



El Colegio de la Frontera Sur Universidad de Sherbrooke

Restauración exitosa de los humedales costeros y la
recuperación de sus servicios ambientales en América

TESINA

presentada como requisito parcial para optar por el grado de
Maestro en Ecología Internacional

por

Rodrigo Miguel Villanueva Meza

Directora

Dra. Nuria Torrescano Valle

2019



El Colegio de la Frontera Sur

Chetumal, Quintana Roo, 29 de junio de 2019

Las personas abajo firmantes, integrantes del jurado examinador de: **Rodrigo Miguel Villanueva Meza**, hacemos constar que hemos revisado y aprobado la tesina titulada “**Restauración exitosa de los humedales costeros y la recuperación de sus servicios ambientales en América**” para obtener el grado de Maestro en Ecología Internacional.

Tutora

Firma

Dra. Nuria Torrescano Valle

Evaluador

Firma

Dr. Everardo Barba Macías

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que formaron parte de este maravilloso proceso, principalmente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme otorgado y financiado la oportunidad de realizar esta maestría en México y Canadá.

A ECOSUR por haberme permitido realizar esta maestría, quedo muy contento y agradecido. Particularmente agradezco a la Dra. Nuria Torrescano Valle que me brindó sus asesorías durante mi estancia profesionalizante y en la redacción de esta tesina. También al Dr. Everardo Barba Macías por sus correcciones. No dejaré de estar agradecido con Nancy Vela por todo su gran apoyo.

A la Universidad de Sherbrooke y sus profesores, por haber hecho de este posgrado una experiencia única, agradezco especialmente a Caroline Cloutier por asesorarme y dirigirme durante la estancia profesionalizante, haciendo que tuviera una experiencia increíble en Sherbrooke. Asimismo, a François Rousseu profesor de la UdeS por su orientación. También a Mathieu, Sabrina y Orélie de Nature Cantons-de-l'Est: Parc écoforestier de Johnville por todas sus enseñanzas y apoyo.

Siempre voy a agradecer a mi Mamá que me motivó para el inicio y culminación de esta gran etapa de mi vida, vivimos muchos momentos, te quiero. También, a mi mejor amigo y compañero de viaje el Pez que originó la chispa decisiva de esta etapa, además agradezco su ayuda en las diversas materias y redacción de esta tesina. A mis compañeros de generación Renata, Danya, Samantha y Omar, especialmente a Constance y Edith que me ayudaron en la revisión de mis trabajos en francés. Por último, a mis familiares y amigos que siempre estuvieron presentes.

Resumen

Los humedales costeros proveen diversos bienes y servicios a los seres humanos. Desafortunadamente su pérdida continúa a una gran velocidad por factores antropogénicos directos y otros como los efectos del cambio climático, ocasionando efectos en sus servicios ambientales y calidad de vida. La restauración de humedales costeros ha dado lugar a su recuperación y el reconocimiento de su diversidad biológica, restringida extensión, alta productividad, complejidad y dinamismo. A nivel mundial la clasificación de humedales costeros permite la conservación, monitoreo y gestión, siendo la Convención Ramsar la agencia internacional más importante para la conservación de los humedales costeros.

Esta revisión documental tiene como objetivo presentar un análisis de las restauraciones de los humedales costeros con la ayuda de estudios de caso en América, la cual es considerada una estrategia clave para la gestión, conservación, mantenimiento de sus funciones y servicios ambientales. Se documentó que diversos factores tienen influencia sobre la restauración principalmente el tiempo y las características particulares del sitio. Además, se analizaron las estrategias, técnicas y metodologías de la restauración ecológica en humedales costeros, las cuales son categorizadas en activa, pasiva y creación, considerando los ecosistemas de referencia como los puntos claves para guiar y la sucesión ecológica como parte del restablecimiento de una comunidad a partir de su recuperación, controlada por dos factores: la salinidad y los periodos de inundación. Finalmente, se documentó que el monitoreo es reconocido por evaluar, planificar y redirigir los objetivos, dando resultados favorables.

Palabras clave: gestión, monitoreo, servicios ambientales, sucesión, clasificación de humedales

Résumé

Les zones humides côtières fournissent divers biens et services aux êtres humains. Malheureusement, leur dépérissement continue à un rythme élevé en raison de facteurs anthropiques directs et d'autres facteurs, tels que les impacts des changements climatiques, qui ont des effets sur ses services environnementaux qu'elles fournissent et la qualité de vie des gens qui y vivent. La restauration des zones humides côtières a conduit à leur rétablissement et à la reconnaissance de leur diversité biologique, de leur extension limitée, de leur productivité élevée, de leur complexité et de leur dynamisme. Au niveau mondial, la classification des zones humides côtières permet leur conservation, leur suivi et leur gestion. La Convention de Ramsar est la plus importante agence internationale pour la conservation des zones humides côtières.

Cette revue de littérature a pour objectif de présenter une analyse des techniques restaurations de zones humides côtières avec l'aide d'études de cas menées en Amérique. Cette méthode est considérée comme une stratégie clé pour la gestion et la conservation des fonctions et services environnementaux de ces milieux. Dans ce rapport, divers facteurs ayant une influence sur la restauration sont documentés, notamment les temps et les caractéristiques particulières du site.

En outre, l'analyse des stratégies, techniques et méthodologies de restauration écologique dans les zones humides côtières considérant les écosystèmes de référence comme des points clés à guider et la succession écologique dans le cadre de la restauration d'une communauté de son rétablissement, contrôlé par deux facteurs: la salinité et les périodes d'inondation, aussi les techniques classées

comme actives, passives et création ont une influence sur la réussite de la restauration. Enfin, le suivi écologique permet est reconnu par l'évaluation, la planification et la réorientation des objectifs, ce qui donne des résultats favorables.

Mots clé: gestion, suivi biologique, services environnementaux, succession, classification des zones humides

Índice

Agradecimientos.....	ii
Resumen	ii
Résumé	iv
Lista de cuadros	viii
Lista de figuras	viii
Lista de abreviaciones y acrónimos	x
Introducción.....	1
Capítulo 1. Clasificación y gestión de humedales costeros	2
1.1 Clasificación internacional de los humedales y tipos de humedales costeros	3
1.1.1 Humedales ribereños.....	5
1.1.2 Marismas de agua dulce.....	6
1.1.3 Marismas salinas	6
1.1.4 Manglares	7
1.2 Gestión de los humedales costeros	9
1.2.1 Estudio de caso: Gestión de los humedales costeros en la Península de Yucatán en México.....	13
Capítulo 2. Amenazas e implicaciones de la pérdida de los humedales costeros	16
2.1 Transformación de humedales	17
2.1.1 Transformación por drenaje, dragado y relleno	17
Estudio de caso: transformación por camaronicultura	18
2.1.2 Transformación por diques, presas y drenaje.....	19
Estudio de caso: el canal artificial de Zaragoza.....	20
2.1.3 Construcción de carreteras.....	20
Estudio de caso: efecto de las carreteras en la fauna de humedales	21
2.1.4 Contaminación.....	22
Estudio de caso: <i>Deepwater horizon</i> y el pozo de Macondo	22
2.1.5 Introducción de especies exóticas	23
Estudio de caso: la acuicultura y los peces invasores en el sureste de México	24
2.2 Pérdida de los humedales costeros: tendencias de cambio.....	25
2.3 Humedales costeros afectados por el cambio climático.....	26
2.4 Servicios ambientales de los humedales costeros	29

2.4.1	Servicios de provisión	32
2.4.2	Servicios de regulación.....	34
2.4.3	Servicios de cultura	34
2.4.4	Servicios de soporte	36
Capítulo 3. Técnicas y metodologías para la restauración de los humedales costeros		40
3.1	Estrategias de la restauración ecológica.....	42
3.2	Trayectoria y alcances de la restauración ecológica.....	46
3.3	Ecosistema de referencia.....	48
3.4	Técnicas y metodologías para la restauración de los humedales costeros.. ..	49
3.4.1	Restauración activa, pasiva y creación.....	49
3.4.2	La topografía, hidroperiodo y salinidad en la restauración de humedales costeros.....	51
3.4.3	La sucesión en la restauración de los humedales costeros.....	53
3.5	El papel del monitoreo en la restauración de humedales costeros	56
3.5.1	Estudio de caso sobre los monitoreos biológico-ecológicos: los peces como indicadores de éxito en la restauración de humedales costeros	58
3.6	Estudios de caso de restauraciones exitosas de humedales costeros.....	60
3.6.1	Estudio de caso: restauración de una marisma en el estuario del río Tijuana	60
3.6.2	Estudio de caso: la restauración del manglar en la Laguna de Términos, México	61
3.6.3	Estudio de caso: Prueba de reforestación de mangle en una ciénaga costera semiárida de Yucatán, México.....	62
3.6.4	Estudio de caso: experiencia de la restauración de la marisma salina en la Bahía de San Francisco, California, Estados Unidos	64
Conclusión.....		65
Bibliografía		69

Lista de cuadros

Cuadro 1.1. Resumen de impactos sociales, económicos y ambientales de los usos y abusos de los recursos costeros de la Península de Yucatán, tomado de Herrera-Silveira et al. (2004).	14
Cuadro 2.1. Servicios ambientales de la clasificación de humedales costeros con su magnitud relativa (por unidad de área) tomada de Assessment Millennium Ecosystem (2005).	38

