hasta la llanura costera de Marismas Nacionales (Nayarit), cuya estructura geomorfológica se extiende sobre una barrera arenosa de más de 3 km de ancho, compuesta de cordones de dunas frontales. Aquí, la altura de las dunas frontales no rebasa los dos metros, con escarpes de erosión muy marcados

(observaciones de campo, 2014), lo que indica que en escenarios de aumento del nivel del mar, la pérdida de playa es algo inevitable.

La morfoestructura geológica de la costa centro-oeste del litoral pacífico no permite el desarrollo de grandes sistemas de dunas costeros, ya que la costa rocosa domina en la mayor parte de Jalisco, Michoacán y norte de Guerrero, dando a paso a pequeños segmentos de dunas frontales dispersos. Estas dunas frontales, dispuestas en cordones estrechos a lo largo de la costa o sobre bahías de bolsillo, pueden incrementar su vulnerabilidad debido a que el aporte de sedimento es bajo y a que existe una barrera geológica (montaña) que les impide migrar tierra adentro.

A partir de la costa sur de Guerrero hasta Chiapas, dominan la presencia de cordones litorales, y campos de dunas móviles sobre islas de barrera. La dinámica sedimentaria en esta zona permite el arrastre y acumulación de sedimentos arenosos al borde de las lagunas y sobre la costa marina adyacente (Ortiz-Pérez y de la Lanza, 2006). De acuerdo con Ortiz-Pérez y de la Lanza (2006), la presencia de estos cordones de dunas se debe en principio a la cantidad de lagunas costeras que se originan de los escurrimientos de la vertiente de la Sierra Madre del Sur. El sedimento, transportado por estos escurrimientos, es interceptado por el sistema lagunar formando barreras litorales. Dichas DC se convierten en una barrera natural de protección para los propios sistemas lagunares. Aquí destacan los cordones litorales del Golfo de Tehuantepec (Oaxaca), donde el aporte de sedimentos deriva desde dos vertientes, primero por el acarreo litoral costero y segundo por el aporte de sedimento lagunar, llevando a la formación de dunas móviles en la costa interior del sistema lagunar, con dirección a la línea de costa expuesta. No obstante, aunque los cordones de dunas frontales se extiendan varios kilómetros tierra adentro, se trata de una costa arenosa muy baja, donde los primeros cordones de dunas, inmediatos a la playa, no superan los dos metros de altura.

Litoral atlántico

Sobre la costa de Tamaulipas, el acarreo de sedimentos de la cuenca del Mississippi es la principal fuente de arena para el sistema de islas de barrera en esta zona se localizan, desde la costa de Texas (EUA) hasta Soto la Marina (Tamaulipas), el límite sur de Laguna Madre Tunnel y Judd (2002). Aquí, el sistema de dunas se va estrechando, de amplias islas de barrera arenosas hasta convertirse en angostas barras arenosas (a grandes rasgos, la diferencia entre

isla de barrera y barra arenosa es su conectividad con el continente) hasta Tampico, de norte a sur. Cabe destacar, que aunque la condición geomorfológica permite una dinámica sedimentaria que favorece la formación de dunas, se ha documentado la interrupción del flujo de sedimento en la costa de Texas, y por las obras de infraestructura portuaria en Matamoros (Tamaulipas), lo que ha disminuido el aporte de sedimento y la posible disminución del ingreso de sedimentos. Además, se trata de costas sujetas a oleaje de tormenta que juegan un papel importante en la modelación del paisaje arenoso. No obstante, el azolvamiento del sistema lagunar y la formación de bancos de arena alrededor de las islas de barrera podrían servir de plataforma para la migración de los campos de dunas tierra adentro.

El flujo litoral de sedimento y la incesante descarga fluviales de los ríos Pánuco, Tecolutla, Actopan, La Antigua, Papaloapan, Coatzacoalcos y hasta el Grijalva-Usumacinta ha permitido el desarrollo de grandes sistemas de dunas en el centro del Golfo de México. La anchura de los sistemas de dunas, de hasta 5 km, refleja el papel del transporte eólico en la formación de estos sistemas arenosos.

El comportamiento acumulativo de la dinámica sedimentaria se observa en todos los sistemas de DC del centro de Veracruz (López-Portillo et al., 2010). De acuerdo con Ortiz y de la Lanza (2006) la formación del sistema de dunas de Cabo Rojo (Veracruz) se debe en parte al transporte litoral predominante (norte-sur) combinado con la descarga de sedimento del río Pánuco. Los autores mencionan que esta dinámica sedimentaria ha permitido el desarrollo de cordones de dunas hasta formar una isla de barrera de más de 3 km de ancho que funge como protección de la laguna de Tamiahua (Veracruz). Lo anterior fue documentado también por Psuty (1966), quién describió la evolución de los cordones litorales del delta del rio Grijalva-Usumacinta (Tabasco). El autor sugiere que la topografía de la planicie costera del delta se ha trasformado por la evolución de cordones de dunas frontales que ha avanzado en dirección al mar. Además, estos sistemas son colonizados rápidamente colonizados por vegetación, sugiriendo un proceso relativamente rápido de estabilización y sucesión vegetal. A diferencia de los grandes sistemas arenosos del centro de Veracruz, las DC del sur-sureste del Golfo de México y mar Caribe, se disponen en planicies de dunas frontales (Martínez et al., 2014) o estrechos cordones de dunas frontales (Quintana Roo), de poca altitud (menos de 2 m).

Diseño del modelo de evaluación de la vulnerabilidad de DC

La distribución y extensión de las dunas costeras (DC) no es homogénea en todo el litoral mexicano, por lo que se diseñó una matriz de celdas para analizar comparativamente los sistemas o dunas individuales. Para ello, se tomó como base la cuadricula 1:50,000 utilizada en la cartografía nacional del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (Conabio, 1999). En cada celda de la matriz se calculó la proporción de dunas y se aplicaron los indicadores, subíndices e índice general de vulnerabilidad.

La vulnerabilidad de las DC en México ha sido poco documentada en la literatura, por lo que se siguió la metodología de los dos principales autores sobre el tema, con modificaciones para pudieran ser utilizados según la información disponible y a lo largo de todas las costas arenosas del litoral mexicano. El primer caso se refiere al método de evaluación propuesto por Williams et al. (2000) y García-Mora et al. (2001). Estos últimos, identificaron cinco factores de cambio que aumentan o disminuyen la vulnerabilidad de DC en el mundo, los cuales están conformados por una serie de variables de recursos y magnitudes diferentes. Las variables son tomadas como indicadores, jerarquizadas en valores de 0 a 4, que sumadas integran un índice para cada factor. A su vez, este índice es clasificado en valores de 0 a 1; donde 0 indica vulnerabilidad muy baja y 1 vulnerabilidad muy alta. Por último, el resultado de cada subíndice es sumado para obtener un índice final de vulnerabilidad.

A continuación se enlistan los cinco factores de vulnerabilidad de DC propuestos por García-Mora et al. (2001):

1. *Condición geomorfológica del sistema*: consta de ocho indicadores. Resumido como la capacidad de resiliencia del sistema, el cual dependerá de la tipología y extensión de las DC, el aporte de sedimento, la presencia de lagunas interdunarias y tamaño de las partículas de sedimento.
2. *Influencia marina*: consta de nueve indicadores. Relacionado con procesos de erosión marina como características del oleaje, amplitud de las mareas, exposición, pendiente y tamaño de las partículas de la arena de la playa.
3. *Influencia eólica*: consta de nueve indicadores. Relacionado con la influencia de la actividad y predominancia del viento en procesos tanto de depósito como erosión de

sedimentos, así como las barreras que influyen en la captura o erosión de los sedimentos.

4. *Condición de la vegetación*: consta de 10 indicadores. Relacionado a los tipos funcionales de plantas y su interacción con las variables de influencia eólica y marina. Asimismo, está relacionado con el efecto negativo de la presencia de especies exóticas e invasoras y su ubicación en el sistema.
5. *Efecto humano*: consta de 17 indicadores. Relacionado con la alteración del sistema por actividades antrópicas (turismo, desarrollo agropecuario, urbano e industrial, entre otros) temporales o permanentes. Los autores resaltan, que el efecto de las actividades depende de la frecuencia y densidad con que se realizan.

En el segundo caso, se hace referencia a la evaluación de Oropeza-Orozco et al. (2011), quienes toman como base el análisis del uso de suelo (influencia antrópica) como principal factor de vulnerabilidad. Estos autores, resaltan que los factores naturales, como tormentas y huracanes, más que un indicador de perturbación negativa, son variables que forman parte de la complejidad del sistema y no deberían ser tomados como un agente de cambio. No obstante, en el presente trabajo se consideró evaluarlos ya que, aunque forman parte del sistema, pueden convertirse en agentes de perturbación en sistemas de dunas si coinciden con índices altos de perturbación antrópica o que su frecuencia de ocurrencia impida la recuperación del sistema.

Debido a que el presente estudio es a nivel nacional, y tomando en cuenta la extensión del litoral mexicano y de algunos sistemas de dunas, se decidió utilizar solamente los cinco factores de influencia del índice de García-Mora et al. (2001), con indicadores que representen, en conjunto, las variables propuestas por estos autores. Cada uno de los cinco factores fue analizado de manera independiente, como un subíndice, para posteriormente sumarlos y obtener un índice de vulnerabilidad de DC por celda (Figura V-1). Cada indicador utilizado se describe en los párrafos siguientes.

Dado que cada indicador cuenta con rangos de medida de diferentes órdenes, los datos se jerarquizan en rangos de 0 a 4, según la presión que tiene cada variable sobre el sistema. Esta jerarquización está basada en la literatura analizada en los capítulos I y III. Seguido de esto,

la sumatoria de cada subíndice es dividida por el número de indicadores utilizados. Finalmente, los resultados son organizados en cuatro categorías:

Valor de vulnerabilidad	Categoría de vulnerabilidad
0 - 0.25	Baja
0.251 - 0.5	Media
0.501 - 0.75	Alta
0.751 - 1	Muy alta

Esta misma jerarquización es aplicada al índice de vulnerabilidad general.

Debido a la ausencia de datos, a nivel nacional, de la condición de la vegetación de las DC, este subíndice se sustituyó por un conjunto de indicadores relacionados al uso de suelo propuestos por Oropeza-Orozco et al. (2011). Para ello, se realizó la fotointerpretación de imágenes satelitales, describiendo el uso actual, de los sistemas de DC del país. La información de imágenes satelitales se basó en la capa de información espacial de la plataforma Google Earth (2012) en su versión Pro (mayor calidad y resolución). Se generó una base de datos de imágenes de casi toda la costa del país. Las imágenes fueron salvadas con una resolución de 2.3x2.3 metros por pixel. Cada imagen cubre aproximadamente 83 km^2 de costa y comprende entre 5 y 7 km lineales de costa (dependiendo de la zona en la que se encuentre es la longitud de costa que cubre). Lo anterior permitió digitalizar los límites de DC a escala 1:20, 000. La digitalización y cálculo de superficie se realizó con ayuda del software SIG (Sistema de Información Geográfica) ArcGis 9.3 (ESRI). El cálculo de superficies se realizó bajo la proyección cartográfica CCL (Cónica Conforme de Lambert) Datum ITRF92 (International Terrestrial Reference Frame1992, por sus siglas en inglés).

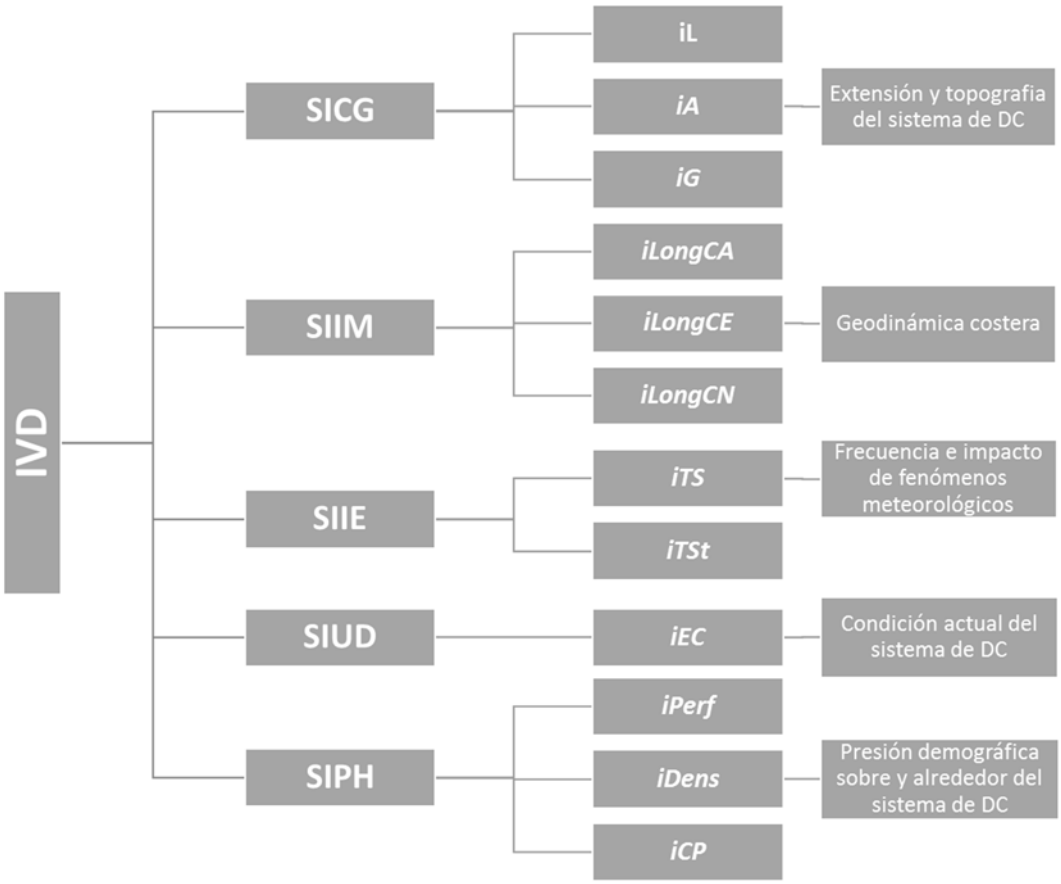

Figura V-1. Esquema de los índices e indicadores utilizados para la elaboración del modelo de evaluación de la vulnerabilidad de DC (IVD). El modelo consta de cinco subíndices factores): un subíndice de estado del sistema (SICG: subíndice de condición geomorfológica); dos subíndices de presión natural externa (SIIE: subíndice de influencia eólica; SIIM: subíndice de influencia marina) y dos subíndices de presión antrópica externa (SIUD: subíndice de condición y uso de las DC; SIPH: subíndice de presión humana).

Subíndice de condición geomorfológica (SICG).

Se refiere a la extensión superficial de los sistemas de DC. Aunque la extensión, topografía y grado de estabilización de las DC depende de muchos factores, tanto geológicos como climáticos (ver Capítulo II de esta tesis), se consideró que los sistemas más grandes de DC son menos vulnerables que los pequeños y angostos cordones de dunas o sistemas de dunas de extensión muy limitada. Así mismo, se consideró que los sistemas de DC transgresivas

y/o parabólicas, con o sin vegetación, presentan mayor aporte de recursos sedimentarios, respecto a las planicies de dunas frontales, que les permite recuperarse más rápidamente.

Por lo tanto, se considera que entre mayor es la extensión, longitud y anchura, menor será la vulnerabilidad del sistema, y menor aún si se trata de DC transgresivas. Para determinar la vulnerabilidad por influencia de la condición geomorfológica se utilizó la siguiente formula:

$SICG = iL + iA + iG$

$iL = (LongD/LongC)*100$

$iA = \bar{X}$ *Anchura del Sistema de DC*

iG= Ponderación de la proporción de tipo de DC

Donde:

SICG= subíndice de condición geomorfológica

Conformado por tres indicadores

LongD= Longitud de DC

LongC= Longitud total de la línea de costa en cada celda

iL=indicador de longitud litoral de DC

iA= indicador de ancho promedio del sistema de dunas

iG= indicador geomorfológico

De acuerdo con la proporción de dunas distribuidas a lo largo del litoral, correspondiente a cada celda, el ancho promedio de éstas, se les asignó un valor de vulnerabilidad, según se describe en el siguiente cuadro (Tabla V-1):

Tabla V-1. Jerarquización de los valores del índice de condición geomorfológico. DT: DC transgresiva; DP: DC parabólica; DF: Duna o planicie de dunas frontales.