Lista de figuras

Figura 1.1. Humedales marinos y costeros definidos por Ramsar	8
Figura 1.2. Resumen de los objetivos y metas del Plan Estratégico Ramsar, imagen tomada de Ramsar (2016).	12
Figura 2.1. Modelos de impactos en los humedales inducidos por el hombre tomado de Mitsch y Gosselink (2015a).	17
Figura 2.1. Esquema de los diferentes tipos de servicios ambientales y su relación con el bienestar humano (tomado de Assessment Millennium Ecosystem 2005). El color de las flechas representa el potencial para los factores económicos y el grosor de la flecha la intensidad del vínculo entre los servicios ecosistémicos y el bienestar humano.	33
Figura 3.1. Trayectorias para la recuperación de un humedal degradado durante el proceso de restauración. Imagen tomada de Montes et al. (2007) y modificada de (Bradshaw y Chadwick, 1980).	45
Figura 3.2. Imagen tomada de Lindig-Cisneros y Zambrano (2007). Relación entre el nivel de degradación y las metas alcanzables de un proyecto de restauración; con un mayor nivel de degradación, la posibilidad de recuperar las funciones o complejidad estructural se reducen, así al perder particularidades del sitio durante la degradación irreversible es importante replantear objetivos compatibles y alcanzables.	48

Figura 3.3. Comparación entre la restauración activa y pasiva, imagen tomada de Allen et al. (2001) 51

Figura 3.4. Trayectoria de la sucesión, tomado de Cain et al. (2014). La sucesión primaria y secundaria se encuentra en diferentes etapas. 1. Si se presenta un disturbio y no deja vida, sucesión primaria. 2. Cuando una comunidad es afectada severamente por un disturbio, pero no se destruye completamente. En la trayectoria de sucesión ecológica puede ocurrir un disturbio y regresar a alguna etapa previa..... 55

Lista de abreviaciones y acrónimos

USFWS	Sistema de Clasificación del Servicio de Pesca y Vida Silvestres
CCS	Sistema Canadiense de Clasificación
CR	Convención RAMSAR
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ANP	Áreas Naturales Protegidas
EEM	Evaluación de los Ecosistemas del Milenio
SER	Sociedad para la restauración ecológica

Introducción

Los humedales se encuentran en casi todos los continentes excepto en la Antártida. Su mayor distribución es en las regiones boreal y tropical, en menor medida en las zonas templadas. A nivel mundial tienen una extensión territorial de 7 a 10 millones de km² (5-8% de la superficie del mundo; Mitsch y Gosselink, 2015c). De dicha porción, los humedales costeros ocupan 45,000 km² (Greenberg *et al.*, 2006). En el Sudeste Asiático, Sudamérica y África se encuentran las mayores zonas de humedales tropicales de marea (Scott, Frail-Gauthier y Mudie, 2014a; Valiela *et al.*, 2009)

Los humedales costeros son reconocidos por su alta productividad, diversidad biológica, poca extensión, alta complejidad y dinamismo, por lo cual son distinguidos como refugios y sitios de crianza de diversas especies de peces, aves, crustáceos y moluscos (Berlanga-Robles, Ruiz-Luna y de la Lanza Espino, 2008; Dugan, 1992; Mitsch y Gosselink, 2015c). Coloquialmente son nombrados “riñones de paisaje” o “supermercados de la naturaleza”, por su gama de bienes y servicios ambientales que ofrecen: ser sumideros de carbono; estabilizadores climáticos, regular el ciclo del agua (almacenamiento y purificación, retención de nutrientes), fungir como mecanismo contra la erosión (Mitsch y Gosselink, 2015c; Vidal *et al.*, 2015).

En las últimas décadas los humedales se están perdiendo a una velocidad alarmante, teniendo efectos en la economía y en los beneficios sociales, por ejemplo el aumento de riesgo de inundaciones, deterioro en la calidad del agua, salud humana y medios de subsistencia (Brink *et al.*, 2013; Ramsar, 2015a). En América latina y diversas partes del mundo se implementan planes de manejo, leyes y

normas para protegerlos, basados en tratados internacionales que promueven su conservación y uso racional (Berlanga-Robles, Ruiz-Luna y de la Lanza Espino, 2008).

La restauración de humedales costeros ha resultado ser clave para su permanencia y se ha basado en el manejo de tres componentes esenciales: el agua, la biota y el suelo. El componente hidrológico es el que más atención ha recibido en los proyectos de restauración (Zhao *et al.*, 2016), sin embargo, se ha identificado que cuando se conocen las interacciones entre los componentes de un humedal, incluyendo sus funciones, se pueden identificar los mecanismos responsables de la degradación y revertir sus efectos negativos (Williams y Faber, 2001; Zhao *et al.*, 2016)

Por ello, el objetivo de este trabajo es analizar la restauración de los humedales costeros por medio de estudios de caso en América que muestran cómo ha sido la recuperación de sus servicios ambientales. Específicamente se describe su gestión, se analizan y determinan sus principales amenazas, así como su relación con los servicios ambientales que proveen. Finalmente se analizan las técnicas y metodologías generales empleadas para su restauración.

Capítulo 1. Clasificación y gestión de humedales costeros

La palabra “humedales” está referida a una amplia variedad de hábitats que comparten diversas características. A nivel mundial existen diferentes agencias internacionales y nacionales que clasifican, conservan, monitorean y gestionan los humedales costeros, los cuales son categorizados por su posición latitudinal,

paisaje y comunidades vegetales, que les otorgan diferentes funciones y servicios ambientales (Bruland, 2008).

1.1 Clasificación internacional de los humedales y tipos de humedales costeros

Las tres principales agencias internacionales que clasifican, conservan, monitorean y gestionan los humedales son el Sistema de Clasificación del Servicio de Pesca y Vida Silvestres (Fish and Wildlife Service, USFWS), el Sistema Canadiense de Clasificación (Canadian Classification System, CCS) y la Convención RAMSAR (CR-Bruland 2008). De las diferentes definiciones y clasificaciones que existen, las más ampliamente utilizadas son las de la última agencia, que agrupa los diferentes humedales de acuerdo a sus características biológicas y físicas (Dugan, 1992; Ramsar, 2006a).

La USFWS es una agencia internacional creada en 1941 por los Estados Unidos para gestionar y monitorear las características ecológicas y extensión territorial de los humedales con datos geoespaciales (Cowardin *et al.*, 2013). Ésta define a los humedales como “tierra de transición entre sistemas terrestres y acuáticos, donde el manto freático suele estar en o cerca de la superficie, o la tierra está cubierta por agua poco profunda”. Su clasificación: humedales costeros marinos, estuarinos y de ribera, está basada en los modificadores del régimen de agua (naturales o antropogénicos) así como en la química del agua y el suelo (Cowardin *et al.* 2013; Bruland 2008).

En 1973 se desarrolló la CCS, la cual define a los humedales como “tierra que está saturada con suficiente agua como para promover los humedales y los procesos

acuáticos, formando suelos mal drenados, vegetación hidrófila y diversos tipos de actividad biológica que se adapta a un ambiente húmedo” y los clasifica en cinco clases: pantanos, ciénegas, esteros, marismas y humedales poco profundos (The National Wetlands Working Group, 1997). Los humedales costeros se encuentran incluidos en cuatro de sus cinco clases: ciénegas, esteros, marismas y humedales poco profundos (The National Wetlands Working Group, 1997); los criterios considerados para su categorización son: la química del agua, el origen de ésta y el sistema hidrológico, este último se puede dividir en dos subsistemas de abastecimiento de agua, los terrígenos y los litógenos (Ramsar, 2006b; The National Wetlands Working Group, 1997)

En 1971 se creó la Convención Ramsar y 1975 entró en, creada para atender la progresiva degradación y pérdida de los humedales así como de las aves migratorias (Ramsar, 2017). Ramsar define a los humedales como: “las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanente o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”, con base a esta definición Ramsar ha determinado una lista de Humedales de Importancia Internacional (Bruland 2008; Ramsar 2006).

El sistema de clasificación de Ramsar se basa en el tipo de ambiente, la geoforma, la saturación de agua en el suelo, la presencia de especies, la profundidad y temporalidad de la lámina de agua, la presencia y tipo de vegetación, asimismo las áreas de transición (tierra-sistemas acuáticos) con ello agrupa los humedales en

tres tipos principales: humedales marinos o costeros, humedales continentales y humedales artificiales. En su clasificación reconoce cinco tipos: humedales marinos (humedales costeros, lagunas costeras, costas rocosas y arrecifes de coral), estuarinos (incluye deltas, marismas de marea y manglares), lacustres (aquellos asociados a lagos), ribereños (adyacentes a ríos y arroyos), palustres (humedales pantanosos, como marismas, pantanos y ciénegas) y humedales artificiales (Bruland, 2008; López Portillo *et al.*, 2010; Ramsar, 2006b; Ramsar CREHO, 2010).

Ramsar ha desarrollado una lista de 973 humedales costeros para todo el mundo, 99 para América latina y el Caribe, de los cuales 88 son costeros (Figura 1.1) y en su sistema de definición y clasificación agrupa a los arrecifes de coral y lechos de pastos marinos en humedales marinos o costeros. En el presente documento solo se mencionan los humedales ribereños, marismas de marea de agua dulce, marismas saladas y manglares (RSIS, 2008).