Indicador	Rango de vulnerabilidad				
	0	1	2	3	4
% longitud de dunas respecto al total de longitud de costa	>80	>60<80	>40<60	>20<40	<20

Ancho promedio del sistema de duna (m)	>2000	>1000<2000	>500<1000	>100<500	<100
Tipo de dunas	DT>75%		DT+DP>75%		DF>75%

Subíndice de influencia marina (SIIM). Se refiere al tipo de costa, de acuerdo con la categorización de los procesos erosivos-acrecivos y a la geodinámica costera a largo plazo de Silva-Casarín et al. (2014). Se considera que las costas erosivas tienden a disminuir la capacidad de recuperación del balance sedimentario playa-duna propiciando la pérdida de dunas a largo plazo, al menos en el primer cordón de dunas, inmediato a la línea de costa. Para determinar la vulnerabilidad por influencia de la condición de la vegetación se utilizó la siguiente formula y se jerarquizó según la proporción de cada tipo de costa (Tabla V-2):

$$SIIM = (iCA - iCE) + iCN$$

$$iCA = LongCA/LongC$$
$$iCE = LongCE/LongC$$
$$iCN = LongCN/LongC$$

Donde:
SIIM= Subíndice de influencia marina
Como función de indicadores relacionado al tipo de costa.
CA: Costa acresiva
CE: Costa erosiva
CN: costa en equilibrio
LongCA= Longitud de costa acresiva
LongCE= Longitud de costa erosiva
LongCN= Longitud de costa neutral
LongC= Longitud de costa

Tabla V-2. Jerarquización de los valores del índice de influencia marina.

Indicadores	Rango de vulnerabilidad				
	0	1	2	3	4

% longitud de tipo de geodinámica costera respecto al total de longitud de costa	Si CA>75%		Si CN o CA+CN > 75%		CE>75%

Subíndice de influencia eólica (SIIE)

Se refiere a la frecuencia de eventos meteorológicos que impactan la zona con DC. En este caso se usó la información de la trayectoria de tormentas y huracanes *International Best Track Archive for Climate Stewardship* (IBTrACS) (Knapp et al., 2010) del Centro de Datos Mundiales para Meteorología de Asheville, (WDCMA-NOAA, por sus siglas en inglés). La base de datos cuenta con información que data de 1880 a 2014; sin embargo, se consideró utilizar solo los datos más actuales para México, entre 1950 a 2010, siguiendo la metodología de Jáuregui (2003) y Martínez et al. (2014). Los eventos meteorológicos de la base de datos están clasificados en siete categorías: TD, depresión tropical; TS, tormenta tropical; H1, huracán categoría 1; H2, huracán categoría 2; H3, huracán categoría 3; H4, huracán categoría 4; y H5, huracán categoría 5. Para diferenciar la magnitud del impacto de cada evento meteorológico, el producto de la suma de cada categoría entre el total de eventos fue ponderado según la categoría del mismo. Por ejemplo, el producto de la depresión tropical fue multiplicado por 1, tormenta tropical por 2, y así sucesivamente hasta el huracán categoría 5 que fue multiplicado por 7.

$$SIIE = \sum_n (TS\ /TSt) * W$$

Donde:

SIIE: Subíndice de influencia eólica

n: total de eventos meteorológicos por celda

Con dos indicadores relacionado al tipo y número de eventos hidrometeorológicos

TS= Categoría de evento meteorológico

TSt= Total de eventos meteorológicos que impactaron la zona

W= Ponderación

Subíndice de condición y uso de las DC (SIUD)

Debido a la ausencia de información del estado de la vegetación de todas las dunas del país, se desarrolló un subíndice de uso de suelo de las DC, con base en la interpretación cartográfica del estado de su conservación (ver Capitulo III). Las dunas se clasificaron en cuatro categorías: "natural", dunas con ningún tipo de degradación aparente; "fragmentado": dunas fragmentadas por algún tipo de vía de comunicación; "agropecuario"; dunas fragmentadas por parcelas o campos de cultivos y "mixtos", dunas fragmentadas por vías de comunicación, campos de cultivo y con localidades humanas dispersas. La proporción de cada tipo de categoría, con respecto al total, fue jerarquizada en valores de 0 a 4, para determinar el indicador predominante de las dunas por celda.

$$SIUD = iPUD$$

Donde:

SIUD= Subíndice de condición y uso de las DC

Con un indicador relacionado al tipo de uso de suelo

iPUD= indicador predominante o la sumatoria (si hay más de dos indicadores predominates) de ellos. El valor del indicador predominante es la proporción de cada categoría con respecto al total de la superficie de dunas; categorizado según el rango de vulnerabilidad (Tabla V-3):

Indicadores predominantes:

$iUDn$ = *SupDn/SupD;* indicador de dunas de uso natural

$iUDf$ = *SupDf/SupD;* indicador de dunas de uso fragmentado

$iUDa$= *SupDa/SupD* indicador de dunas de uso agropecuario

$iUDm$= *SupDm/SupD*; indicador de dunas de uso mixto

SupDn= Superficie de duna de cada categoría

SupD= Superficie total de dunas

Tabla V-3. Jerarquización de los valores del subíndice de condición y uso de las DC

Indicador	Rango de vulnerabilidad				
	0	1	2	3	4

uso de suelo, condición del suelo	si iUDn es > 75%	Si iUDn + iUDf es >65%	Si iUDa es> 50%	Si iUDa + iUDm es > 65%	si iUDm > 75%

Subíndice de presión humana (SIPH)

El cambio de uso de suelo, ligado al establecimiento de localidades en zonas costeras, como agricultura, desarrollo habitacional, desarrollo portuario y actividades de recreación, puede degradar parcial o totalmente un sistema de dunas, aumentando la vulnerabilidad del sistema. Para determinar el efecto de las poblaciones humanas sobre las DC, se evaluó la presión por número de localidades (índice de perforación) sumado a la densidad poblacional (número de habitantes por localidad) y el crecimiento de la población. El crecimiento de la población es la diferencia de número de población entre el tiempo 2 (2010) y el tiempo 1 (1995). El tiempo 1 corresponde al Conteo Nacional de Población y Vivienda 1995, mientras que el tiempo 2 corresponde al Censo Nacional 2010; ambos publicados por el INEGI (2015 a, b).

Debido a la ubicación de las DC y a su atractivo para actividades de recreación, también se evaluó el efecto de las poblaciones aledañas a los sistemas de DC (2 km). Esto es, aunque los sistemas de dunas no estén invadidos por localidades establecidas, podrían estar rodeadas por centros de población, de diferente magnitud, que a su vez podrían tener un efecto igual o mayor al de las poblaciones humanas sobre el sistema de DC. El rango de 2km corresponde al ancho promedio de los grandes sistemas de DC del país. Por lo que consideramos esa distancia para determinar la presión de las localidades humanas circunvecinas de las DC.

$$SIPH = SIPHint + SIPHext$$

Donde:

SIPH= Subíndice de presión humana

SIPHint= indicador de presión antrópica dentro del sistema de dunas

SIPHext= indicador de presión antrópica fuera del sistema de dunas

Con tres indicadores

$$SIPHint = iperf + iDens + iCP$$

$$iPerf = NLoc/SupD$$

$$iDens = Pob/SupD$$

$$iCP = \frac{Pob2 - Pob1}{Pob1}$$

Donde:

iPerf= indicador de perforación

iDens= indicador de densidad poblacional

iCP= indicador crecimiento de la población

NLoc= Número de localidades dentro del sistema de dunas

SupD= Superficie de dunas

Pob= Número total de habitantes en localidades dentro de dunas

Pob2= Población en 2010

Pob1= Población en 1995

Los resultados de las proporciones fueron categorizados según la magnitud de impacto, para homologar con los otros subíndices (Tabla V-4):

Tabla V-4. Jerarquización de los valores del subíndice de presión humana

Indicador	Rango de vulnerabilidad				
	0	1	2	3	4
Perforación (Per)	<0.1	>0.1<0.25	>0.25<0.5	>0.5<1	>1
Densidad poblacional (Dens)	<25	>25<50	>50<75	>75<150	>150
Crecimiento de la Población (CP)	<0.1	>0.1<0.25	>0.25<0.5	>0.5<1	>1

Para el indicador de presión antrópica fuera del sistema de dunas:

$$SIPHext = iPerf2k + iDens2k + iCP2k*$$

$$iPerf2k = NLoc2k/SupD$$

$$iDens2k = Pob2k/SupD$$

$$iCP2k = (Pob22k - Pob12k)/Pob12k$$

*los indicadores son las mismos que el SIPHint, pero corresponden a las localidades que se encuentran a 2km de los límites de las DC (tierra a dentro).

Índice de vulnerabilidad de dunas costeras (IVD)

Por último, el resultado de cada índice, fue sumado y dividido entre el total (5) para obtener un índice general de vulnerabilidad de dunas. Las celdas con valores cercanos a 0 fueron clasificadas como de baja vulnerabilidad, mientras que las que contaban con valores cercanos a 1 fueron clasificadas como de alta vulnerabilidad.

$$IVD = \frac{SICG + SIIE + SIIM + SIUD + SIPH}{5}$$

Tanto los resultados de cada indicador, subíndice e índice general fueron representados espacialmente para visualizar los patrones de su comportamiento en el área de estudio.

Para determinar el comportamiento de los datos e identificar el o los factores de mayor influencia sobre la vulnerabilidad de las dunas costeras, se obtuvieron y compararon los valores promedios tanto por índice como por estados costeros; tomando como base la información obtenida por cada celda analizada. Se aplicó, también, un análisis de varianza de un factor, para determinar si había diferencias significativas entre los valores de los cinco índices. Se utilizaron las regiones florísticas (Moreno-Casasola, 1998; Martínez et al., 2014, Espejel et al., 2015) como factor de influencia para este análisis. Además se agruparon los resultados por estado costeros (análisis cluster), para determinar asociación de resultados entre estados de ambos litorales.

Resultados

Subíndice de condición geomorfológica (SICG)

El 13% de las celdas presenta valores de 0 a 0.25 (vulnerabilidad baja), 36% de 0.251 a 0.5 (vulnerabilidad media), 34% de 0.51 a 0.75 (vulnerabilidad alta) y el 17% restantes valores cercanos a 1 (vulnerabilidad muy alta). Las dunas costeras de la costa del mar Caribe (principalmente Quintana Roo y Yucatán) y las del Golfo de California (Península de California) son las que presentan valores más altos de vulnerabilidad, seguidos de la costa

central del Océano Pacífico (entre Jalisco y Michoacán). Contrario a las anteriores los grandes sistemas de dunas de la costa central de Baja California (Pacífico Norte), Sinaloa y centro del Golfo de México son los que presentan valores más bajos. En resumen el 48% de las celdas se encuentran por debajo de la media de vulnerabilidad (0.5) mientras que el 52 restante es influenciado por su condición geomorfológica (Figura V-2). Los sistemas de dunas más extensos se encuentran en los estados de Tabasco y Baja California Sur (Figura V-3). No obstante, el promedio de anchura de dunas en las dunas de Baja California Sur se ve influenciado por los valores extremos de anchura del sistema de DC de El Vizcaíno-Guerrero Negro, ya que la mayoría de las DC de este estado no superan los 300 m de ancho. En el caso de las DC de Península de Yucatán (especialmente Quintana Roo) su distribución está registrada en casi todo el litoral, sin embargo se trata de dunas frontales muy angostas lo que hace que su condición geomorfológica aumente los valores de vulnerabilidad. Los estados costeros más escasos en distribución y extensión de DC se encuentran en la costa del Pacífico sur, específicamente Jalisco y Michoacán.

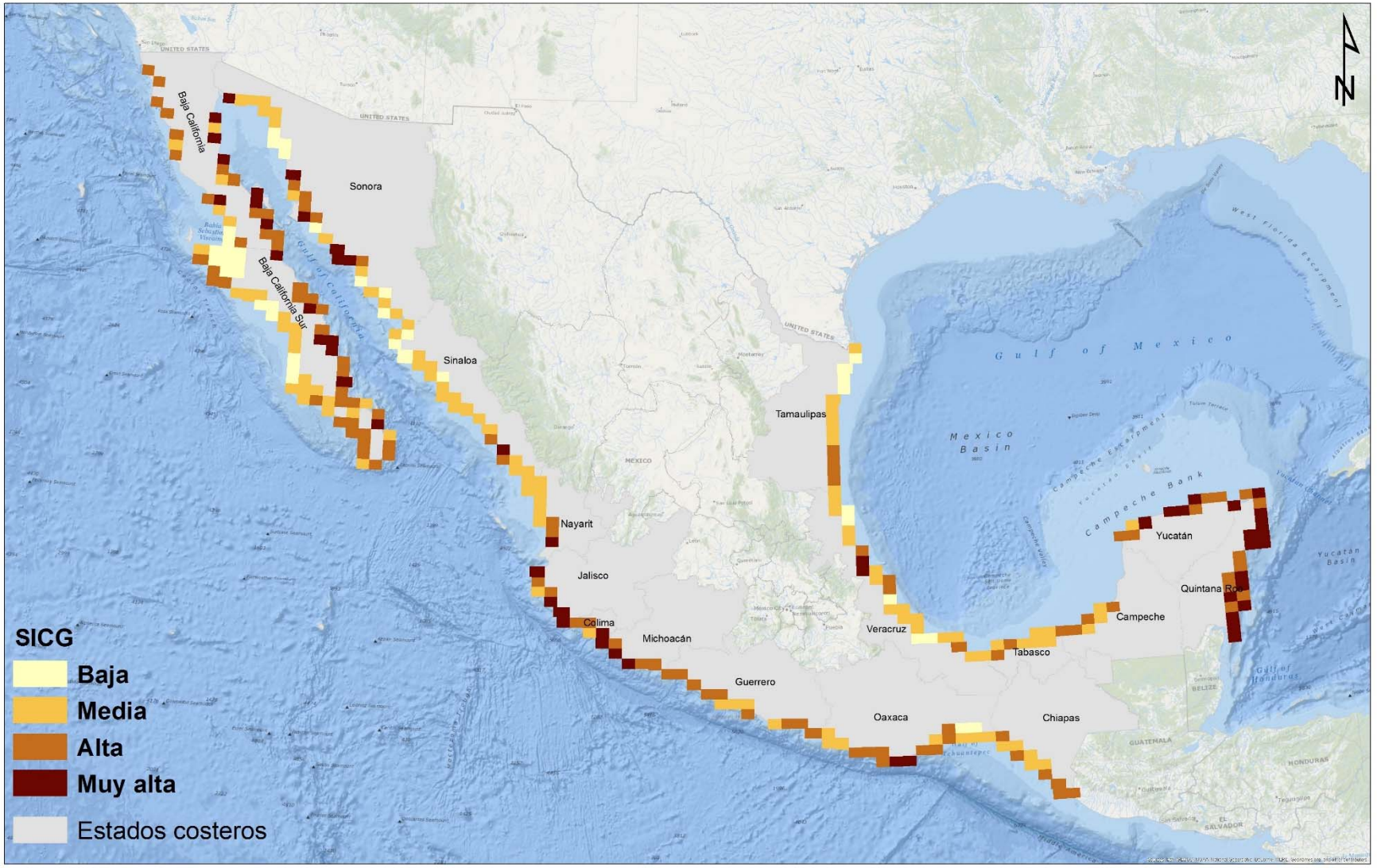

Figura V-2. Mapa del subíndice de condición geomorfológica. SICG: Subíndice de condición geomorfológica.

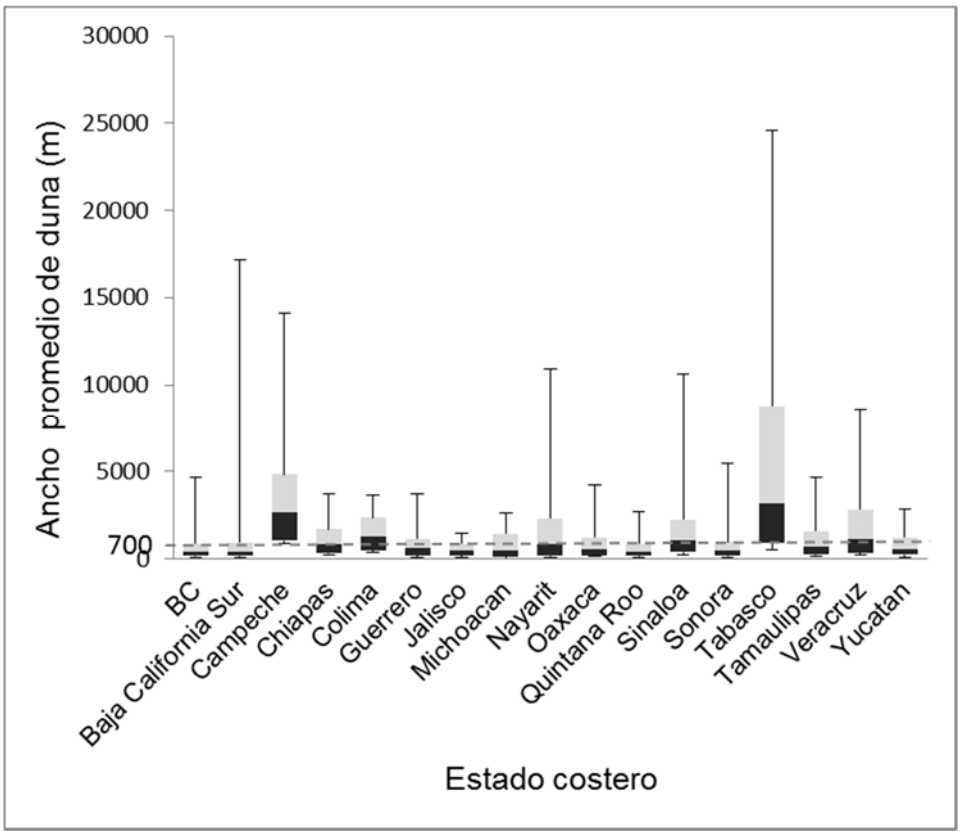

Figura V-3. Ancho promedio de los sistemas de dunas por estado costero.

Subíndice de influencia marina (SIIM)

En este subíndice se puede apreciar una delimitación más marcada entre las costas erosivas y acumulativas. El 30% de las celdas evaluadas presentan valores de 0 vulnerabilidad (baja) ya que son costas arenosas acumulativas, 30% presentan valores de vulnerabilidad 0.5 (media), ya son costas arenosas estables con procesos de erosivos más equilibrados; mientras que en el 40% restante dominan valores de 1, lo que indica que son costas altamente erosivas. En la figura V-4 se observa que las costas del Pacífico norte son costas con altos rangos de vulnerabilidad por influencia marina al igual que las costas del Caribe, Tamaulipas, Tabasco y Campeche. Por otro lado, las costas del Golfo de California (Península de Baja California) y Pacífico sur (desde Jalisco a Oaxaca) el efecto de la influencia marina sobre la vulnerabilidad es relativamente bajo. Mientras que la costa de Sonora, Sinaloa, Chiapas y gran parte del centro del Golfo de México los valores son de vulnerabilidad media (Figura V-4).

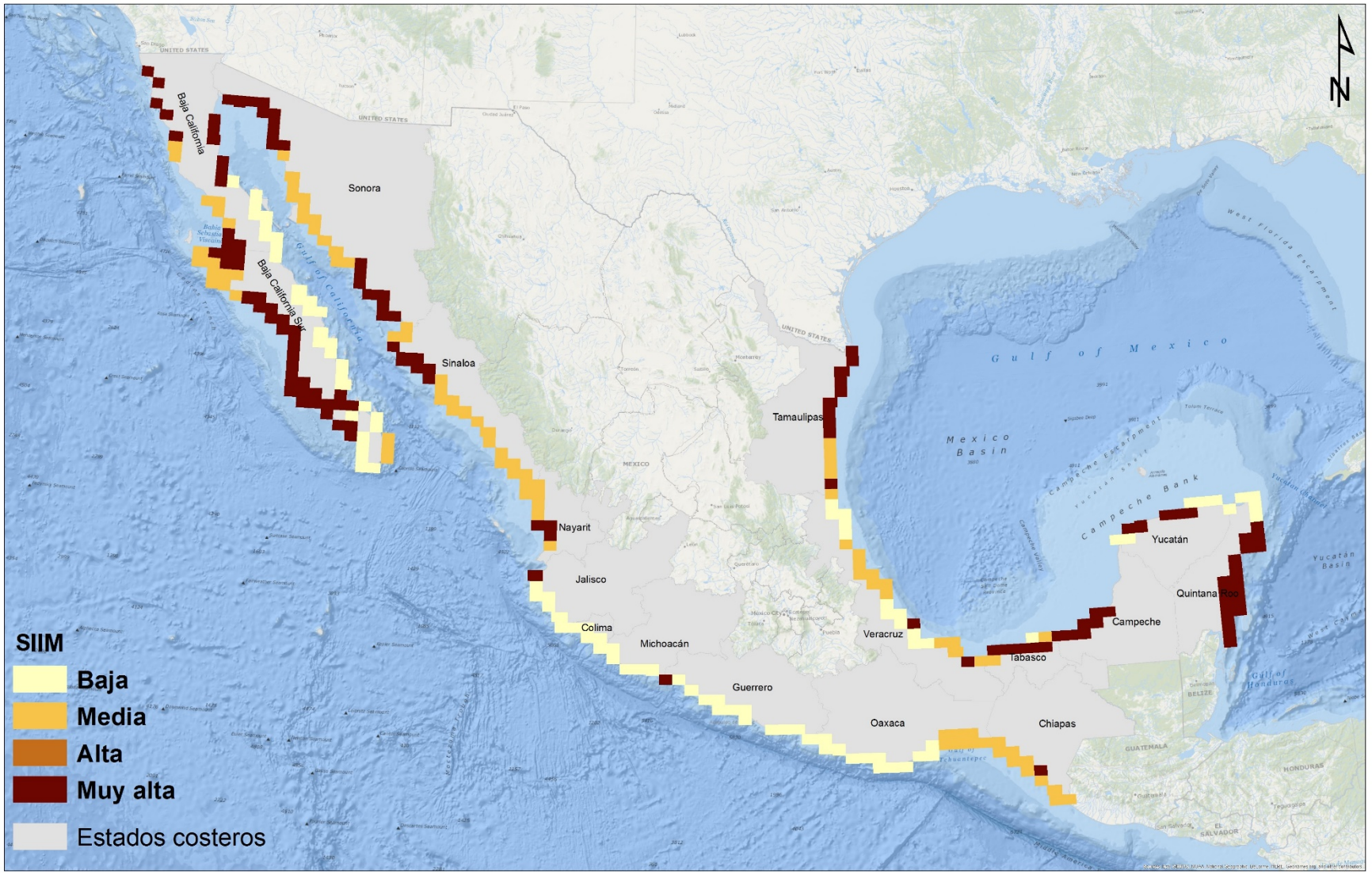

Figura V-4. Mapa del subíndice de influencia marina. SIIM: Subíndice de influencia marina.

Subíndice de influencia eólica (SIIE)

La costas arenosas del país han sido impactadas por alrededor de 300 fenómenos meteorológicos en los últimos 50 años (Figura V-5). El número de eventos por categoría desciende desde 144 depresiones y tormentas tropicales, 66 huracanes categoría 1, 39 categoría 2, 22 categoría 3, 21 categoría 4 hasta diez categoría 5. Aunque el impacto de los fenómenos meteorológicos es similar en ambos litorales, la suma y frecuencia de huracanes en las costas del Golfo de México, mar Caribe y Pacífico sur permite que los datos de vulnerabilidad por influencia eólica sean mayores en estas. El 57% de las celdas obtuvieron valores por debajo de 0.5 de vulnerabilidad (47 % corresponde a vulnerabilidad media), mientras que 43% restantes (33% vulnerabilidad alta) presentan valores arriba de 0.51 (Figura V-6). No se observa un patrón de distribución marcado a lo largo de todo el litoral, sin embargo en las costas del Pacífico sur, entre Jalisco y Guerrero, los valores corresponden a la categoría “alta”. La distribución de los valores más altos, >0.751, se registraron en las DC del norte de Sonora y algunas celdas de Nayarit, Veracruz y Tabasco.

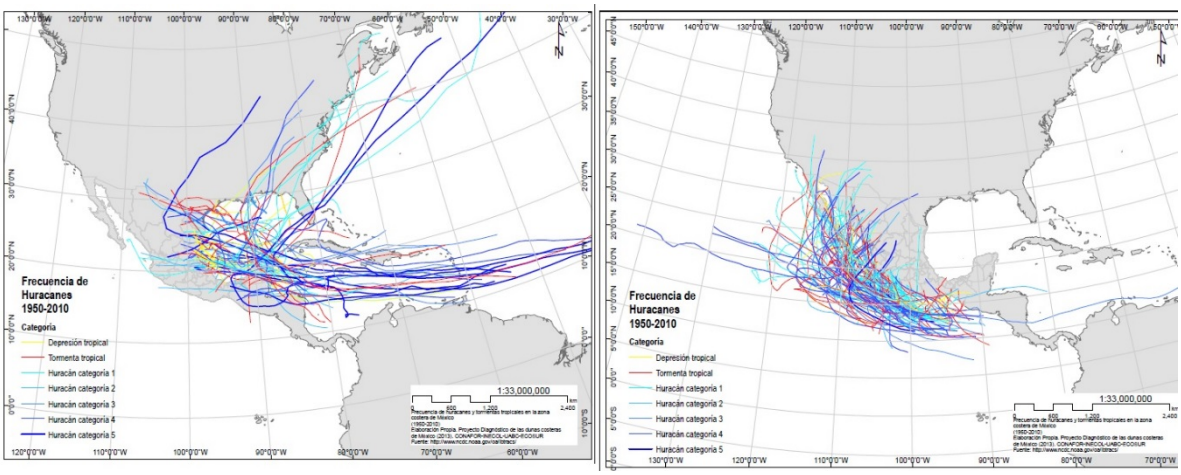

Figura V-5. Frecuencia de tormentas tropicales y huracanes en las costas de México en os últimos 50 años. Elaboración propia con base en los datos de Knapp et al, 2010.

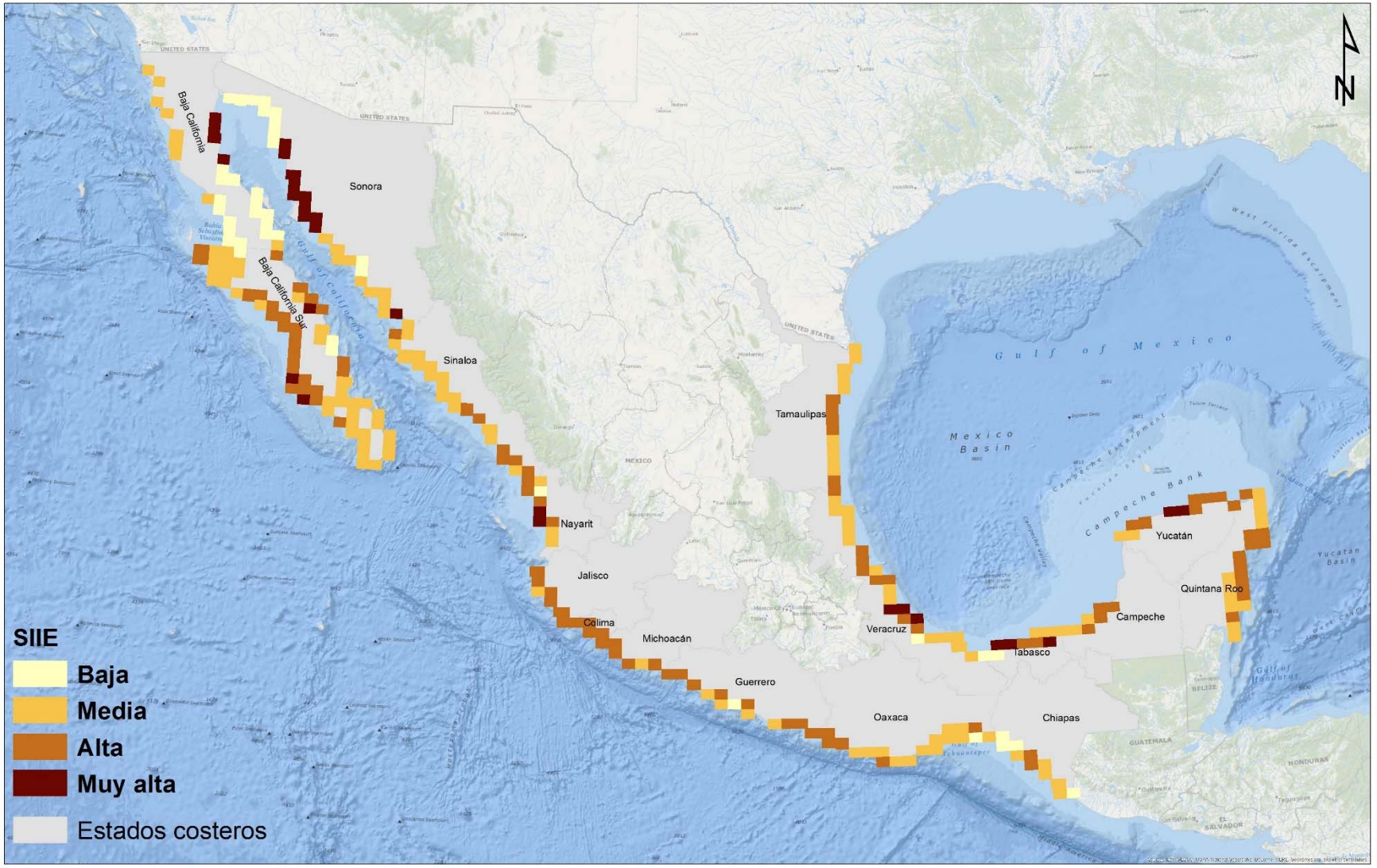

Figura V-6. Mapa de subíndice de influencia eólica. SIIE: Subíndice de influencia eólica.

Subíndice de condición y uso de las DC (SIUD)

Este es el único subíndice en el que se puede observar un marcado patrón de distribución de los datos entre las diferentes regiones costeras del país: en las costas del norte del país, en ambos litorales, se aprecian valores bajos en la vulnerabilidad influenciada por las actividades de uso sobre las DC, mientras que en las costas del Pacífico sur, desde Nayarit hasta Chiapas, los valores son de vulnerabilidad media a alta. La combinación de usos agropecuarios y localidades urbanas es muy característica sobre los cordones de dunas frontales del sureste mexicano. Aquí resalta la existencia de un primer cordón, cercano a la línea de costa, en buen estado, seguido de una combinación de parches de vegetación natural (principalmente selva baja o espinosa) y áreas de uso agropecuario. En el Golfo de México, en los estados de Veracruz, Tabasco y sur de Campeche, el uso de suelo agropecuario ha alcanzado las zonas de DC, a excepción de los grandes sistemas de DC móviles del centro de Veracruz. Por último, en las costas de la región caribe, los cordones de dunas frontales se encuentran en condiciones naturales, por lo tanto los valores de vulnerabilidad se encuentran en la categoría “baja” (Figura V-7).