1.1.1 Humedales ribereños

Los humedales ribereños son sistemas abiertos y dinámicos, se presentan entre un ecosistemas terrestres y acuáticos, produciendo ecotonos, dificultando así su delimitación, puesto que presentan un relieve y junto con los mosaicos de vegetación pueden conformar un gran paisaje. Estos se caracterizan por la abundancia de agua y suelos aluviales fértiles, presentan una forma lineal debido a su cercanía con los ríos o arroyos y siempre se encuentran conectadas aguas arriba y abajo, así como lateralmente a los ecosistemas. En ellos fluye agua o energía en gran cantidad a diferencia de los otros humedales de agua dulce, lo que les confiera

la capacidad de retener y transformar partículas provenientes de actividades agrícolas o urbanas y con ello se evita la llegada de estas últimas a las zonas costeras (Brinson, Lugo y Brown, 1981; Bruland, 2008).

1.1.2 Marismas de agua dulce

Son humedales próximos a los océanos que combinan características de las marismas saladas y de agua dulce, lo que provoca una gran dificultad para delimitarlas, pero les confiere una estructura y funciones principalmente de las marismas saladas; sin embargo, su principal diferencia es una alta diversidad en la biota, causada por la reducción de salinidad y una alta cantidad de sedimentos orgánicos. Debido a su particularidad han sido declaradas como prioridad para su conservación, pero solo tres tipos de marismas han sido así determinadas: los pantanos maduros, los pantanos flotantes y los pantanos nuevos en deltas de progresión (Bruland, 2008; Mitsch y Gosselink, 2015a).

1.1.3 Marismas salinas

Humedales que se presentan en latitudes medias y altas donde la acumulación de sedimento puede ser mayor o igual a la tasa de hundimiento de la tierra, además dan una protección contra el oleaje y tormenta, su vegetación varía a lo largo de los gradientes de salinidad e inundaciones, el cual ofrece un hábitat para plantas y animales, algunos de ellos se adaptan al estrés de salinidad (Chapman, 1960; Mitsch y Gosselink, 2015c).

En el mundo, estos humedales presentan diferentes asociaciones de vegetación, pero su estructura ecológica y función es similar en todas ellas. Representan un ecotono entre los ecosistemas terrestres y marinos, esto permite que

ocasionalmente algunas áreas de las marismas saladas se inundan con la marea alta y no con la marea baja, lo que permite dividir la marisma salada con dos límites, superior e inferior, definidos por los rangos de marea, la tensión física, la profundidad, los efectos mecánicos del oleaje, la disponibilidad de sedimentos, la erosión y la comunidades de plantas, donde solo las plantas tolerantes al estrés salino dominan las partes bajas (Bruland, 2008; Chapman, 1960; Mitsch y Gosselink, 2015c).

1.1.4 Manglares

Los manglares son áreas con arbustos de alturas menores a 2 m y con árboles que pueden tener una altura de 30 m, desarrollándose sobre suelos saturados en agua periódica o permanentemente, en agua salinas o salobres (López Portillo *et al.*, 2010). Los bosques de manglar presentan seis tipos funcionales: de franja, ribereños, inundables (tipo islotes), arbustivos o enanos y de hamaca, parecidos a los de cuenca, pero en una porción de suelo más elevada (Spalding, Blasco y Field, 1997). En América los manglares cubren una superficie de 49,096 km² (Spalding, Blasco y Field, 1997). Se han registrado solo 13 especies nativas de mangle para América, las cuales tienen adaptaciones particulares, raíces especializadas, zancos o pneumatóforos y estructuras especializadas que les permite la absorción de oxígeno y secreción de sal (Bruland, 2008; López Portillo *et al.*, 2010; Mitsch y Gosselink, 2015c; Spalding, Blasco y Field, 1997).

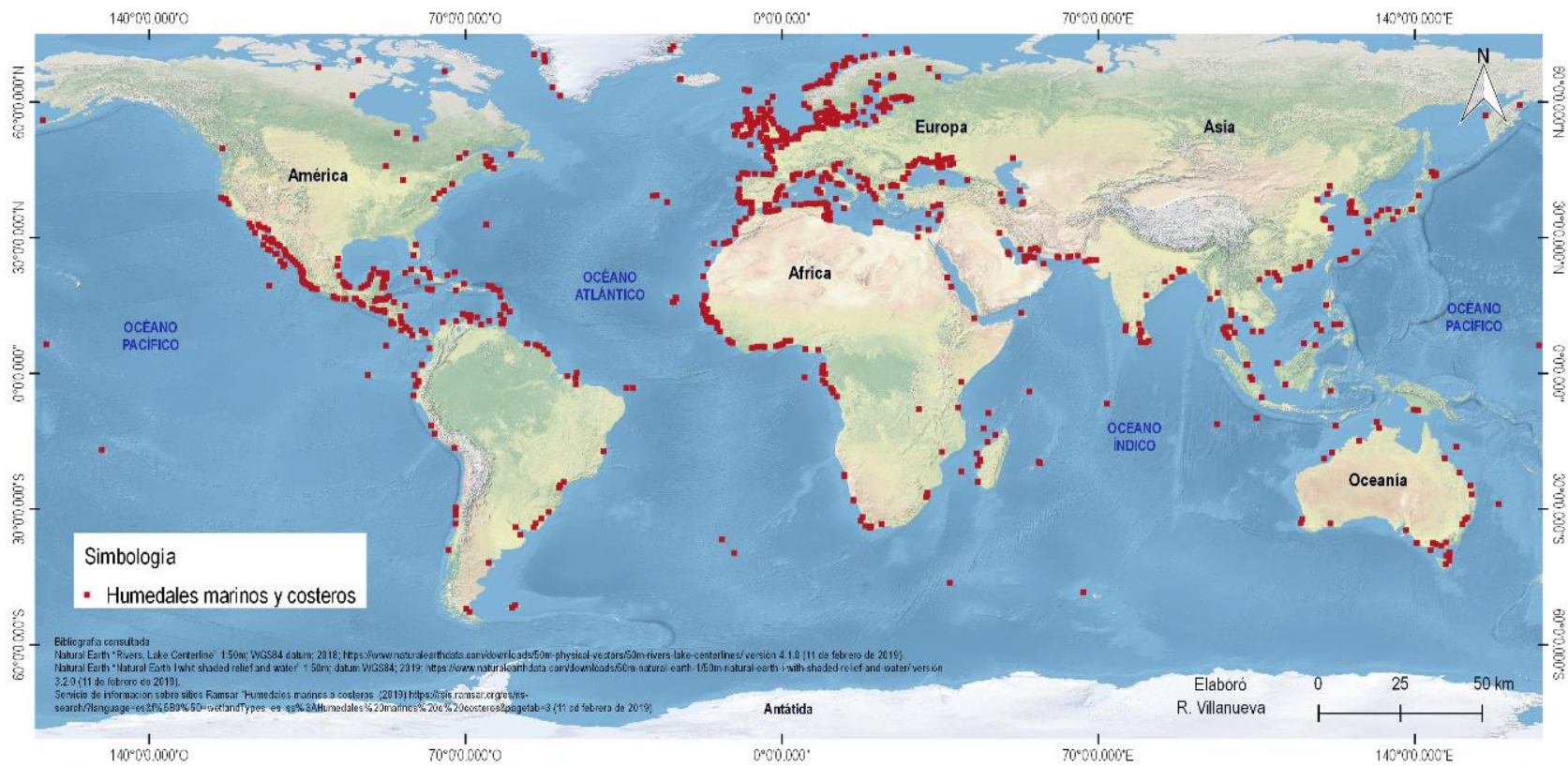


Figura 1.1. Humedales marinos y costeros definidos por Ramsar

1.2 Gestión de los humedales costeros

Durante la década de los años setenta se registró a nivel mundial la destrucción y pérdida de los humedales. Un detonante clave de esta problemática fue la falta de valoración de los recursos naturales que albergan, el paradigma dominante fue la expansión agrícola, pesquera, industrial, residencial y desarrollo comercial. El diseño de estrategias de desarrollo basadas en la productividad de los ecosistemas y comunidades se planteaba sólo a nivel científico (Dugan, 1992; Mitsch y Gosselink, 2015c). En el último cuarto del siglo XX los gobiernos reconocieron a los humedales como hábitat de vida silvestre, principalmente para las aves acuáticas, sin embargo, aún existía poca comprensión y preocupación por preservarlos (Mitsch y Gosselink, 2015a).

Actualmente se reconoce a nivel gubernamental mundial la pérdida y contaminación de los humedales costeros y se realiza su gestión con el objetivo de proteger y conservar para obtener sus servicios ambientales (Mitsch y Gosselink, 2015c). Sin embargo, la protección y conservación de los humedales costeros, incluidas en la gestión de zonas costeras, está sujeta a los intereses de los gestores y la regulación ambiental centrándose en resolver los problemas ambientales, considerando una visión integral y el análisis de los factores ecológicos, sociales y económicos (Day, Yáñez-Arancibia y Kemp, 2012; Mitsch y Gosselink, 2015a).

De acuerdo con Mitsch y Gosselink (2015a), doce objetivos son aplicables en la gestión de los humedales: 1. Mantener la calidad del agua; 2. Reducir la erosión; 3. Proteger de las inundaciones; 4. Proveer un sistema natural para los contaminantes del aire; 5. Proveer una zona de amortiguamiento entre la zona residencial y urbana

para mejorar los impactos del clima y físicos, tales como ruido; 6. Mantener una reserva genética de su biodiversidad; 7. Proveer soporte estético y fisiológico para el bienestar humano; 8. Mantener la flora y fauna nativa; 9. Controlar poblaciones de insectos; 10. Proveer hábitat para el desove de peces y otros organismos; 11. Producir comida, fibras y forraje; 12. Permitir la investigación científica.

La cooperación internacional para la conservación y gestión de los humedales costeros puede ser uno de los soportes clave para este tipo de ecosistemas, puesto que muchos de ellos comparten recursos, particularmente hídricos (sistemas fluviales internacionales) o migración de especies (aves acuáticas y peces), o simplemente porque la experiencia de otro país en la gestión o restauración podría ayudar a otros a resolver situaciones ambientales críticas (Dugan, 1992).

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) menciona que un elemento clave para su conservación y protección es mantener la calidad y cantidad del agua de la cual dependen (Assessment Millennium Ecosystem, 2005). La convención Ramsar, principal instrumento internacional para la promoción de la cooperación intergubernamental, realiza la conservación y gestión a través de las 170 Partes Contratantes y el marco de los “tres pilares”, 1. Trabajar en pro del uso racional, 2. Designar humedales idóneos para la lista de sitios de importancia internacional y garantizar el manejo idóneo y 3. La cooperación internacional en humedales transfronterizos (humedales ecológicamente cohesivos distribuidos en fronteras nacionales, donde ambas autoridades han acordado colaborar), sistemas compartidos y especies compartidas (Dugan, 1992; Ramsar, 2014a, 2018).

En 2015 Ramsar y las Partes Contratantes acordaron un conjunto de políticas y compromisos internacionales sobre un desarrollo verdaderamente sostenible, para la conservación y uso racional de los humedales, a través de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y con las Metas Aichi para la Diversidad Biológica elaboraron el Plan Estratégico 2016-2024 (Figura 1.2), el cual tiene como visión “los humedales se conservan, se utilizan sabiamente, se restauran y sus beneficios son reconocidos y valorados por todos”, además de cuatro objetivos (dirigir los factores que impulsan la pérdida y degradación de los humedales, conservar y administrar de una manera efectiva la Red de Sitios Ramsar, el uso razonable de todos los humedales y fomentar la aplicación) y 19 metas que contribuirán directamente con los ODS (Ramsar, 2016).

Cada trienio Ramsar reúne a las partes contratantes, comprometiéndose a involucrar a las poblaciones, especialmente las locales, con la finalidad de hacer crecer el bienestar humano y mitigar la pobreza (Ramsar, 2010b). Además de trabajar para el uso racional de los humedales y recursos hídricos de su territorio, basado en los planes, políticas y legislación nacional, medidas de gestión y educación, mencionando que el uso racional de los humedales es “el mantenimiento de sus características ecológicas, logrado mediante la implementación de enfoques por ecosistemas, dentro del contexto del desarrollo sostenible” (Ramsar, 2014b). Específicamente, en 1990 se hizo énfasis el uso racional: 1. Adoptar políticas nacionales con planes de acción nacional a favor del medio ambiente; 2. Elaborar programas ambientales basado en inventarios,

monitoreo, investigación, formación, educación y concientización ambiental y 3. Elaborar planes integrados de gestión de humedales (Ramsar, 2014b).

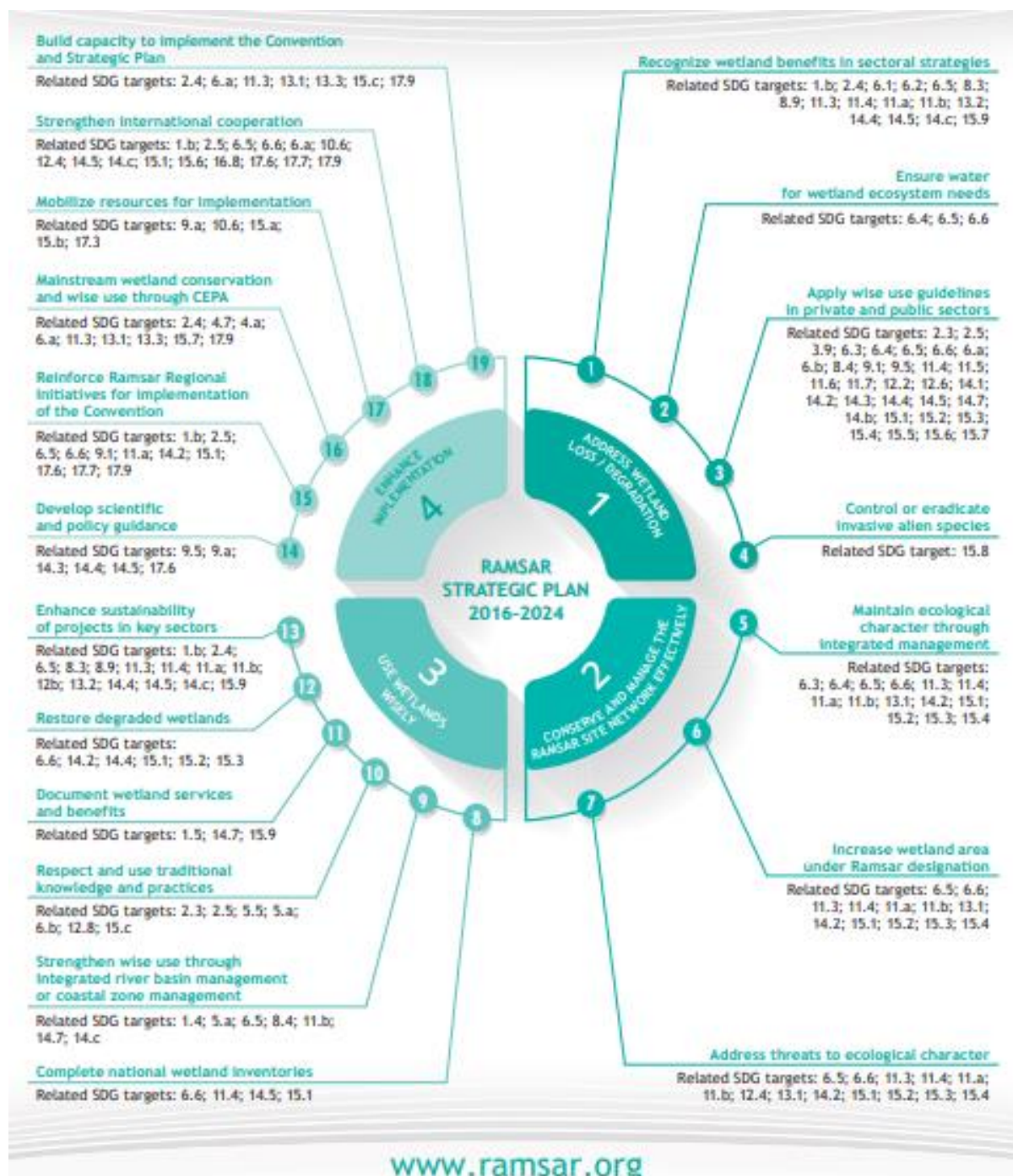


Figura 1.2. Resumen de los objetivos y metas del Plan Estratégico Ramsar, imagen tomada de Ramsar (2016).

En el mundo tres cuartas partes de las poblaciones indígenas habitan dentro, cerca o donde existió anteriormente un humedal costero, ya que los recursos hídricos y alimenticios que estos proveen son vitales (Dugan, 1992; Moreno-Casasola y Infante, 2010). Esta estrecha relación y dependencia ha sido modificada por los esquemas de desarrollo económico, los cambios en los sistemas tradicionales, la presión demográfica y el aumento del uso de suelo ocasionaron la presión ambiental y pérdida de humedales. Aunado a esto, los efectos del cambio climático como la sequía prolongada, provocaron que algunas comunidades indígenas sean afectadas (Dugan, 1992).

A lo largo de la historia de la gestión de los humedales costeros el mayor error ha sido otorgarle todo el control a los gobiernos y no considerar a las comunidades indígenas, quienes frecuentemente tienen mayor conocimiento o entendimiento del uso de los recursos naturales, ya que realizan un aprovechamiento integral y racional de los recursos para su alimento, energía, materiales para construcción, entre otros (Dugan, 1992; Moreno-Casasola y Infante, 2010). Actualmente, muchos de los servicios ambientales que proveen los humedales costeros son valorados y bien entendidos por las comunidades indígenas, por ello la correcta gestión deberá considerarlas en sus planes de manejo y primer término. (Moreno-Casasola e Infante, 2010).

1.2.1 Estudio de caso: **Gestión de los humedales costeros en la Península de Yucatán en México**

Los usos tradicionales de la zona costera comenzaron con algunas poblaciones Mayas que se asentaron a lo largo de la costa de México, su principal actividad era la extracción de sal por evapotranspiración y la pesca ribereña, posteriormente las

plantaciones de coco, actividades portuarias para la exportación de henequén y la construcción de caminos, presentando usos y abusos que ocasionó impactos ambientales y socioeconómicos (Cuadro 1.1; Herrera-Silveira et al. 2004).