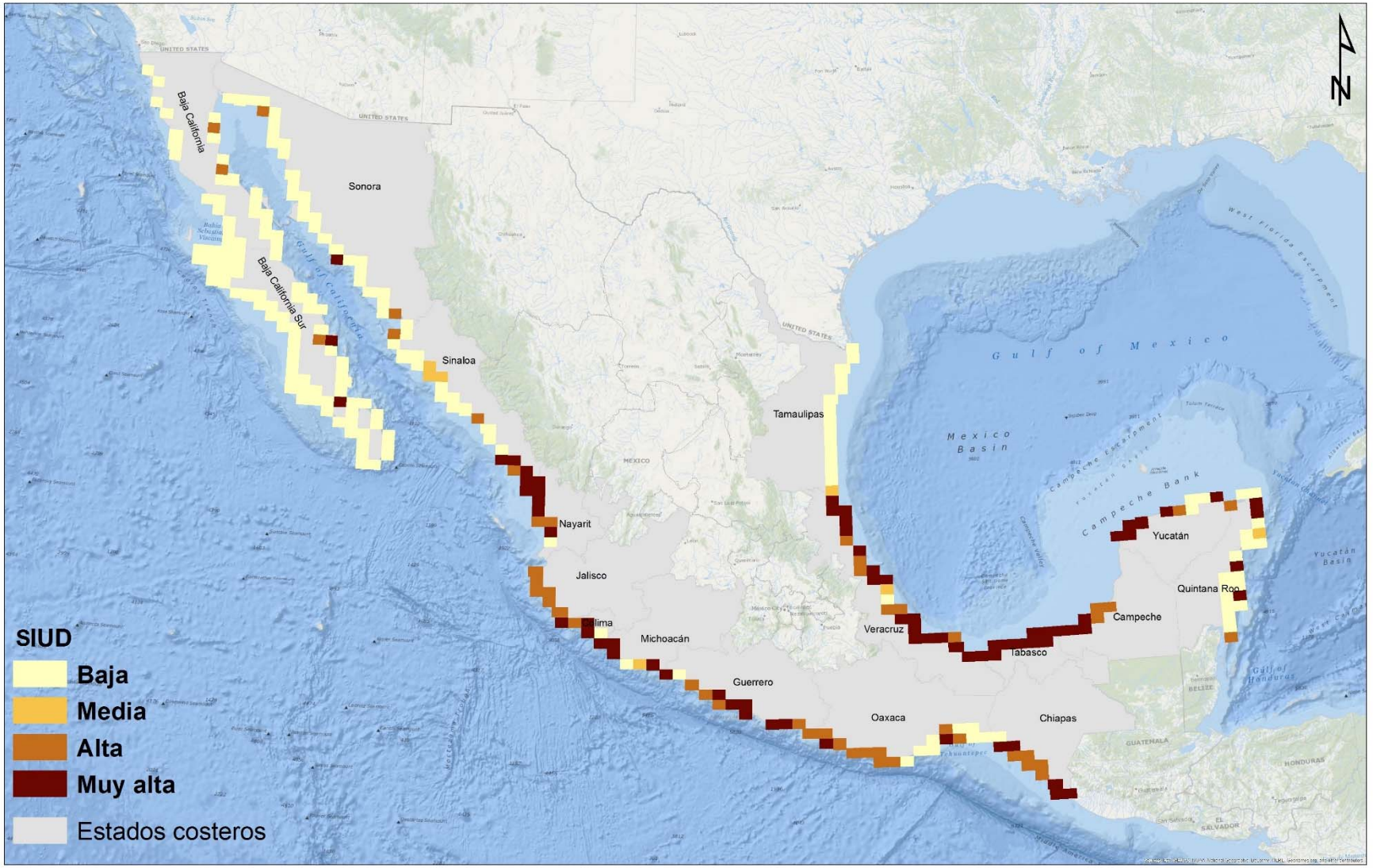

Figura V-7. Mapa de subíndice de condición y uso de las DC. SIUD: Subíndice de condición y uso de las DC.

Subíndice de presión humana (SIPH)

Aunque no tan marcado como el subíndice de condición y uso de las DC se pueden apreciar diferencia en los valores calculados a lo largo de las costas del sur y las del norte del país. Para el año 2010 se registraron 992 localidades (con un total de 119,497 habitantes) ubicadas dentro de algún sistema de DC, de las cuales el 23% cuenta con menos de 100 habitantes, 18% con poblaciones entre 100 y 2500 habitantes y solo el 3% cuentan con más de 2500 habitantes. Lo anterior indica que las localidades que se encuentran sobre DC son localidades catalogadas como rurales (Figura V-8). Es importante recalcar que el 56% de las celdas analizadas no presentan datos de población (Figura V-9), dado que no existen localidades humanas sobre las DC.

Por otro lado, el número de localidades que se encuentra alrededor de las DC es tres veces menor que el que se encuentra sobre las DC. No obstante, la población en estas localidades (alrededor de las DC) es mayor, lo que determina mayor presión externa por densidad poblacional y representa una mayor contribución del IPHext al subíndice de presión antrópica (Figura V-10). El número total de localidades alrededor de DC fue de 308, las cuales suman más de medio millón de habitantes (568,894 habitantes).

Respecto a la población alrededor de las DC, el 26 % de las celdas evaluadas alberga menos de 100 habitantes, mientras que en el 5 y 9 % más de 2, 500 y 5,000 habitantes, respectivamente. Similar que en las localidades dentro de dunas, la mayoría de estas localidades está catalogada como localidades rurales. También es importante señalar que el 30% de las celdas presentan sistemas de DC sin localidades cercanas.

El crecimiento de la población es similar en ambos casos, sin embargo la población alrededor de las dunas ha crecido en un 19%, respecto a 1995, mientras que la población sobre dunas ha aumentado en un 37.5%. De las celdas con localidades sobre dunas, el 30% se han mantenido estables, con nulo crecimiento o muy bajo, incluso disminuido; el 15% ha crecido entre el 10 y 50%, mientras que el 44% ha crecido hasta duplicar su población respecto a 1995. Destaca que el 15% de las localidades han duplicado o quintuplicado su población en los últimos 15 años. De estas últimas, destacan localidades ubicadas en la costa del centro del Golfo de México; asociadas a desarrollos turísticos.

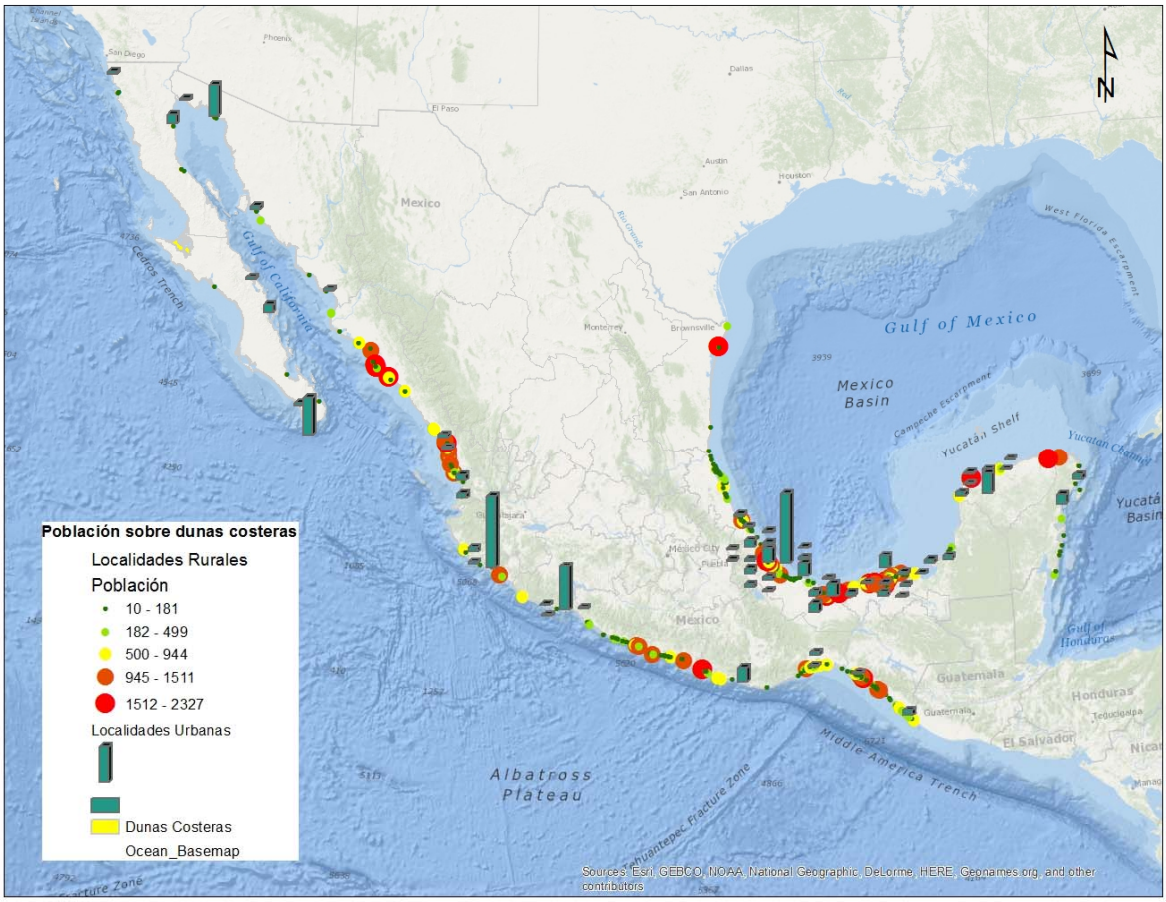

Figura V-8. Distribución de localidades humanas sobre DC. Las DC de la península de Baja California, Sonora y norte de Tamaulipas, prácticamente no presentan valores de población humana, con algunas excepciones.

Figura V-9. Mapa de influencia de presión antrópica. SIPH: Subíndice de presión humana.

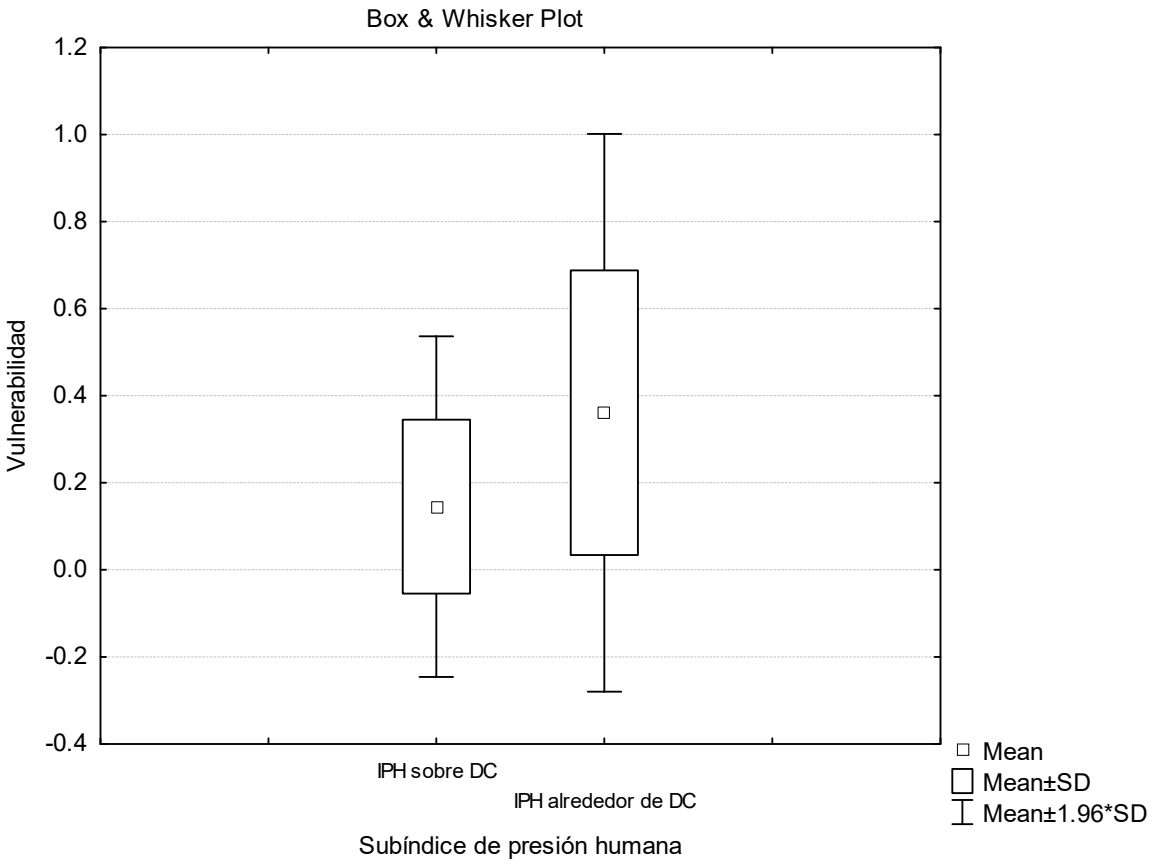

Figura V-10. Gráfica de caja donde se observa mayor influencia de la presión de las localidades alrededor de DC sobre el subíndice de presión humana.

Índice de vulnerabilidad general (IVD)

Las 800 mil hectáreas de DC del país se distribuyen en 308 celdas; 219 en el litoral Pacífico, de los cuales 103 corresponden al litoral del Golfo de California, y 89 al litoral Atlántico. Alrededor del 60% de las celdas presentan valores de vulnerabilidad entre 0.25 y 0.5 (vulnerabilidad media), 37% presentan valores entre .51 y 0.75 (vulnerabilidad alta), mientras que los valores de vulnerabilidad alta y muy alta solo se distribuyen en el 4% de las celdas, 2.7 y 1.3% respectivamente (Figuras V-11 y V-12). Se observa que la costa del litoral Atlántico y Pacífico sur, es donde se encuentran las celdas con valores de vulnerabilidad alta, principalmente en la región del mar Caribe (Campeche y Quintana Roo) (Figura V-11; Cuadro V-1).

Seis de los estados costeros se encuentra por debajo de la media (promedio general) de vulnerabilidad (0.5). Resaltan los estados del Pacífico norte y Golfo de California (Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa; así como Oaxaca. Es importante señalar que solo uno (Tamaulipas) de los seis estados costeros de la costa del Atlántico se encuentra por debajo de la media. Lo anterior se puede apreciar en el mapa de vulnerabilidad general, donde los estados del norte del país es donde se encuentran los sistemas de DC mejor conservados (Figura V-11).

Por otro lado, los estados con valores más altos de vulnerabilidad son Campeche y Tabasco (0.67 y 0.64, respectivamente), seguidos de Michoacán, Quintana Roo y Yucatán. Todos estos estados, excepto Michoacán, corresponden a litoral sureste del Golfo de México y Mar Caribe.

En el cuadro V-1 se puede apreciar que los estados con valores promedio mayores de vulnerabilidad general también presentan valores altos de vulnerabilidad por el factor de influencia del SIUD. Nueve estados presentan valores por arriba del 0.75 de vulnerabilidad (muy alta), resaltan Tabasco, Veracruz, Campeche y Nayarit.

Cuadro V-1. Valores de vulnerabilidad promedio por estados costeros. Los estados de la región del Caribe presentan los valores promedios más altos. En negritas los valores promedios más altos.

Estado costero	$\overline{X}$ SICG	$\overline{X}$ SIIE	$\overline{X}$ SIIM	$\overline{X}$ SIUD	$\overline{X}$ SIPH	$\overline{X}$ IVD
Baja California	0.64	0.33	0.66	0.18	0.22	0.41
Baja California Sur	0.49	0.53	0.66	0.18	0.18	0.41
Campeche	0.56	0.49	**1.00**	**0.89**	0.42	0.67
Chiapas	0.54	0.28	0.55	**0.82**	0.39	0.51
Colima	0.71	0.59	0.25	**0.75**	0.28	0.51
Guerrero	0.63	0.50	0.25	**0.83**	0.37	0.52
Jalisco	0.74	0.59	0.36	**0.79**	0.39	0.57
Michoacán	0.77	0.58	0.36	**0.82**	0.43	0.59
Nayarit	0.48	0.49	0.67	**0.86**	0.20	0.54
Oaxaca	0.55	0.46	0.34	0.57	0.29	0.44
Quintana Roo	**0.81**	0.51	**0.85**	0.38	0.35	0.58
Sinaloa	0.40	0.49	0.63	0.45	0.16	0.43
Sonora	0.51	0.47	**0.78**	0.24	0.14	0.43

Tabasco	0.46	0.58	**0.78**	1.00	0.39	0.64
Tamaulipas	0.39	0.47	**0.83**	0.23	0.17	0.42
Veracruz	0.45	0.46	0.40	**0.89**	0.39	0.52
Yucatán	**0.75**	**0.62**	0.59	0.72	0.22	0.58

Con la agrupación de los estados costeros (análisis cluster), por valores promedios de vulnerabilidad del total de celdas, por el total de subíndices de influencia, se pueden apreciar tres grandes grupos (Figura V-13) los estados con valores promedios generales más bajos (Baja California, Baja California Sur, Sonora, Tamaulipas y Sinaloa). En esta agrupación se puede observar que el estado de Quintana Roo es conectado con este grupo, ya que la mayoría de sus valores por celda se encuentran en la categoría de vulnerabilidad media; 2) los estados con valores más altos (Campeche, Tabasco); 3) Por último, se forma otro gran grupo donde se aprecian subgrupos de estados con sistemas de DC con características geomorfológicas similares, por ejemplo Colima-Guerrero, Michoacán y Jalisco.

.

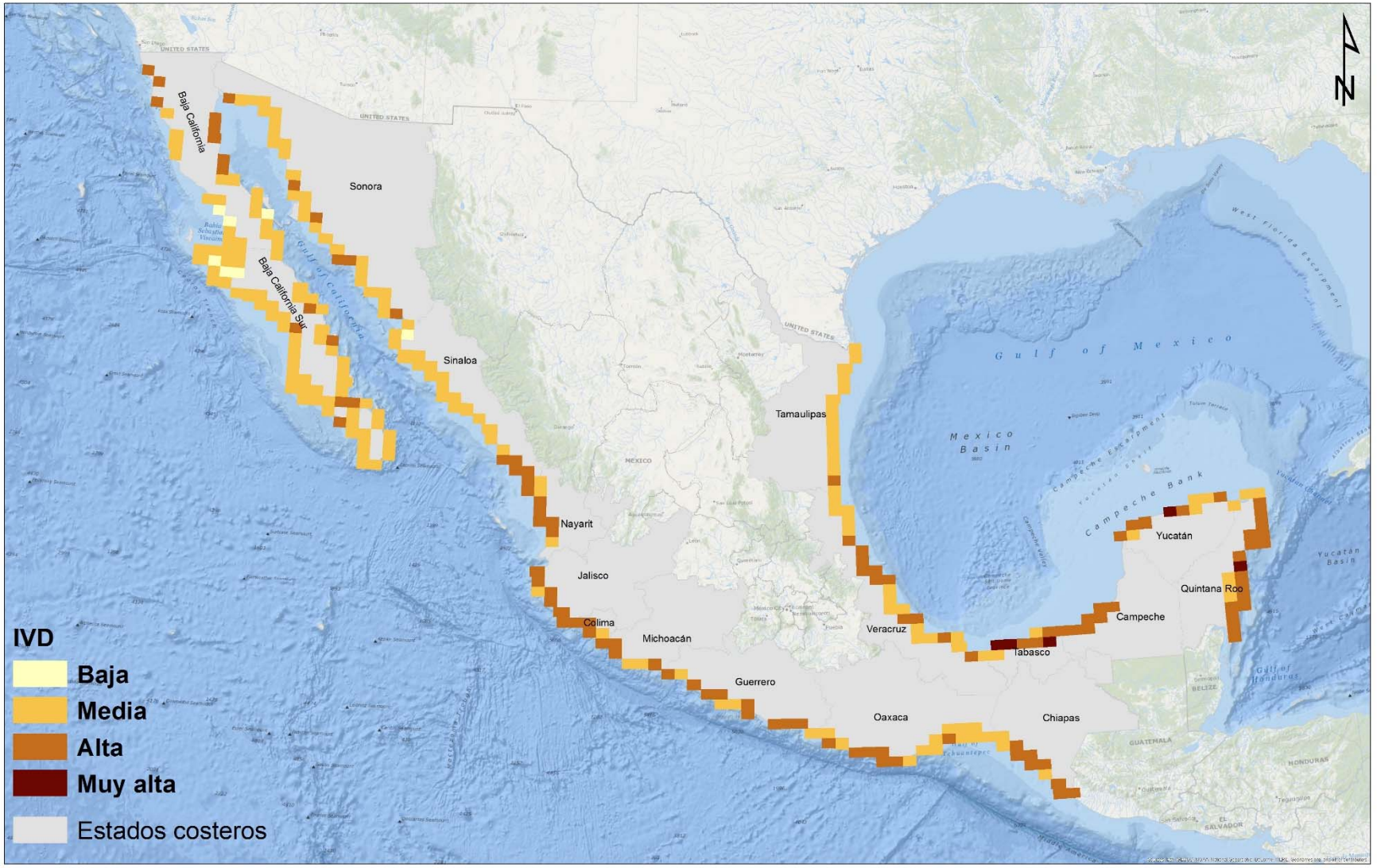

Figura V-11. Mapa de Índice de vulnerabilidad total de las DC.

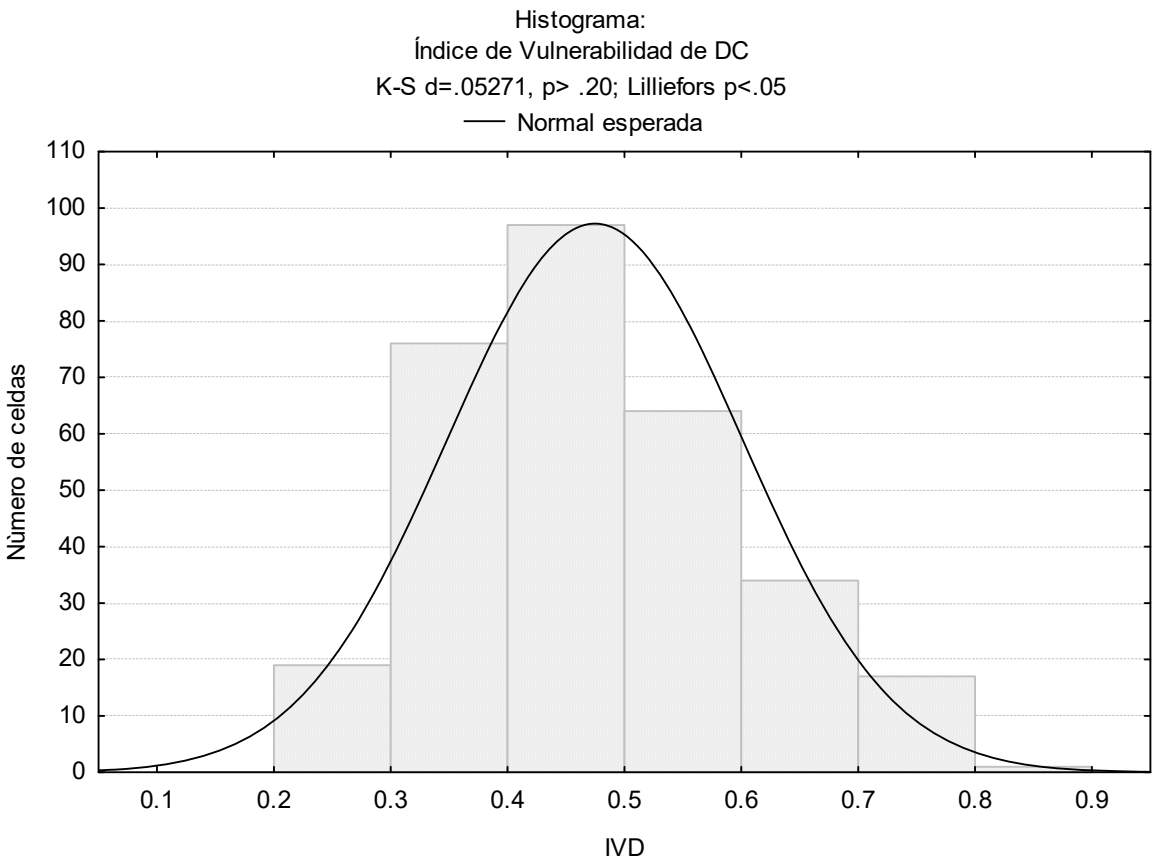

Figura V-12. Histograma de distribución de los valores del IVD general. La mayoría de los valores se encuentran entre los valores 0.3 y 0.6 del índice. El histograma se refiere al número total de celdas evaluadas.

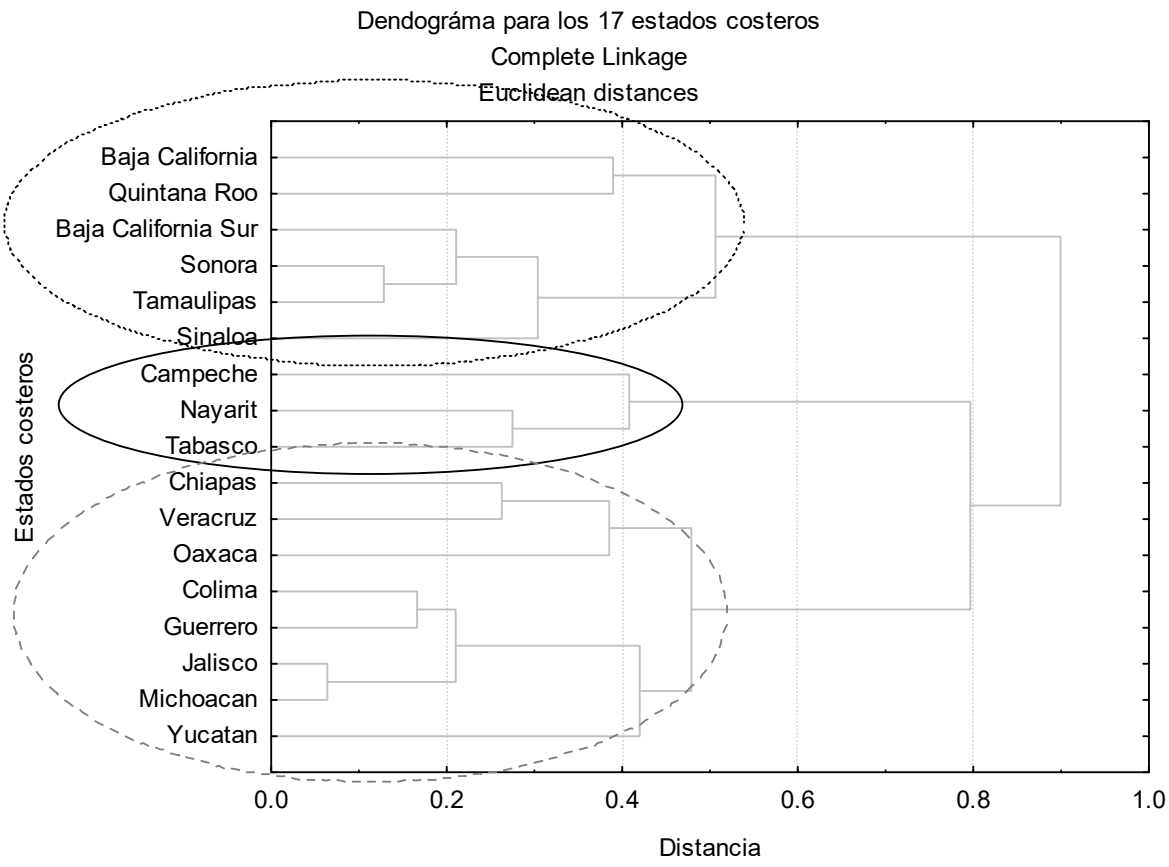

Figura V-13. Dendográma de agrupación de valores promedios de vulnerabilidad por los cinco factores de influencia

De acuerdo con el análisis de varianza se puede distinguir que existen diferencias significativas entre índices y regiones. No se observa una relación directa entre los valores promedios entre subíndices, sin embargo los subíndices de uso de dunas y presión antrópica se comportan de manera similar en las regiones del Pacífico norte y Golfo de California. Estos subíndices presentan los valores más bajos en estas regiones, aumentando consideradamente, principalmente el SIUD, en el Pacífico sur y costa del Atlántico (Figura V-14).

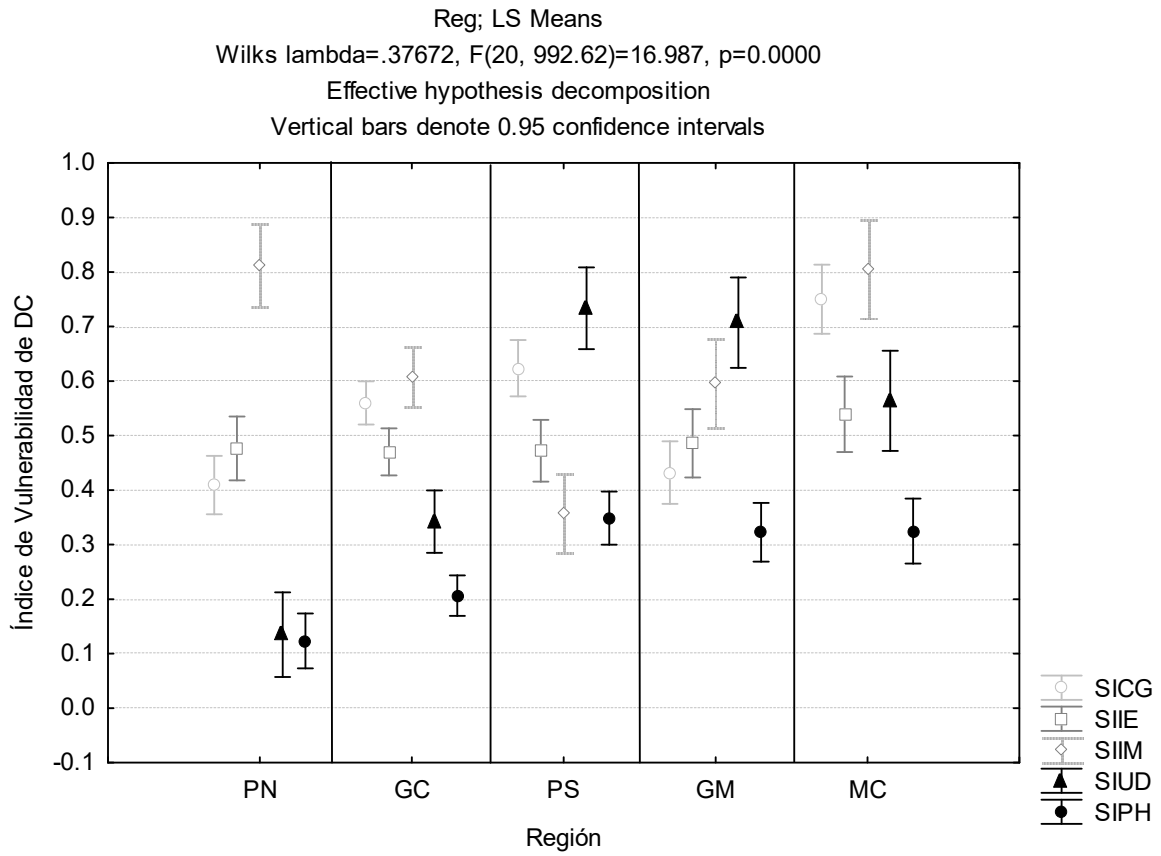

Figura V-14. Análisis de varianza del índice de vulnerabilidad por cada uno de los subíndices en las 5 regiones costeras del país. PN: Pacífico norte; GC: Golfo de California; PS: Pacífico sur; GM: Golfo de México; MC: Mar Caribe.

El Pacífico norte es la región en donde los valores promedios por subíndices se encuentran más separados (de menor a mayor valor). En esta región, se aprecia que los valores del SIUD y SIPH se encuentran en un rango parecido, lo mismo pasa con los valores del SICG y SIIE, mientras que los valores promedio del SIIM son los más altos, tanto en esta región como en las otras.

En las costas del Golfo de California, los valores promedios de los subíndices se encuentran más cercanos a la media general, a excepción del SIPH.

En el caso de las regiones del Pacífico sur y Golfo de México, la distribución de los valores promedios por subíndices son muy similares. En estas regiones los valores promedios del SIUD son los más altos. Así mismo, los valores promedio del SIPH son más altos que en el

Pacífico norte y Golfo de California, sin embargo aún se encuentran muy por debajo de la media general. Es importante señalar, que en el Pacífico sur es la región donde los valores promedio del SIIM son más bajos.