Durante 30 años la gestión de los ecosistemas costeros de la Península de Yucatán ha seguido estrategias del uso del suelo de conservación, urbanización semintensiva, urbanización turística masiva y desarrollo portuario. La conservación sólo se ha implementado con el uso de áreas naturales protegidas federales, estatales y municipales, incluyendo a las comunidades locales con turismo recreativo de baja intensidad (Herrera-Silveira, Comín y Capurro, 2004).

Cuadro 1.1. Resumen de impactos sociales, económicos y ambientales de los usos y abusos de los recursos costeros de la Península de Yucatán, tomado de Herrera-Silveira et al. (2004).

Usos	Impactos ambientales	Impactos sociales
Conservación de la naturaleza	Estabilidad de los flujos de agua y calidad Protección contra tormentas Mejorar la productividad biológica (pesquerías)	Mejorar la salud y estructura económica
Vivienda tradicional y regulada	Integración de los requerimientos humanos y renovación de los recursos naturales	El enriquecimiento de la herencia cultural
Turismo integrado	Incrementar la valoración de los recursos naturales y del territorio	Aumentar los estándares de educación Estabilización socioeconómica
Abusos	Impactos ambientales	Impactos sociales
Construcción convencional de carreteras	Pérdida progresiva de hábitats Modificaciones en los flujos de agua	Incremento en la comunicación y en el transporte
Puertos industriales	Descargas de aguas residuales y desechos sólidos. Eutrofización localizada	Diversificación económica Inmigración
Turismo Extensivo	Pérdida extensiva de hábitats Extensión de la contaminación	Recreación personal y en grupo Decremento de la producción bruta
Turismo Masivo	Pérdida de hábitats Fuente puntuales de contaminación. Incremento de peligros por tormentas. Disturbios en el flujo de agua. Eutrofización intensa.	Inversiones externas rápidas Entradas y salidas fluctuantes Pérdida de identidad cultural Inmigración no estructurada Reducción de pesquerías recreativas

En la gestión de humedales costeros de la península de Yucatán han participado diferentes sectores públicos y privados en diversos tratados o planes (Tratado de Libre Comercio de América del Norte, Plan Gran Visión, Plan Puebla Panamá, Plan Nacional de Desarrollo de México), haciéndola compleja y multidisciplinaria. La reconocen como un ambiente natural valioso, característico tierra-mar, compuesta por selva baja inundable, manglar, laguna costera, isla de barrera con dunas, playas, bancos de arrecifes de coral (Herrera-Silveira, Comín y Capurro, 2004)

México es un país comprometido en seguir los planes estratégicos y alberga el mayor número de sitios Ramsar en el mundo, reconociendo 23 sitios en la Península de Yucatán (Ramsar, 2015b). México hizo la inclusión de Regiones Hidrológicas Prioritarias y Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves (Vidal *et al.*, 2015). En estos humedales se ha estimado una población de 1,200 millones de aves migratorias, las cuales son un factor importante para determinar ANP, algunas de las especies han sido utilizadas como especies bandera o sombrilla, para facilitar la gestión, ya que su naturaleza carismática favorece la creciente demanda turística para su avistamiento (Vidal *et al.*, 2015)

Lamentablemente se ha encontrado que los objetivos de los planes Ramsar no tiene relación o congruencia con las leyes y normas mexicanas (Ramsar, 2015b). Además la legislación ambiental mexicana no considera una protección ecosistémica para que los humedales costeros mantengan la integridad ecológica (conectividad, hidrología, procesos ecológicos, entre otros), sumado a esto no hay los suficientes elementos científicos para proteger y conservar los servicios de los humedales costeros, dificultando la gestión y toma de decisiones (Vidal *et al.*, 2015).

Es necesario para los humedales costeros de la Península de Yucatán: homogeneizar y priorizar la información científica de los elementos de biodiversidad, incrementar la investigación y requerimientos de hábitat para las especies, podría facilitarse mediante el uso de especies bandera o sombrilla, diseñar estrategias en las ANP que permitan la integridad y conectividad de ecosistemas, considerar la protección de la vegetación y variedades de hábitat (Vidal *et al.*, 2015).

Finalmente el estudio menciona que se debería solicitar a los tres niveles de gobierno en materia ambiental la consideración de estrategias con diferentes escalas espaciales y zonificación para las ANP (zonas de amortiguamiento y de influencia), además favorecer los sistemas de intercambio de conocimiento de expertos, principalmente de ecólogos y sociólogos, donde se realicen estrategias de gestión de ANP y en todo lo anterior se deberá de considerar el compromiso con los acuerdos Ramsar (Vidal *et al.*, 2015).

Capítulo 2. Amenazas e implicaciones de la pérdida de los humedales costeros

Los humedales costeros son ecosistemas sensibles a los efectos del cambio climático principalmente al aumento global del nivel del mar y se encuentran gravemente amenazados por diversas causas antropogénicas, sobreexplotación industrial, el crecimiento de la mancha urbana o conversión de humedales para fines pecuarios (Marín-Muñiz *et al.*, 2016). Las implicaciones de la pérdida de humedales costeros tienen grandes resultados negativos para las poblaciones, sobre todo aquellos que albergan una gran biodiversidad y se localizan en las regiones tropicales y subtropicales del mundo (Flores-Verdugo *et al.*, 2007) La

actividad humana es uno de los factores que ocasionan alteraciones directa o indirectamente, por ejemplo, el aumento en el nivel del agua de mar, descargas de nutrientes que alteran los ciclos biogeoquímicos y otras perturbaciones (drenaje, relleno parcial o total, construcción de presas) y permiten un cambio gradual o drástico (Figura 2.1; Mitsch y Gosselink 2015b).

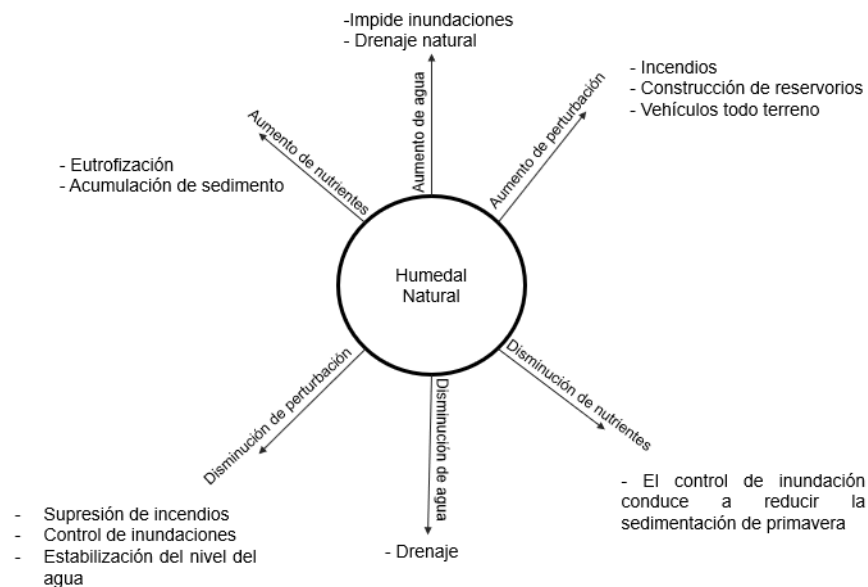


Figura 2.1. Modelos de impactos en los humedales inducidos por el hombre tomado de Mitsch y Gosselink (2015a).

2.1 Transformación de humedales

2.1.1 Transformación por drenaje, dragado y relleno

Las principales causas de la pérdida de los humedales costeros ha sido la transformación y actividades de dragado, causados por la desviación del agua, escorrentía de contaminantes y sobreexplotación industrial o agrícola. Una de las más comunes es la agrícola, en ella las inundaciones temporales o permanentes limitan y cambian las condiciones del suelo con el aporte y movilidad de nutrientes,

formando un suelo rico en nutrientes que se ha utilizado para diversos cultivos, como caña azúcar, arroz y algodón (International Wetlands, 2019; Mitsch y Gosselink, 2015a).

La transformación por el desarrollo urbano (drenaje y relleno) ocasiona una pérdida en los humedales costeros del mundo, puesto que dos tercios de la población mundial habita en ellos y ha ejercido una presión socio-ambiental, en especial durante la década de los 50's hasta la década de los 70's (Mitsch y Gosselink, 2015c). Finalmente, otra de las actividades más remarcables es la acuicultura, la cual incrementó considerablemente en la década de los 80 y 90 con una producción de 18 millones de t año⁻¹ aproximadamente (FAO, 1999; Páez-Osuna, 2005).

Estudio de caso: transformación por camaronicultura

La camaronicultura surge como respuesta a la baja de este tipo de productos en sus ambientes naturales sin que disminuyeran su demanda en los mercados. Ha transformado entre 1–15.5 millones de hectáreas en las zonas costeras de todo el mundo, principalmente en China, Tailandia, India, Indonesia, Malasia, Ecuador, México. En algunos países como la India ha provocado impactos ambientales que generaron preocupación relacionada con la salud, el uso y la sostenibilidad de los recursos naturales (Páez-Osuna 2005).