Por último en la región del Mar Caribe, el SIIM y SICG se presentan en un rango similar, dado que se trata de sistemas de DC muy pequeños expuestos a fenómenos erosivos constantes a lo largo de toda el litoral.

En general, el único subíndice que presenta una distribución más homogénea entre las regiones es el SIIE. Por otro lado, el subíndice de presión antrópica presenta los valores más bajos, la totalidad de los estados costeros presentan valores promedios por debajo de 0.5, resultado de la poca distribución de asentamientos humanos sobre dunas costeras y que además se trata principalmente de asentamiento de localidades rurales (menores a 2500 habitantes (Figura V-15).

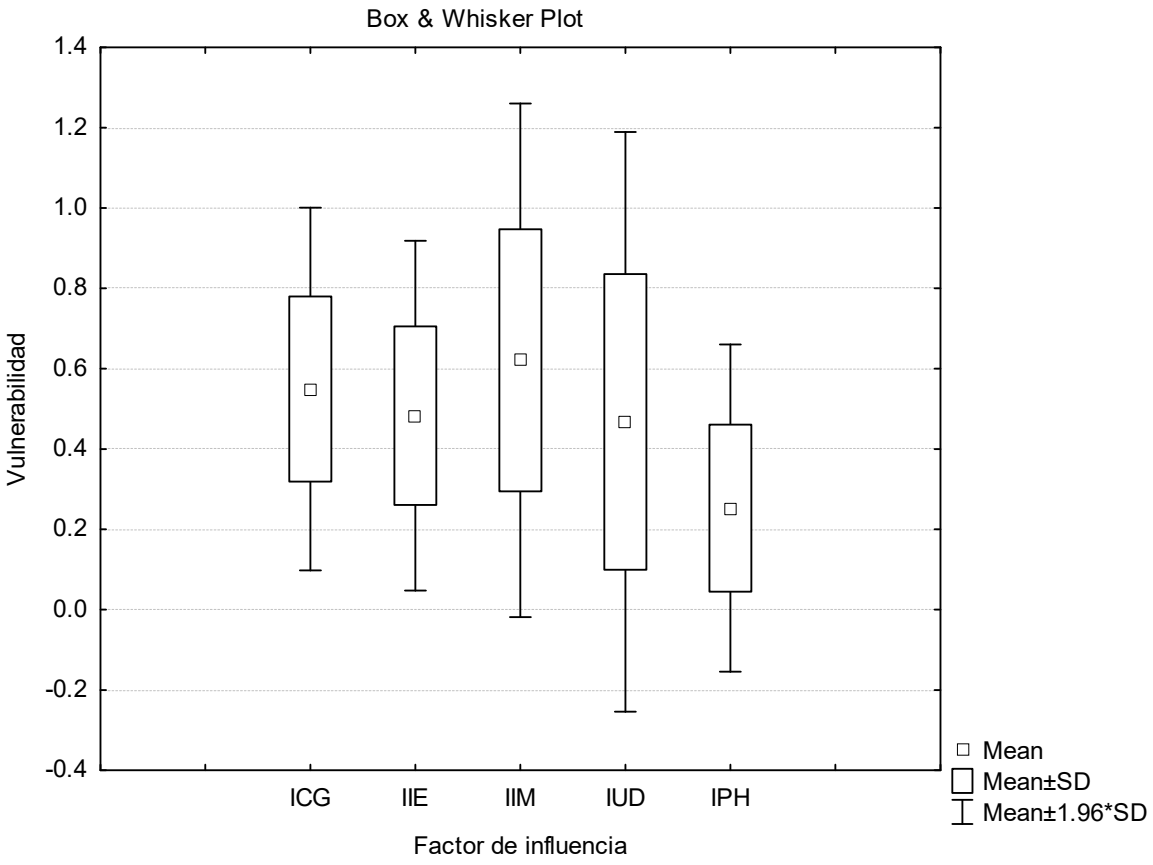

Figura V-15. Gráfica de cajas donde se representan los valores de vulnerabilidad por cada factor de influencia. El subíndice de influencia marina presenta los valores más altos

Discusión

La superficie total de DC ronda en los 800, 000 ha, sin embargo, para este capítulo no se tomaron en cuenta las dunas que han sido urbanizadas (según Jiménez-Orocio et al., 2014) lo que significa que no se evalúo el 10% de las DC del país. Esto quiere decir que en el país se han perdido de manera irremediable el 10% de la cobertura de DC; esto sin contar la superficie que es ocupada para actividades agropecuarias. Dado que las DC urbanizadas no pueden regresar de ninguna manera a su forma original, al menos no en su totalidad, ya no presentan las condiciones suficientes para prestar servicios ambientales. Por lo tanto, la vulnerabilidad de estas DC es permanente. Al perder su capacidad para enfrentar los impactos de origen externo (naturales o no naturales), estos sistemas heredan la vulnerabilidad a los ambientes o desarrollos urbanos que los suplen. Es decir, la alta vulnerabilidad de los

sistemas de DC degradados se transforma en un factor de riesgo para las poblaciones humanas sobre la costa.

Subíndice de condición geomorfológica

El comportamiento del subíndice de condición geomorfológica depende estrictamente de la cobertura del sistema de DC evaluado. No obstante, el aporte de sedimento y la topografía de los sistemas de dunas son los que van a determinar la capacidad de auto-mantenimiento de los sistemas de DC del país. En las costas de la península de Baja California los resultados son contrastantes dependiendo de la ubicación de las DC, de la vertiente del litoral Pacífico o del Golfo de California. En ambos casos, la historia geológica ha influido en la formación de grandes sistemas arenosos (Ortiz-Pérez y de la Lanza, 2006; Murillo de Nava y Gorslite, 2000) de dimensiones amplias en el litoral pacífico (que se concentra en el centro de la península) a estrechos cordones de dunas frontales asociados a bahías en el Golfo de California. Este mismo comportamiento se observa en las costas del centro del Golfo de México donde el aporte de sedimento de los grandes sistemas fluviales, sumado al acarreo litoral dominante y dirección predominante del viento norte-sur, influyen directamente a un balance de sedimentos positivo y que los sistemas de DC sean considerados como un gran almacén de arenas. No obstante, a diferencia de los sistemas de DC del noroeste del país, la cercanía de estos sistemas al creciente desarrollo de las comunidades humanas y tierras de uso agropecuario, permiten que sean considerados más vulnerables.

La topografía de los sistemas de DC del Pacífico sur, sureste del Golfo de México y Península de Yucatán, dispuestos en planicies de dunas frontales influye en que estos sistemas, aparentemente poco vulnerables por su extensión, lo sean frente a otros factores de perturbación externa, por ejemplo aumento relativo del nivel del mar. Lo anterior, es evidenciado en los escenarios de inundación propuestos por Ortiz-Pérez y Méndez-Linares (2004) y la Universidad de Arizona (http://www.geo.arizona.edu/dgesl/research/other/climate_change_and_sea_level/mapping_slr/) para las zonas bajas de la costa mexicana. Así mismo, la transformación de estos tipos de DC a uso de suelo agropecuario frena la capacidad de estos sistemas de recuperarse o adaptarse ante cambios influidos por estos factores de perturbación externa. Como se mencionó anteriormente, las DC de estas regiones se encuentran por debajo de los 2m de

altura y generalmente se trata de sistemas totalmente estabilizados con aporte de sedimentos variable.

Subíndices de influencia marina y eólica

Los resultados del subíndice de influencia marina se basaron estrictamente en el comportamiento de la geodinámica costera. Los autores de la fuente de datos utilizada (Silva-Casarín et al., 2014, basados en Ortiz-Pérez y Méndez-Linares, 2004) indican que la descripción costera está desarrollada en función de la historia geológica, orientación y la propia geomorfología costera, es decir caracterización a gran escala y de largo plazo, y que puede no coincidir con el comportamiento actual. Los resultados de este subíndice reflejan el efecto el comportamiento antes mencionado. Las DC del Pacífico norte están sujetas a oleaje de media-alta energía que moldea la forma de la línea de costa. No obstante, Silva-Casarín et al. (2014), mencionan que los procesos erosivos no corresponden al clima oceánico "normal" sino al efecto del oleaje de tormenta, donde los eventos meteorológicos juegan un papel muy importante. Los procesos erosivos atribuidos al oleaje de tormenta son documentados ampliamente por Ortiz-Pérez (1992), Ortiz-Pérez y Méndez-Linares (2004) y Hernández-Santana (2006) para las costas de Tabasco y Jiménez-Orocio (2008), para Veracruz. Ortiz-Pérez (1992), contabiliza cambios de línea de costa (sobre dunas frontales) tierra adentro de hasta 15 m, en 40 años de análisis, en la costa adyacente al río San Pedro (Tabasco). Estos autores, destacan que el desplazamiento erosivo de la línea de costa no influye solamente en la morfología costera sino en la infraestructura urbana, ya que documentan la pérdida de una de las vías de comunicación más importante entre los estados de Tabasco y Campeche. En este mismo sentido, Hernández-Santana et al. (2008), documenta la pérdida de playa-duna para otro sector de la costa tabasqueña, ríos San Pedro y san Pablo, describiendo también la pérdida de infraestructura urbana. Por su parte, Jiménez-Orocio (2008), compara el comportamiento de la línea costera en dos tipos de costa arenosas (longitudinal y curveada), resaltando que el comportamiento erosivo en las costas longitudinales es oscilatorio, es decir responde a la dinámica sedimentaria del acarreo litoral y a la deposición por efecto del oleaje. Sin embargo, el autor describe una tendencia erosiva en ambos tipos de costa, especialmente en las costas cercanas a desarrollos urbanos. En este sentido, Ortiz- Pérez y de la Lanza-Espino (2006), discuten, para las barreras arenosas del

Sonora y Sinaloa, que aunque estas morfoestructuras son una representación del aporte mayúsculo de sedimentos hacía la costa por orden fluvial, también destacan que la interrupción del aporte fluvial por represas y el azolve de lagunas costeras por actividades agrícolas tendrá un efecto negativo en la permanencia de los sistemas dunares. Lo anterior, también es descrito por Bojórquez et al. (2008) para los cordones de dunas frontales de Nayarit, Mellink y Riojas-López (2007) para las barras arenosas adyacentes a la laguna de Cuyutlán (Colima) y González-Vázquez et al. (2014) para las barras arenosas de Barra de Navidad (Jalisco).

Los datos de vulnerabilidad por influencia marina en las costas del Pacífico sur describen dunas poco vulnerables, sin embargo la geomorfología de las dunas frontales de esta zona, podría exponer de manera significativa, al menos para el primero cordón de dunas, la existencia de estos sistemas. De acuerdo con escenarios de aumento del nivel del mar (INECC, 2013) las costas cercanas al Istmo de Tehuantepec (Oaxaca) y lagunas costeras de Chiapas son propenso a escenarios de inundación, debido a la baja topografía de los cordones dunares. Las observaciones de campo realizadas en las costas del sur de Chiapas pudieron evidenciar los escarpes de erosión, y la pobre recuperación del balance sedimentario.

Para el caso del oleaje, Silva-Casarín et al. (2014), subrayan que el peligro por oleaje en las costas mexicanas puede ser de dos tipos: a) por oleaje lejano (costa central y sur del Pacífico), es decir olas de gran amplitud y período; b) y oleaje de tormenta, que generalmente ocurre como resultado de tormentas tropicales y huracanes y viene acompañado de fuerte vientos y de una sobre elevación del mar por efecto de los vientos y las bajas presiones. Esta diferenciación puede explicar, que los valores de vulnerabilidad por influencia marina en las costas del Pacífico sur sean más bajos, en comparación con el Golfo de México y mar Caribe y Pacífico norte.

Aunque el subíndice de influencia eólica no muestra un claro patrón de incidencia sobre alguna región de las DC del país, Jáuregui (2003) y Martínez et al. (2014) mencionan que los diez huracanes más fuertes que han golpeado las costas mexicanas durante los últimos 30 años revelan un impacto significativo sobre los ecosistemas costeros. Los autores indica que Quintana Roo fue el estado que recibió el 40% de huracanes categoría 4 o 5, seguido por

Veracruz y Sinaloa (cada uno con 20%). Sobre el impacto en DC destaca el huracán Wilma (2005) que destruyó gran parte de las ya de por si degradas dunas frontales de Quintana Roo. Así mismo, Seingier et al. (2009) mencionan que la franja costera que más dunas ha perdido es la de Cancún.

La ocurrencia de eventos meteorológicos sobre las DC puede ser considerada tanto de manera benéfica como negativa.

En este trabajo consideramos a los eventos meteorológicos como una presión natural sobre las DC. Sin embargo, también reconocemos que aunque la fuerza de los vientos y las grandes cantidades de agua que caen en forma de lluvia durante las tormentas tropicales y los huracanes pueden producir pérdidas cuantiosas (capital económico y humano) (Martínez et al., 2014), el aporte de sedimento hacia la línea costera es considerable y permite el restablecimiento de la dinámica sedimentaria natural. Como mencionan Okasaki et al. (2001) el aporte de sedimentos del río Tecolutla por descargas fluviales, después de eventos hidro-meteorológicos, contribuyen en gran medida al mantenimiento de las playas y dunas frontales adyacentes. Es por esta razón que Oropeza et al. (2011) no considera los factores físicos en su análisis de la vulnerabilidad de dunas de Veracruz. Los autores mencionan que no es posible cuantificar el efecto de los meteoros, ya que juegan un papel constructivo más que destructivo. No obstante el aumento en la frecuencia de eventos, si puede ser considerado como presión. En este sentido, Silva-Casarín et al. (2014) mencionan que durante los huracanes se presenta no sólo oleaje extremo sino marea de tormenta, la cual incrementa la capacidad de daño del oleaje pues éste rompe directamente sobre las playas y/o estructuras costeras, debido a la sobre elevación del mar. De acuerdo con Tunnel y Judd (2002), para las dunas de Tamaulipas, este proceso, aunque natural, se convierte en amenaza para las dunas frontales cuando la frecuencia de eventos hidrometeorológicos extremos se incrementa.

Subíndices de condición y uso de las DC y presión antrópica

El efecto de la presión antrópica ha sido documentado en innumerable ocasiones en una gran diversidad de sistemas de dunas a nivel mundial (Martínez y Psuty, 2004). Como lo discutimos en el capítulo del uso actual de las DC en el país (capítulo 3), el SIUD está emparentado con la presión antrópica. La baja vulnerabilidad de las DC del norte del país, en ambos litorales, se debe principalmente a su lejanía de los centros de población. No obstante,

hemos detectado algunos sistemas de dunas puntuales con altos valores de vulnerabilidad, correspondiente a las celdas evaluadas. En la Península de Baja California, Peynador y Méndez-Sánches (2010) calculan una pérdida de alrededor de 80m de playa en el sistema costero de Punta Banda, Ensenada (BC), lo cual atribuye al desabasto de sedimento por las obras portuarias. En este mismo sistema, se ha documentado el efecto invasivo de *Carpobrotus chilensis* que ha expulsado a la vegetación nativa y característica de DC. Camacho-Valdez et al (2008) describe la degradación a la que han estado sujeta el sistema de dunas de Cabo Falso, en Los Cabos (BC) por el uso recreativo, especialmente construcción de campos de golf y deportes todo terreno; también observado en El Descanso, San Quintín (BC) y El Mogote (BCS). No obstante, debido a que la mayoría de los sistemas de dunas de esta región se encuentran alejados de las vías de comunicación principales, los datos de estos subíndices son bajos, y contribuyen de manera poco significativa al índice general de vulnerabilidad. Para el caso de los sistemas de dunas sobre islas de barrera de Sonora y Sinaloa, dada su separación del continente, la presión externa, como el represamiento de los ríos, es la principal fuente de vulnerabilidad. Ortiz-Pérez y de la Lanza (2006) y Bojórquez et al. (2008) resaltan que el control hidráulico de los principales ríos, por la construcción de presas, ha incidido en el balance sedimentario de estos sistemas, asociados a la excesiva agricultura de la zona, disminuyendo la cantidad de sedimentos que originalmente era vertido al mar por las corrientes de agua continentales. Por otro lado, para los sistemas de dunas continentales, el desarrollo de la acuicultura es el principal factor de influencia antrópica, ya que incurre en la fragmentación de los sistemas para la intrusión de agua del mar para el mantenimiento de las granjas camaronícolas, propiciando además la erosión de las bocanas artificiales. De acuerdo a lo anterior, aunque las comunidades humanas no ocurran sobre los sistemas dunares y la condición de la vegetación se encuentre en su estado natural o poco fragmentadas se han identificado actividades antrópicas que pudieran actuar de manera negativa sobre los sistemas de dunas vecinos.