Entre 1990-1999 la producción de camarones en la India pasó de 30,000 a 102,000 ton y muchas zonas de bosques de manglar fueron destruidas, principalmente en el delta de Sundarbans donde se encuentran los bosques de manglar más extensos en el mundo (Hein, 2000). Paulatinamente, se desarrollaron cuatro tipos de cultivo de camarón, de los cuales, entre mayor sea su nivel de producción más daño

ocasiona a los ecosistemas: sistemas tradicionales, extensivos, semiintensivos e intensivos (FAO, 2009; Hein, 2000; Páez-Osuna, 2005)

La superficie convertida para cultivo de camarón fue de 65,090 a 161,570 ha, esto produjo grandes problemas ambientales como: la contaminación del agua, salinización de pozos de agua potable y de arrozales, pérdida de especies de crustáceos y crías de peces, así como conflictos sociales (Hein, 2000). En 1996 la Suprema Corte de la India comenzó a prohibir y a regular la acuicultura no tradicional de camarones en la costa por medio de la Ley de Acuicultura y la aplicación de los planes de ordenación de su zona costera. A pesar del sistema que se implementó por medio de licencias, muchos de estos sitios no cuentan con todos los requerimientos (Hein, 2000; Muralidhar *et al.*, 2012).

Actualmente estos sistemas comienzan a tener problemas por los efectos del cambio climático, como un alza en la frecuencia de inundaciones, aumento de la temperatura, así como lluvias impredecibles, por lo que mantener la producción de camarón anual resulta complicado (Hein, 2000; Muralidhar *et al.*, 2012).

2.1.2 Transformación por diques, presas y drenaje

Las modificaciones hidrológicas de los humedales cambian drásticamente las condiciones naturales, la principal de ellas es la desecación causada por la construcción de diques o drenajes cuyos propósitos son: control y transporte de agua, construcción de canales de navegación, rutas de transporte, puertos y actividad industrial petrolera (Mitsch y Gosselink, 2015c).

Estudio de caso: el canal artificial de Zaragoza

El canal se encuentra colindando en dirección sur con la Bahía de Chetumal. En 1909 fue construido, consta de dos porciones, la más externa tiene un ancho de 50 m, 1,300 m de longitud y 2.5 m de profundidad. Durante un tiempo fue cerrado y ante la reapertura, se acentuaron los cambios en la hidrología del área. Su agua típicamente salobre (salinidad de 20 psu) con influencia de agua marina, actualmente recibe un mayor aporte de agua marina e incrementó su salinidad entre 26-32 psu (Hernández-Arana y Amenityro-Angeles, 2011).

El canal artificial de Zaragoza aumentó la conectividad entre la laguna costera (Bahía de Chetumal) y el mar Caribe , lo que generó impactos ambientales como cambios en la temperatura del agua, nivel de salinidad, cubierta vegetal, materia orgánica, sedimentos, concentración de oxígeno, así como la entrada y colonización de organismos marinos, que cambiaron la estructura y función de las comunidades, (Hernández-Arana y Amenityro-Angeles, 2011). Similar a lo ocurrido en ambientes costeros de otras partes del mundo (Conesa y Jiménez-Cárceles, 2007; Sfriso, Facca y Ghetti, 2003).

2.1.3 Construcción de carreteras

La construcción de carreteras sobre humedales costeros causa cambios ambientales en periodos cortos, por ejemplo en la carga de sedimentos, la eliminación directa de la superficie forestal y principalmente en la alteración del régimen hidrológico (mareas, corrientes, escorrentía, flujo natural del agua) que es el principal suministro de energía y permite mantener las condiciones adecuadas (Mitsch y Gosselink, 2015c; Shuldiner, Cope y Newton, 1979).

La modificación del paisaje natural da lugar a muchos efectos o riesgos ecológicos difíciles de evaluar por sus resultados integrales, acumulativos o sinérgicos. Los principales efectos negativos son: pérdida de hábitat, perturbaciones ambientales, afectación o pérdida de los corredores biológicos naturales, mortalidad de la fauna silvestre, formación de un efecto barrera y cambio en el área que modifica el comportamiento de la fauna silvestre (Li *et al.*, 2014).

La vegetación, uno de los elementos más importantes de los humedales, es de los factores ambientales más afectados, puesto que el cambio en la hidrología y salinidad en los humedales costeros da lugar a cambios drásticos en la vegetación. También es particularmente influenciada por la distancia del borde del camino, la anchura, el ruido, los niveles de tráfico vehicular y el número de caminos o carreteras (Li *et al.*, 2014).

Estudio de caso: efecto de las carreteras en la fauna de humedales

Varios estudios se han realizado para conocer los efectos que tiene la construcción de carreteras en los humedales. En 1979 Shuldiner y colaboradores realizaron un análisis bibliográfico de ocho carreteras en diferentes humedales de interior y costeros de Estados Unidos. En ellos encontraron cuatro clases de efectos aparentemente predominantes: 1) la alteración del drenaje (efecto más común) 2) cambios en los patrones de entrada de agua, principalmente por la interrupción de ellos 3) el relleno o eliminación total de los humedales y 4) la creación de nuevos hábitats, donde las carreteras pueden facilitar la propagación de especies invasoras al alterar las comunidades nativas y realizar cambios en los componentes abióticos del ecosistema.

Los impactos ambientales de las carreteras afectan de una manera más rápida a la fauna silvestre que requiere de hábitats acuáticos y terrestres interconectados (Trombulak y Frissell, 2000). Los reptiles y otros grupos de fauna, como los cangrejos, realizan movimientos lentos, por lo que la construcción de carreteras provoca una pérdida significativa de su diversidad por mortalidad, fragmentación del hábitat, un efecto borde, invasión de especies exóticas y fácil acceso a áreas restringidas (Findlay y Bourdages, 2000; Hamer, Harrison y Stokeld, 2016). Un ejemplo es la tortuga australiana de cuello largo (*Chelodina longicollis*), es una especie agua dulce afectada directamente por el atropello, observándose una relación entre la densidad de carreteras y la estructura del tamaño de su población (Hamer, Harrison y Stokeld, 2016).

2.1.4 Contaminación

Los humedales costeros en el mundo son afectados por contaminantes, sin embargo, se ha demostrado que tienen la capacidad para limpiar el agua, mediante un proceso de filtración. Contrariamente, el exceso de contaminantes o carga de elementos químicos como: fósforo, metales, aceites y otros compuestos tóxicos puede causar cambios drásticos en la vegetación, deformidades excesivas en los organismos de los humedales o muerte (Mitsch y Gosselink, 2015c).

Estudio de caso: *Deepwater horizon* y el pozo de Macondo

Uno de los eventos de contaminación más importantes a nivel mundial fue el 20 de abril del año 2010 en el Golfo de México, cerca del delta del río Misisipi. Una explosión proveniente de la plataforma de perforación *Deepwater Horizon* y el pozo de Macondo provocaron el peor derrame de petróleo marino registrado. El evento

registró la liberación de 205 millones de petróleo crudo y de 260,000 a 520,000 toneladas de metano durante un periodo de 87 días (Blum *et al.*, 2014).

El petróleo se movió por el Golfo de México en dirección norte hasta llegar a las costas de Luisiana y Florida. En 9 días ingresó en los humedales de Luisiana sobre la desembocadura del río Mississippi y en un mes el petróleo cubrió las costas y playas de la mayor parte del delta del río Mississippi, considerado el complejo de humedales continentales más grandes de los Estados Unidos. Finalmente, el petróleo cubrió casi 4,000 millas lineales de la costa norte del Golfo de México, donde se encuentran ecosistemas costeros de importancia, para cientos de especies de aves acuáticas migratorias invernales. Por lo tanto, la explosión ha puesto en riesgo el bienestar ecológico y económico de la región norte del Golfo (Blum *et al.*, 2014).

2.1.5 Introducción de especies exóticas

La modificación de las condiciones ambientales en los ecosistemas causadas por las actividades humanas, alteran directa e indirectamente la estructura y función de las diversas comunidades y facilita la invasión de especies exóticas (Catford *et al.*, 2011). Por ello, si las especies nativas carecen de lo necesario para ocupar un lugar en el ecosistema y se da la introducción o fuga de especies exóticas, éstas pueden alterar las condiciones ambientales a su favor, brindando una gran oportunidad a sus poblaciones para establecerse (Catford *et al.*, 2011; Moles, Gruber y Bonser, 2008).

Las especies exóticas son una amenaza para los ecosistemas, consumen y eliminan especies nativas, así como compiten por sus recursos, infectan con

enfermedades y alteran las condiciones ambientales, lo que hace costosa la restauración o incluso devolver condiciones más deseables que involucren una mejor composición de especies, estructura de la comunidad o recuperación de la funcionalidad del ecosistema (D'Antonio y Meyerson, 2002; NOSS, 1990; Vitousek *et al.*, 1997).

Estudio de caso: la acuicultura y los peces invasores en el sureste de México

La acuicultura en México ha sido una actividad históricamente basada en la reproducción casi exclusiva de peces exóticos, se han reportado 94 especies de peces exóticos y se han puesto en riesgo a muchas de las especies nativas (Contreras-Balderas *et al.*, 2008; Espinosa-Pérez, 2014). En el sureste de México (Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo) se han registrado especies de peces de África, Asia, así como del sur, norte y centro de América, incluso en Áreas Naturales Protegidas y en regiones prioritarias para su conservación (Amador-del Ángel y Wakida-Kusunoki, 2014).