Por otra parte, la geomorfología de los cordones de dunas frontales que se distribuye desde Nayarit hasta la costa de Chiapas, aunado a la estabilización de dunas por ecosistemas tropicales, principalmente selva baja espinosa, selva mediana y manglares y la presencia de desarrollos turísticos tradicionales y de alta demanda han propiciado el cambio de uso de

suelo de estos sistemas. Al estar cubiertos por vegetación tropical, las características fisicoquímicas del suelo de las DC cambian, haciéndose más atractivos para la agricultura. Así mismo, la tala de vegetación tropical, establecidos sobre suelos arenosos, para el desarrollo de actividades ganaderas es otra de las presiones externas asociadas a la presión antrópica sobre las DC.

La combinación de ambos índices demuestra que el uso agropecuario y la distribución de localidades dentro y fuera de los sistemas de dunas contribuyen en gran parte al aumento de su vulnerabilidad.

Los resultados de ambos subíndices para las costas del Golfo de México coinciden con los resultados de Martínez et al (2006) y Oropeza-Orozco et al. (2011), quienes consideran que el cambio de usos de suelo y presión antrópica como el mayor factor de vulnerabilidad para las DC. Martínez et al. (2006) evaluaron la vulnerabilidad de las DC de 26 sitios costeros a lo largo del centro del Golfo de México, desde Tamaulipas hasta Tabasco y en coincidencia con nuestros resultados, encontraron que menos del 20% de los sitios presentaban baja vulnerabilidad, los sitios de vulnerabilidad media coincidían con los sitios con geomorfología estable y alto aporte de sedimento, mientras que los sitios cercanos a desarrollos habitacionales y turísticos fueron los de mayor vulnerabilidad. Por otro lado, Oropeza-Orozco et al. (2011) reconocen que tres de los nueve sistemas que ellos evaluaron, urgen de una política de restauración que permita la recuperación de los servicios que el ecosistema (principalmente protección, balance sedimentario y hábitat), presenta a la zona costera.

Es importante mencionar que afortunadamente en nuestro país el desarrollo de la población humana, alrededor de las DC, es poco numeroso; típicamente son localidades rurales de menos de 2500 habitantes y desarrollos urbanos puntuales. Lo anterior, puede darnos una perspectiva del efecto de las actividades antrópicas sobre los sistemas arenosos. Existen ejemplos, como en la costa del Golfo de México, donde el desarrollo urbano sobre localidades con muchos años de establecimiento como el puerto de Veracruz, es el principal agente de cambio de los sistemas costeros. Siemens et al. (2001), documentaron la degradación de los sistemas de humedales de DC de Veracruz-Boca del Río, los cuales fueron rellenados y aplanados para la construcción de casas. Coatzacoalcos (Veracruz), otra ciudad

construida sobre dunas, ha crecido de manera descomunal en los últimos años, debido al auge de la industria en la zona sureste. Lo mismo se puede decir de Ciudad del Carmen, desarrollada sobre una barra arenosa, la cual se encuentra en una zona de transición de dos corrientes oceánicas que la ubica como una de las zonas con mayores probabilidades de inundación por aumento relativo del nivel del mar. Así mismo, existen ejemplos como las costas de Yucatán, donde la mayoría de los sistemas de DC actualmente son sustituidos por desarrollos habitacionales y turísticos que se extienden paralelos a la costa (Jiménez-Orocio et al, 2014).

Limitantes metodológicas

Los resultados de este trabajo, indican que aunque se haya reducido el número de variables en el uso de un índice ampliamente probado para la evaluación de las DC a nivel local, resultó igualmente útil para analizar la situación actual de las DC en una escala nacional, y permitió determinar cuáles son los factores de influencia que más contribuyen al aumento de la vulnerabilidad de estos ecosistemas. Aunque García-Mora et al. (2001) sugieren que remover las variables redundantes puede subestimar la evaluación de la vulnerabilidad, en este caso la disminución del número de variables no obedece a la duplicidad sino a la disposición de información y a la escala de análisis. En este sentido, la diferencia de escala de análisis, requirió de una simplificación y selección de los indicadores que García-Mora et al. (2001) sugieren.

Aunque consideramos que la metodología de García-Mora y colaboradores reúne todos los indicadores necesarios para evaluar la vulnerabilidad de las dunas, creemos que su estructura está diseñada para ser utilizada directamente en el campo, como una lista de chequeo, y a evaluar los primeros cordones de dunas.

En México, algunos sistemas de dunas se extienden por más de 10 km tierra adentro, por lo que no podrían ser evaluados de manera puntual. Además, existen variables externas muy importantes, como la presión antrópica alrededor del sistema, inapreciables si utilizáramos simplemente una lista de chequeo a nivel de sitio.

El modelo de evaluación de la vulnerabilidad de DC implica la cuantificación de datos de orígenes diferentes, como es la exposición del sistema o la amenaza de los diferentes factores de influencia. De acuerdo con Füssel y Klein (2006) existen seis o más niveles en la evaluaciones de la vulnerabilidad de sistemas, los cuales pueden ser clasificados en cuantitativos y cualitativos, adaptativos o no adaptativos, simplísticos o sofisticados, entre otros muchos más y cada uno de estos métodos obedece al uso de una serie de datos y diferentes niveles de precisión (Özyurt y Ergin (2010). Encontrar el balance entre el número de variables e indicadores y los resultados esperados no es una tarea fácil. Lo anterior se complica cuando la escala de representación espacial corresponde a una extensión nacional y el objeto de estudio corresponde a ecosistemas con una distribución espacial tan restringida, como las DC.

La principal modificación realizada al modelo original (García-Mora et al., 2001) fue la simplificación de indicadores. Además, se modificó el subíndice de condición de la vegetación, el cual originalmente trata las características funcionales de la vegetación y su papel importante en el mantenimiento del sistema. La escala de trabajo no nos permitió obtener ni evaluar estas características. Por lo tanto, consideramos el correcto uso de un subíndice (SIUD) que abarcará, a grandes rasgos, la funcionalidad no solo de los sistemas de DC vegetados sino también los de arena desnuda, al clasificarlos como un sistema "natural". Dado que este subíndice también considera el uso que se le da a los sistemas de DC, al contemplar indicadores de actividades antrópicas, permite, a su vez, el balance entre los otros cuatro subíndices. El modelo original, evalúa la capacidad del sistema en función de su estado (condición geomorfológica, y condición de la vegetación), y la presión por influencia de dos factores de influencia natural (influencia marina y eólica) y solo un factor de influencia antrópica. Aunque el factor de influencia antrópica comprende casi el doble de indicadores (variables), los resultados del índice general de vulnerabilidad podría ser condicionado por los factores de influencia no antrópica. Por lo tanto, al incorporar el SIUD nuestro modelo permite un balance entre los tipos de presión antrópica al que están sujetos los sistemas de DC. Lo anterior, es sugerido por Oropeza-Orozco et al (2001) quienes mencionan que el principal factor de cambio en los sistemas de DC del centro de Veracruz, corresponden al cambio de uso de suelo, actividades agropecuarias.

Conclusiones

El modelo de evaluación de la vulnerabilidad de DC, basado en las tendencias de evaluación de dunas a nivel mundial, modelo incorporando indicadores e índices que reflejan aspectos geomorfológicos, de influencia eólico-marina, condición y uso de las DC y presión antrópica, demuestra que es posible determinar los rangos de vulnerabilidad de DC en un país con diversidad de geo-formas costeras y más de 11, 000 km de línea de costa.

Los grandes sistemas de DC de la Península de Baja California y centro del Golfo de México son los menos vulnerables por su heterogeneidad geomorfológica y dinámica sedimentaria. La condición geomorfológica de estos sistemas les permite enfrentar y recuperarse de impactos externos adversos como los eventos meteorológicos.

Los sistemas dunares del sur del Golfo de México y Mar Caribe, presentan los valores de vulnerabilidad más alta, ya que se trata de angostos y poco desarrollados cordones de dunas frontales sujetos a condiciones erosivas constantes, frecuente impacto de fenómenos meteorológico y alto crecimiento de la población, principalmente en el Caribe.

El SIIM sumado al SIIE juega un papel importante en el comportamiento general del índice general de vulnerabilidad, ya que determina el efecto del comportamiento de la geodinámica costera y los procesos erosivos-acrecivos de las costas arenosas.

La presión antrópica influye directamente en la condición de la vegetación de los sistemas costeros, donde el cambio de usos de suelo y la fragmentación de los ecosistemas son las principales causas de degradación. El crecimiento de las poblaciones semi-urbanizadas y urbanizadas es constante, contrario a las zonas de poca o nula presencia de localidades humanas, donde las poblaciones se mantienen estables, y por ende los sistemas de dunas menos vulnerables.

Se recomiendan programas de conservación y manejo de los grandes sistemas de DC de la costa norte del Pacífico, Golfo de California y centro-norte del Golfo de México. La vulnerabilidad de estos sistemas es de media a baja, lo que indica el rol de protección de la costa que juegan estos ecosistemas debería ser tomado muy en cuenta para los próximos proyectos de desarrollo. Además, existen sistemas de dunas insertos entre los sistemas

aparentemente muy vulnerados que deberían mantenerse como fuente de información e investigación para proyectos de restauración.

Referencia bibliográfica

Arens, P.M. 1993. Patterns of sand transport on vegetated foredunes. *Geomorphology* 17: 339-350.

Adger, W.N. 2006. Vulnerability. *Global Environmental Change,* 16:268-281.

Álvarez-Molina, L.L., M.L. Martínez, O. Pérez-Maqueo, J.B. Gallego-Fernández y P. Flores. 2012. Richness, diversity, and rate of primary succession over 20 year in tropical coastal dunes. *Plant Ecology,* 213:1597-1608.

Bojórquez, I., A. Hernández, D. García, O. Nájera, F. Flores, A. Madueño y R. Bugarín. 2008. Características de los suelos de las barras paralelas, playas y dunas de la llanura costera norte del estado de Nayarit, México. *Cultivos Tropicales,* 29:37-42

Camacho-Valdéz, V., J.M. Murillo-Jiménez, E.H. Nava-Sánchez y C. Turrent-Thompson. 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,* 24:553-560.

Conabio. 1999. Índice de cartas 1:50,000. En: Inventario de información geográfica. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI-1992). Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad.

de Bruijn, K., C. Green, C. Johnson y L. McFadden. 2007. Evolving concepts in flood risk management: searching for a common language, in: S. Begum, J. Hall & MJ. F. Stive (Eds) Flood Risk Management in Europe: Innovation in Policy and Practice. Advances in Natural and Technological Hazards Research New York. 61-75 pp.

Escofet, A. y I. Espejel. 1999. Conservation and management-oriented ecological research in the coastal zone of Baja California, Mexico. *Journal of Coastal Conservation,* 5:43-50.

Füsel, H.M. 2007. Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research. *Global Environmental Change,* 17:155–167.

Füssel, H.M. y R.J.T. Klein, 2006. Climate change vulnerability assessments: an evolution of conceptual thinking. *Climatic Change,* 75:301–329.

Gallego-Fernández, J.B. y M.L. Martínez. 2011. Environmental filtering and plant functional types on mexican foredunes along the Gulf of Mexico. *Ecoscience,* 18:52-62.

Gallopin, G. 2006. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change,* 16:293-303.

García-Mora, M.R., J.B. Gallego-Fernández y F. García-Novo, 1999. Plant functional types in relation to foredune dy-namics and the main coastal stresses. *Journal of Vegetation Science*, 10:27-34.

García-Mora, M.R., J.B. Gallego-Fernández, A.T. Williams y F. García-Novo. 2001. A coastal dune vulnerability classification. A case study of the SW Iberian Peninsula. *Journal of Coastal Research,* 17: 802-811.

González-Vázquez, J.A., R. Silva-Casarín, E. Mendoza y M.A. Delgadillo-Calzadilla. 2014. Towards coastal management of a degraded system: Barra de Navidad, Jalisco, Mexico. *Journal of Coastal Research,* 71:107-113.

Google Earth (2012). Base de datos satelitales.

https://www.google.es/intl/es_es/earth/learn/

Green C. y L. McFadden 2007. Coastal vulnerability as discourse about meanings and values. *Journal of Risk Research,* 10: 1027-1045.

Hernández-Santana, J.R., M.A. Ortiz-Pérez, P. Méndez-Linares y L. Gama-Campillo. 2008. Morfodinámica de la línea de costa del estado de Tabasco, México: tendencias desde la segunda mitad del siglo XX hasta el presente. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM,* 65:7-21.

Hesp, P. 2002. Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology,* 48:245-268.

Hesp, P., M. Martínez, G.M. da Silva, N. Rodríguez-Revelo, E. Gutiérrez, A. Humanes, D. Lainez, I. Montano, V. Palacios, A. Quesada, L. Storero, G.G. Trilla y C. Trochine. 2011. Transgressive dunefield landforms and vegetation associations, Dona Juana, Veracruz, Mexico. *Earth Surface Processes and Landforms,* 36:285-295.

Hesp, P., P. Schmutz, M.L. Martínez, L. Driskell, R. Orgera, K. Renken, N.A. Rodríguez-Revelo y O.A. Jiménez-Orocio. 2010. The effect on coastal vegetation of trampling on a parabolic dune. *Aeolian Research,* 2:105-111.

Hinkel, J. 2011. "Indicators of vulnerability and adaptive capacity": Towards a clarification of the science-policy interface. *Global environmental change,* 21:198-208.

Hufschmidt, G. 2011. A comparative analysis of several vulnerability concepts. *Natural Hazards,* 58:621–643.

Inegi. 2015a. Censos y conteos de población y vivienda. Censo de población y vivienda 2010). http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/Default.aspx

Inegi. 2015b. Censos y conteos de población y vivienda. Conteo de población y vivienda 1995. http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv1995/default.aspx

Jauregui, E. 2003. Climatology of landfalling hurricanes and tropical storms in Mexico. *Atmósfera,* 193-204.

Jiménez-Orocio, O. 2008. Análisis espacio-Temporal de la erosión y acreción de la costa del estado de Veracruz. Tesis de Maestría. Instituto de Ecología, A. C. Xalapa. 115 pp.

Jiménez-Orocio, O., I. Espejel y M.A. Martínez. 2015. La investigación científica sobre dunas costeras de México: origen, evolución y retos. *Revista Mexicana de Biodiversidad,* 82:486-507.

Jiménez-Orocio, O., P. Hesp, M.L. Martínez, I. Espejel y P. Moreno-Casasola. 2014. Tipos de dunas. *En:* Diagnóstico general de las DC de México, M.L. Martínez, P. Moreno-

Casasola, I. Espejel, O. Jiménez-Orocio, D. Infante-Mata y N. Rodríguez-Revelo (Eds). Comisión Nacional Forestal. México. p. 27-48.

Knapp, K. R., M.C. Kruk, D.H. Levinson, H.J. Diamond, y C.J. Neumann. 2010. The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): Unifying tropical cyclone best track data**.** *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91: 363-376.

Kasper-Zubillaga, J.J. y H. Zolezzi-Ruíz. 2007. Grain size, mineralogicaland geochemical studies of coastal and inland dune sands from El Vizcaino Desert, Baja California Peninsula, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas,* 24: 423–438.

Liverman, D.M., 1990. Vulnerability to global environmental change. En: Understanding global environmental change: The contributions of risk analysis and management, R.E. Kasperson, K. Dow, D. Golding, J.X. Kasperson (Eds.). Clark University, Worcester, MA, 27–44 pp.

Lithgow, D., M.L. Martínez y J.B. Gallego-Fernández. 2014. The "ReDune" index (Restoration of coastal Dunes Index) to assess the need and viability of coastal dune restoration. *Ecological Indicators,* 49:178-187.