Tres de ellas fueron introducidas accidentalmente (uso ornamental; *Pterygoplichthys pardalis*, *P. disjunctivus* en sistemas dulceacuícola y lagunares, *Pterois volitans* en ecosistemas arrecifales y estuarinos) y otra fue para el control biológico de la vegetación acuática (*Ctenopharyngodon idella*; (Amador-del Ángel y Wakida-Kusunoki, 2014), pero la principal causa de su invasión de las dos primeras especies fue la crecida de los cuerpos de agua. El principal efecto negativo que se ha reportado a causa de las especies invasoras es el desplazamiento y desaparición de especies endémicas en al menos 100 localidades dispersas en el país (Amador-del Ángel y Wakida-Kusunoki, 2014). Particularmente Schmitter-Soto y

colaboradores (2006) han reportado la extinción de especies de la familia Cichlidae (mojarras de agua dulce) y Cyprinodontidae (endémicos de la laguna de Chichankanab).

2.2 Pérdida de los humedales costeros: tendencias de cambio

El valor de los humedales costeros se centra en la satisfacer las necesidades de desarrollo, basadas en el mantenimiento de su integridad funcional que permite obtener una amplia gama de servicios y productos en condiciones naturales y bajo la correcta gestión para su conservación (Dugan, 1992).

Los humedales costeros forman parte de la historia de la humanidad y hoy en día su conservación es muy importante para el mantenimiento de los servicios ambientales que proveen. Para ello dos factores ambientales son importantes: la hidrología, que contempla la cantidad, calidad así como la estacionalidad de la inundación y la salinidad, la cual produce la heterogeneidad ambiental (Flores-Verdugo *et al.*, 2007; Moreno-Casasola, 2008). Sin embargo, existen tres factores que producen alteración y pérdida de los humedales costeros:

1. Los cambios demográficos y el desarrollo en zonas costeras son los que mayor impacto tienen debido al crecimiento exponencial de la población, la cual produce fuertes cambios en los recursos naturales terrestres y marinos;
2. Cambios generados por el desarrollo económico, el turismo, industrias y uso urbano y
3. Las actividades productivas, como las acuícolas y agropecuarias, que generan un cambio en el uso del suelo (Moreno-Casasola, 2008).

Las tendencias actuales sobre la pérdida de los humedales costeros darán lugar a la desaparición de importantes servicios ecosistémicos como: fuentes de alimento o medicina, filtración de aguas residuales o protección contra tormentas (Ramsar, 2015b). Un ejemplo de esto lo que menciona el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2014), el cual argumenta que si continúa la afectación y pérdida de los humedales costeros, alrededor del 35% de la superficie de manglares en el sureste de Asia y el 38% en Indonesia podría desaparecer entre 2000 – 2050 (Ramsar, 2015b; Van, Sullivan y Nakamura, 2014).

2.3 Humedales costeros afectados por el cambio climático

Las consecuencias del cambio climático pueden ser severas, desde pequeños cambios en la vida diaria, como exposición a los rayos del sol, hasta inundaciones catastróficas (Naciones Unidas, 2019). Actividades humanas como la industrialización, deforestación, agricultura, construcción de zonas urbanas y ganadería incrementan la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera a una cantidad alarmante (Naciones Unidas, 2019).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, creado por la Organización de Meteorológica Mundial y la ONU Medio Ambiente divulgó información sobre las actividades humanas y el cambio climático en su Quinto Informe (IPCC, 2014), en el cual presenta los siguientes datos: “entre 1880 a 2012 la temperatura media anual aumentó 0.85 °C; de 1901 a 2010 el nivel medio del mar incrementó 19 cm debido al derretimiento del hielo. Así mismo, el agua de los océanos incrementó su temperatura, con ello el hielo y la nieve ha disminuido, reportándose una pérdida de 106 km² de hielo por cada 10 años” (IPCC, 2014).

Los efectos del cambio climático continuaron a pesar de parar las emisiones de GEI, se pronostica que la temperatura del agua de los océanos incrementará y el deshielo persistirá, para 2065 el nivel medio del mar podría presentar un aumento de entre 24 y 30 cm y para el 2100 podría ser de 40 a 63 cm. Por ello, el cambio climático es considerado una amenaza para los humedales costeros, puesto que a nivel mundial comprende grandes afectaciones ambientales, como el cambio en la hidrología y vegetación (Brix *et al.*, 2012; Burkett y Kusler, 2000; Ferrati, Canziani y Ruiz Moreno, 2005; Mehvar *et al.*, 2019; Peñuelas *et al.*, 2018; Williams *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2019).

Se considera que estos ecosistemas se deberán manejar de una forma particular, debido a que la hidrología de cada humedal es singular, por lo que los cambios o toma de decisiones futuras deberán considerarse de una manera específica por región (Erwin, 2009; Ferrati, Canziani y Ruiz Moreno, 2005).

La reducción de impactos ambientales causados por las actividades antropogénicas puede prevenir o minimizar la respuesta de los humedales por el cambio climático, algunas de estas acciones que se pueden implementar son: el mantenimiento de la hidrología, reducción de contaminación, control de especies exóticas (principalmente de vegetación) y protección de la flora y fauna (Erwin, 2009; Ferrati, Canziani y Ruiz Moreno, 2005).

La convención Ramsar ha clasificado a los humedales costeros de acuerdo con las amenazas generadas por el cambio climático y clima severo, tiene un total de 171 sitios que ocupan una superficie de 18,172,568 ha en todo el mundo. Particularmente para América Latina y América del norte se reportan 46 sitios

(2,919.720 ha), siendo México el país que más sitios Ramsar reporta con estas características (21 sitios), seguido de los Estados Unidos con ocho sitios (Ramsar, 2019; RSIS, 2008).

El estudio de Alongi (2007) menciona que los manglares podrían ser afectados por el cambio climático y sólo algunos de ellos sobrevivirán o adaptarán. Alongi (2007) consideró dos criterios para la delimitación de las áreas de manglar: la tasa actual de deforestación y si es un área de manglar protegida en una reserva marina. En su predicción obtuvo que los manglares que se encuentran a lo largo de las costas húmedas tropicales (“macro-mareales/>4m”) y en las áreas adyacentes a la desembocadura de los ríos, serán las menos vulnerables, con ello predice que existirá una gran afectación a este tipo de humedales costeros, algunos de ellos son: los que se encuentran entre el océano Atlántico y el Mar Caribe, el Mar Rojo, en la costa sureste de Tanzania, Mozambique, Kenia y Somalia; los del golfo de Bengala, entre otros.

El estudio de Barros y Albernaz (2015) menciona que para la región Amazónica habrá consecuencias graves por los efectos del cambio climático, principalmente en los patrones hidrológicos, porque los periodos de sequía o inundación pueden variar y causar la pérdida de los ecosistemas húmedos (en especial de manglares), lo que consecutivamente puede generar una pérdida de biodiversidad adaptada y caracterizada a fluctuaciones en el régimen fluvial - lacustre y fluvial – marino.

El papel de los humedales costeros y el secuestro de carbono ha sido considerado un factor importante en el presupuesto mundial de carbono y en futuros escenarios de cambio climático (Negandhi *et al.*, 2019). Algunos estudios estiman que el

secuestro de carbono varía de acuerdo a la temperatura y el área. Los humedales costeros son los que más carbono secuestran, particularmente los de agua dulce templada (Mitsch y Gosselink, 2015c).

Los efectos del cambio climático se centran en la hidrología de los humedales costeros, pero es necesario conocer el origen de las afectaciones causadas en las funciones hidrológicas, para ello se implementó el concepto de “resiliencia hidrológica”, derivado de resiliencia ecológica, refiriéndose a la capacidad de los humedales para absorber una perturbación y retornar a la función hidrológica anterior a la afectación (Folke *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2019). Este concepto presenta dos aspectos importantes: el tamaño de la afectación o perturbación, el cual tiene que soportar el ecosistema sin cambiar su función hidrológica natural y la tasa de retorno a un estado previo a la perturbación (Gunderson, 2000; Zhang *et al.*, 2019).

Una de las mejores respuestas de la resiliencia de los humedales costeros es visualizar los efectos negativos a escala regional, conocer las fuentes de suministro de agua y los sumideros de los componentes adyacentes del paisaje (tierras altas u océanos) que controlan la hidrodinámica. Además, es necesario contemplar los análisis históricos durante un largo periodo, puesto que es más fácil encontrar alguna respuesta (Zhang *et al.*, 2019).