López-Portillo, J. A., M.L. Martínez, P.A. Hesp, J.R. Hernández-Santana, V. Reyes-Vásquez, A. Gómez y O. Jiménez-Orocio. 2011. Atlas de las costas de Veracruz. Manglares y dunas. Xalapa: Secretaría de Educación del Estado de Veracruz, Universidad Veracruzana.

Martínez M.L. y N.P. Psuty. 2004. Coastal dunes, ecology and conservation. New York: Springer-VerlagBerlin Heidelberg.

Martínez, M.L., J.B. Gallego-Fernández, J.G. García-Franco, C. Moctezuma y C.D. Jiménez. 2006. Assessment of coastal dune vulnerability to natural and anthropogenic disturbances along the Gulf of Mexico. *Environmental Conservation,* 33:109-117.

Martínez, M.L., Jiménez-Orocio, O. y I. Espejel. 2014. Climas. *En:* Diagnóstico general de las DC de México, M.L. Martínez, P. Moreno-Casasola, I. Espejel, O. Jiménez-

Orocio, D. Infante-Mata y N. Rodríguez-Revelo (Eds). Comisión Nacional Forestal. México. p. 41-48.

Mellink, E. y M. Riojas-López. 2007. Modificaciones estructurales artificiales de Laguna Cuyutlán, Colima, México. *Revista Geográfica,* 142:131-142.

Moreno-Casasola, P. 2006. Playas y dunas. En P. Moreno-Casasola, E. Peres-barbosa y A.C. Travieso-Bello (Eds.), Estrategias para el manejo integral de la zona costera: un enfoque municipal. Instituto de Ecología, A.C., Conanp, Gobierno del Estado de Veracruz. pp. 121–149.

Muñoz-Vallés, S.S., J.B. Gallego-Fernández, y C.M. Dellafiore, 2011. Dune vulnerability in relation to tourism pressure in central Gulf of Cádiz (SW Spain), a case study. *Journal of Coastal Research*, 27: 243–251.

Murillo de Nava, J.M. y D.S. Gorsline. 2000. Holocene and modern dune morphology for the Magdalena Coastal Plain and Islands, Baja California Sur, Mexico. *Journal of Coastal Research,* 16:915-925.

Okazaki, H., J.D. Stanley y E.E. Wright. 2001. Tecolutla and Nautla deltas, Veracruz, Mexico: Texture to evaluate sediment entrapment on deltaic plains and bypassing onto the Gulf of Mexico margin. *Journal of Coastal Research*, 17: 755-761.

Oropeza-Orozco, O., I. Sommer-Cervantes, J. Carlos-Gómez, J.C. Preciado-López, M.A. Ortiz-Pérez y J. López-Portillo. 2011. Assessment of vulnerability and integrated management of coastal dunes in Veracruz, Mexico. *Coastal Management,* 39:492-514.

Ortiz-Pérez, M.A. 1992. Retroceso reciente de la línea de costa del frente deltaico del río San Pedro, Campeche, Tabasco. Investigaciones Geográficas *Boletín del Instituto de Geografía*, UNAM, 25: 7-23.

Ortiz-Pérez, M.A. y de la Lanza-Espino. 2006. Diferenciación del espacio costero de México: un inventario regional. Serie textos universitarios, num. 3, Instituto de Geografía, UNAM, México.

Ortiz Pérez, M.A. y A.P. Méndez Linares, 2004. Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar y sus implicaciones en las costas bajas del Golfo de México y mar Caribe. El manejo costero en México. Centro EPOMEX, Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, pp. 307-320.

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

Psuty, N. P. 1966. Beach-ridge development in Tabasco, Mexico. *Annals of the Association of American Geographers*, *55*, 112–124.

Seingier, G., I. Espejel, y J.L. Fermán-Almada. 2009. Cobertura vegetal y marginación en la costa mexicana. Investigación ambiental. *Ciencia y Política Pública*, *1*: 54–69.

Silva-Casarín, R., M.M. Villatoro, F. J. Ramos, D. Pedroza., M.A. Ortiz-Pérez, E.G. Mendoza, M.A. Delgadillo, M.C. Escudero, A. Félix y A. Cid. 2014. Caracterización de la zona costera y planeamiento de elementos técnicos para la elaboración de criterios de regulación y manejo sustentable. UNAM/SEMARNAT. México D.F. 118 pp.

Williams, A.T., J. Alveirinho-Dias, F. García-Novo, M.R. García-Mora, R. Curr y A. Pereira. 2001. Integrated coastal dune management: checklists. *Continental Shelf Research*, 21: 1937–1960.

Conclusiones generales y principales hallazgos

Las dunas costeras son ecosistemas frágiles, sumamente dinámicos, ubicados en la zona de interacción de la dinámica del mar, de la tierra, de la atmósfera y del agua dulce. Debido a esto, son ecosistemas que constantemente están expuestos a perturbaciones naturales que según su intensidad y alcance, producen impactos variables. Estos impactos pueden disminuir la capacidad de recuperación del ecosistema y aumentar su vulnerabilidad. Por su ubicación en las zonas costeras arenosas, las dunas costeras también están sujetas a presiones derivadas de actividades antrópicas, como el cambio de uso de suelo, la obstrucción o el desvío del aporte de sedimentos, o las actividades de recreación que disminuyen la capacidad de los ambientes naturales de recuperarse de estas perturbaciones o de perturbaciones de origen natural, lo que hace que sean más vulnerables hasta el punto de no poder recuperarse nunca.

En este trabajo de investigación se propuso realizar un diagnóstico integrado de la condición actual tanto de la investigación científica, geomorfológica y ecológica de las dunas costeras. Además, se investigó si existen programas de protección y/o conservación que resguarden estos ecosistemas. Lo anterior con el fin de evaluar la vulnerabilidad de las dunas costeras ante los diversos factores de degradación, tanto naturales como antrópicos. De acuerdo a lo anterior, se propone un modelo de evaluación de vulnerabilidad que integra los cinco principales factores de influencia (natural y antrópicos) que maximizan o disminuyen la vulnerabilidad de estos ecosistemas. El modelo está basado en indicadores usados a nivel mundial por reconocidos investigadores de dunas costeras.

Esta investigación demuestra que el desarrollo de la investigación en dunas costeras está principalmente asociado a las ciencias naturales. No obstante, existe una evolución en los enfoques de estudio, ya que las investigaciones científicas han pasado de descripciones geológicas y geomorfológicas, florísticas y de estructura de la vegetación a estudios de vulnerabilidad, riesgo, propuestas de áreas de conservación, manejo integrado y análisis de escenarios de cambio climático. Sin embargo, el estado del conocimiento de estos ecosistemas se concentra principalmente en las costas del Golfo de México y Mar Caribe. Curiosamente, las dunas costeras que se localizan en estos litorales son de las más afectadas

por los desarrollos urbanos y portuarios. De acuerdo a lo anterior, se sugiere crear una política de investigación que priorice los temas de investigación que no han sido abordados en diferentes regiones con grandes sistemas de dunas costeras en el país. Así mismo, es de gran importancia que se tome en cuenta la información disponible sobre la dinámica sedimentaria, tanto terrestre como marina, que juegan un papel importante en el equilibrio y mantenimiento de la interacción playa-duna, sobre todo en las regiones con alta demanda turística. Es urgente que este tema de investigación se realice en la mayor cantidad de sistemas de dunas costeras posibles, ya que permitirá establecer los mejores sitios y estrategias en los planes de desarrollo en zonas costeras arenosas. El análisis de la información científica sobre dunas costeras en México demostró que no se conocía, al momento, la distribución, la extensión, ni la geomorfología de las dunas costeras; mucho menos había estudios amplios sobre la vulnerabilidad de estos ecosistemas. Lo anterior, respaldó la importancia de llevar a cabo esta tesis.

A partir del análisis de fotointerpretación y mapeo de las dunas costeras se contabilizaron alrededor de 800,000 ha de dunas distribuidas en los 17 estados costeros del país. Existe una gran heterogeneidad geomorfológica que va desde estrechos cordones de dunas frontales en costas en forma de bahía en el litoral rocoso del Golfo de California hasta gigantescos sistemas de dunas costeras móviles en el centro de la Península de Baja California y centro de Veracruz. Sin embargo, la distribución de las dunas costeras no es homogénea en todos los estados costeros. En Baja California Sur se encuentra la cuarta parte de las dunas costeras del país, principalmente dunas transgresivas, mientras que el estado de Colima apenas alcanza el 1% del total de dunas del país; principalmente dunas frontales de tamaño pequeño. Por otro lado, en los estados costeros del sureste mexicano, desde Chiapas, Tabasco hasta Quintana Roo las dunas costeras se distribuyen como planicies de dunas frontales.

Respecto a las condiciones y actividades de uso de las dunas costeras, la mitad de las localidades construidas sobre dunas están en el sur del Golfo de México, distribuidas principalmente en Veracruz, Tabasco y Campeche. Los sistemas de dunas del sur y sureste del país son las más degradados y con mayor número de asentamientos y población sobre ellas. A diferencia de Veracruz, topográficamente estas dunas presentan baja altitud, están más expuestas a eventos hidrometeorológicos y se encuentran sobre costas longitudinales

(rectilíneas) con poco aporte de sedimentos. Esto permite que sean mayores los procesos erosivos puntuales, lo que se traduce en la pérdida de capital natural y en la pérdida de capital humano y económico.

Aunque gran parte de las dunas costeras del sur del país son dunas frontales con uso agropecuario o mixto, destaca el buen estado de conservación del primer cordón de dunas, inmediato a la playa. Además, las dunas frontales se encuentran cubiertos por vegetación no característica de dunas, como selvas o matorrales, que, aunque bastante fragmentadas, también sirve como base para la conservación de parches de vegetación natural.

El modelo de evaluación de la vulnerabilidad de dunas costeras, basado en las tendencias de evaluación de dunas a nivel mundial, demuestra que es posible determinar rangos de vulnerabilidad, equivalentes a otra escala (a nivel de sitio) en un país con diversidad de geoformas costeras (con más de 11,000 km de línea de costa). Los grandes sistemas de dunas costeras de la Península de Baja California y norte del Golfo de México son los menos vulnerables por su heterogeneidad geomorfológica y dinámica sedimentaria. La condición geomorfológica de estos sistemas les permite enfrentar y recuperarse de impactos externos adversos como los eventos meteorológicos. Por otro lado, los sistemas de dunas costeras del sur del Golfo de México y Mar Caribe, presentan los valores de vulnerabilidad más altos, ya que se trata de cordones de dunas frontales estrechos sujetos a condiciones erosivas constantes, frecuente impacto de fenómenos hidrometeorológicos y altas tendencias de crecimiento poblacional humana.

Las principales causas de degradación de las dunas costeras son por la presión antrópica, especialmente los cambios de uso de suelo y la fragmentación de los ecosistemas. Aunque las poblaciones sobre y alrededor de dunas costeras son relativamente pocas, se distribuyen homogéneamente en ambos litorales, a excepción de la Península de Baja California, dónde la población humana presente es baja o nula. El crecimiento de las poblaciones establecidas es constante, contrario a las zonas de poca o nula presencia de localidades humanas, donde las poblaciones se mantienen estables y, por ende, los sistemas de dunas son menos vulnerables. Alrededor del 50% de las dunas del país se encuentra en estado natural y más de la mitad de las celdas evaluadas no presenta datos de población, lo que significa que son

ecosistemas bien conservados que aún cumplen con su papel ecológico y con gran potencial de servicios del ecosistema.

Todos los análisis y evaluaciones de este proyecto indican que los grandes sistemas de dunas costeras del centro y sur del Golfo de México están expuestos a presiones externas, tanto naturales como antrópicas y que no existe una herramienta jurídica que las proteja. En general, no existen planes de manejo en las áreas naturales protegidas que incluyan a las dunas costeras como un ecosistema prioritario. Por lo tanto se sugiere que es importante hacer uso de los instrumentos indirectos de conservación, como son los ordenamientos ecológicos, los planes de desarrollo urbano de los centros de población y la certificación de playas limpias (de conservación).

En sitios donde se mezclan usos agropecuarios, urbanos, recreativos e industriales, es necesario que los planes de manejo integrado incorporados a los esquemas de planeación territorial, busquen que dichas actividades se realicen preservando la biodiversidad de las dunas costeras y que fomenten una participación activa de los municipios. Una característica de las dunas es que en espacios relativamente pequeños se pueden encontrar muchas de sus especies y que, en especial las dunas frontales, pueden ser interrumpidas por construcciones aisladas y de baja altura; mientras se mantengan las formas de las dunas y la flora, es posible que no se pierda su capacidad de protección de la línea de costa.

Dado que algunas investigaciones han puesto a gran parte de las costas bajas arenosas del país, principalmente las costas del sur y sureste, en condición de riesgo de inundación ante escenarios de aumento relativo del nivel del mar, es importante establecer estrategias de adaptación. Una estrategia de adaptación debería ser la conservación de los ecosistemas costeros, como las dunas costeras, reconocidos por ser una barrera natural de protección ante impactos naturales como los previstos por estos escenarios. Así mismo es importante poner atención en las zonas costeras urbanizadas, donde anteriormente eran dunas costeras. El impacto de factores de disturbio externo que anteriormente eran una fuente de vulnerabilidad para las dunas costeras, al ser destruidas para el establecimiento de desarrollos urbanos, actualmente ponen en riesgo a las poblaciones humanas.

Se sugiere que las dunas costeras sean tomadas en consideración en los planes de manejo y/o desarrollo costero. Estados costeros como Baja california y Baja California Sur ya están tomando medidas de protección (ordenamientos territoriales) de sus sistemas costeros, principalmente las dunas costeras. Los ordenamientos territoriales de estos estados costeros deberían ser tomados como modelo de desarrollo costero para otros estados con amplia heterogeneidad de dunas costeras, como el estado de Veracruz. Así mismo se sugiere ampliar los enfoques de investigación de dunas costeras a temas de fauna e interacciones bióticas, pero principalmente dirigirlos a regiones poco exploradas como el Pacífico sur.

Esta investigación es la base para el desarrollo de mejores políticas de investigación científica, especialmente en el tema de ecosistemas prioritarios como son las dunas costeras. Con esta investigación se detectaron regiones costeras con dunas que urgen ser investigadas de manera más puntual, utilizando los mismos criterios de investigación e indicadores pero a nivel local. Es importante crear una red de investigadores de dunas costeras a nivel nacional que interactúe de manera interdisciplinaria, lo que permita dirigir esfuerzos de investigación y conservación de manera integrada de estos ecosistemas.

Por último, el modelo de evaluación de la vulnerabilidad de dunas permite conocer el estado y principales presiones de las dunas costeras del país. Se reconocen algunas limitaciones, como la escala de algunos datos utilizados (por ejemplo, geodinámica costera), sin embargo cumple con su función de evaluar a escala nacional. Para poder corregir algunas faltantes en el modelo se podría realizar un re-escalamiento, análisis a nivel regional tal vez, que integre indicadores a una escala espacial mayor. Algunos indicadores sugeridos podrían tratar algunas presiones de orden natural como el aumento relativo del nivel del mar, rangos de marea, aporte de sedimento, entre otras. Así mismo, puede integrar indicadores de presión de orden antrópico como turismo, desarrollo portuario, actividades agropecuarias, represamiento de ríos, entre otros.

En conclusión, esta tesis ubica a las dunas costeras en el ámbito de la investigación y el manejo integral de la zona costera de México. Evidenciar la situación actual sobre el conocimiento científico, su clasificación geomorfológica, su uso y estado de conservación, resalta la importancia de las dunas costeras en la zona costera y enfatiza las prioridades de

investigación en el país. Así mismo, identificar las zonas de dunas costeras más vulnerables, permitirá a los tomadores de decisiones replantear los criterios para el modelo de desarrollo costero actual, con lo cual se evitarían gastos innecesarios de restauración o reconstrucción de zonas turísticas, agropecuarias y urbanas. Con los resultados de esta tesis, será posible plantear estrategias de conservación flexible que considere la heterogeneidad de los sistemas de dunas costeras, es decir que contenga tanto los escasos pero grandes sistemas de dunas transgresivas como las abundantes pero angostas franjas de dunas frontales, que en conjunto resguardan la heterogeneidad geomorfológica y la riqueza biológica asociada a estos importantes ecosistemas de México.