2.4 Servicios ambientales de los humedales costeros

Los humedales costeros son importantes porque son proveedores de numerosos servicios ambientales, siendo caracterizados en función de su clase, tamaño y

ubicación (CBD, 2015; Moreno-Casasola, 2005; Ramsar, 2002). No todos los humedales costeros presentan los mismos servicios ambientales, esto depende de muchos factores como las interacciones biológicas, químicas o físicas del sitio, que dan como resultado la generación de ciertos atributos (Dugan, 1992). Por ello, tienen una correlación con la calidad de vida, ya que los diversos factores, ayudan a mantenerlos y satisfacer las necesidades del ser humano (Moreno-Casasola 2005; CBD 2015). Los servicios ecosistémicos del agua permiten: las áreas productivas para la agricultura, sitios para las aves acuáticas del mundo, especialmente para las migratorias, recursos alimenticios, valor por su uso recreacional, histórico, científico y cultural (Mitsch y Gosselink, 2015a; Ramsar, 2002)

Muchos servicios ambientales son gratuitos y en diferentes partes del mundo alivian la pobreza, por ejemplo las comunidades se favorecen cuando los servicios ecosistémicos son bastos y sufren cuando se degradan, aquellas que viven en los manglares se benefician principalmente de la pesca y la obtención de madera (CBD, 2015; Van, Sullivan y Nakamura, 2014)

El vínculo que existe entre el grado de conservación y los servicios ambientales está muy relacionado con la calidad, cantidad y mantenimiento de éstos (CBD, 2015; Moreno-Casasola, 2005; Ramsar, 2015b). Anteriormente, los servicios ambientales eran categorizados en tres niveles jerárquicos. El primero, el *valor de la población* incluye y se relaciona con las provisiones de hábitat, la caza de animales, recolección de madera. El segundo nivel consistía en valores del ecosistema, enfocados en la mejora de la calidad del agua, la mitigación de inundaciones y

tormentas, recarga de acuíferos, sustento para las comunidades. El tercer nivel contemplaba los valores globales, basados en mantener las influencias de calidad del agua y aire en una escala más amplia que a nivel de ecosistema, vigilar los ciclos biogeoquímicos del nitrógeno, azufre y carbono (Mitsch y Gosselink, 2015a).

La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (EEM) fue un proyecto exhaustivo sobre los ecosistemas del mundo y los servicios ambientales que proveen, donde el resultado indica que el aprovechamiento y demanda de los servicios ambientales durante los últimos 50 años ha ido en un aumento, lo que ha dado lugar a cambios en muchos ecosistemas (Onaindia, 2010; Ramsar, 2002). La EEM (Assessment Millennium Ecosystem, 2005) al igual que diversos autores (Assessment Millennium Ecosystem, 2005; CBD, 2015; Dugan, 1992; Ramsar, 2015b; Van, Sullivan y Nakamura, 2014) clasificó los servicios ambientales para todos los ecosistemas en cuatro categorías: provisión, regulación, culturales y de soporte, descritos más adelante, además de determinar cuatro componentes de bienestar humano de acuerdo a un potencial económico e indirectamente según la intensidad del vínculo entre los servicios ecosistémicos y el bienestar humano (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**; Figura 2.2. Esquema de los diferentes tipos de servicios ambientales y su relación con el bienestar humano (tomado de Assessment Millennium Ecosystem 2005). El color de las flechas representa el potencial para los factores económicos y el grosor de la flecha la intensidad del vínculo entre los servicios ecosistémicos y el bienestar humano. Figura 2.2).

El primer componente, la “seguridad”, se refiere al acceso seguro de los recursos naturales y protección ante los fenómenos naturales, este se relaciona con fuertes

eventos climáticos o con el aprovisionamiento de suministros naturales (madera, leña, pesca). El segundo componente es el “acceso” a material básico para una buena vida, por ejemplo el abastecimiento de alimentos, vivienda o bienes, el acceso a un ingreso económico por medio del turismo recreacional, la disponibilidad de agua para conservar el funcionamiento del ecosistema y satisfacer las necesidades personales.

El tercer componente es “salud”, otorga una buena calidad de vida, por ejemplo, el agua limpia, alimentos con fuente de proteína, productos forestales como leña, medicina tradicional. El cuarto, “buenas relaciones sociales”, se refiere a tener una excelente relación entre comunidades cercanas y con los visitantes que viven las experiencias de turismo recreacional, religiosas, espirituales o culturales a través de la vida tradicional de las comunidades locales.

2.4.1 Servicios de provisión

Son recursos tangibles, contabilizados y consumibles, pueden ser o no renovables, algunos de ellos son: alimentos, agua, fibras y combustibles o productos bioquímicos (CBD, 2015; Moreno-Casasola, 2005; Ramsar, 2015b). Se pueden encontrar en casi todos los tipos de humedales costeros, particularmente el servicio de comida es el único que se encuentra en todos los humedales costeros, este se centra en la producción pesquera, obtención de algas, plantas y otros invertebrados, sin embargo, varía la intensidad de producción (Assessment Millennium Ecosystem, 2005; Dugan, 1992).



Figura 2.2. Esquema de los diferentes tipos de servicios ambientales y su relación con el bienestar humano (tomado de Assessment Millennium Ecosystem 2005). El color de las flechas representa el potencial para los factores económicos y el grosor de la flecha la intensidad del vínculo entre los servicios ecosistémicos y el bienestar humano.

Los humedales costeros sostienen la vida de poblaciones de peces y otras formas de vida silvestre, debido a que brindan una zona de protección (desove, criadero, refugio o hábitat). Algunos son áreas destinadas a la ganadería como sitios de pastoreo, en ocasiones las hojas, los pastos y los frutos, pueden ser recolectados como forraje, para su venta o mantenimiento del ganado (Assessment Millennium Ecosystem, 2005; Dugan, 1992). Este aprovechamiento puede traer grandes beneficios a las comunidades involucradas, siempre que se respete la tasa de reproducción anual y la capacidad de regeneración de cada especie (Assessment Millennium Ecosystem, 2005; Dugan, 1992).

2.4.2 Servicios de regulación

Otorgan el mantenimiento a los procesos y las funciones naturales de los ecosistemas, entre ellos se destaca la regulación de: clima, composición química de la atmósfera (incluidos los gases del efecto invernadero), temperatura, precipitación, y algunos otros procesos, como la estabilización de microclimas, puesto que los ciclos hidrológicos, de nutrientes, materia y flujo de energía otorgan la estabilización de las condiciones climáticas locales, particularmente de precipitación y temperatura (Assessment Millennium Ecosystem, 2005; Dugan, 1992).

Estos servicios permiten mantener el régimen hidrológico (recarga, descarga, y almacén del agua, importante para el almacenamiento y prevención de inundaciones inusuales); controlan la contaminación mediante la retención, recuperación y remoción de excesos de nutrientes; ofrecen protección contra la erosión, retienen el suelo y contribuyen a la prevención de los cambios en la estructura de los humedales costeros (CBD, 2015; Moreno-Casasola, 2005; Ramsar, 2015b). La protección contra la erosión se lleva a cabo por la vegetación, que estabiliza la zona costera y reduce la energía de las olas, corrientes y otras fuerzas de erosión, y con las raíces retiene los sedimentos de fondo (Assessment Millennium Ecosystem, 2005; Dugan, 1992).

2.4.3 Servicios de cultura

Este tipo de servicios son el resultado de la percepción del hombre, relación con la función o valor que cada cultura les otorga. Pueden ser de inspiración o espirituales, afines con los sentimientos personales o religiosos, de educación, recreacionales,

oportunidades para el turismo y actividades recreacionales (CBD, 2015; Moreno-Casasola, 2005; Ramsar, 2015b). Los significados culturales se basan en sentimiento personales y espirituales con el soporte de amplios paisajes y especies de vida silvestre que en ocasiones pueden otorgar inspiración artística (Assessment Millennium Ecosystem, 2005; Van, Sullivan y Nakamura, 2014).

Durante siglos algunos de los humedales costeros, principalmente manglares, han sido fundamentales para la subsistencia de las comunidades locales, puesto que forman parte de su patrimonio cultural e identidad. En algunas comunidades los servicios de cultura permiten mantener los métodos de pesca tradicional, los usos y métodos de recolección de especies de flora y fauna, así como los conocimientos ecológicos (Van, Sullivan y Nakamura, 2014).

En algunas otras presentan un eslabón entre las creencias y prácticas espirituales como: festivales, ritos religiosos, tabúes o áreas sagradas. Un ejemplo, es en Papúa Occidental, Indonesia, con la comunidad Asmat de Irian Jaya, ellos creen que el creador realizó figuras humanas de raíz de manglar que cobraron vida una vez que tocaron el tambor de un árbol de manglar, esto permitió que los pobladores se volvieran artesanos de madera (raíz de manglar) y la utilicen de una manera espiritual (Assessment Millennium Ecosystem, 2005; Van, Sullivan y Nakamura, 2014).

Otro de sus servicios culturales es sobre los servicios de recreación, principalmente actividades turísticas y oportunidades recreacionales, éstas en los humedales incluyen la caza deportiva, la pesca, observación de aves, interpretación de senderos o paseos marinos, la fotografía de naturaleza, enfocada a especies como

aves migratorias, peces, corales o diversos paisajes, la natación, el buceo, la navegación en veleros, kayak, snorkel, entre otros (Assessment Millennium Ecosystem, 2005; Dugan, 1992; Van, Sullivan y Nakamura, 2014)

Particularmente, los humedales costeros, son un centro de investigación o de educación ambiental, principalmente sobre estudios ecológicos e hidrográficos, los cuales se han convertido en laboratorios vivos que han contribuido al conocimiento y divulgación, principalmente sobre la vida marina y la conexión entre los ecosistemas de agua dulce y marinos, aportando información a los vínculos entre la salud del ecosistema costero y el bienestar humano (Assessment Millennium Ecosystem, 2005; Van, Sullivan y Nakamura, 2014).

2.4.4 Servicios de soporte

Mantienen los procesos de los ecosistemas, así como permiten proveer el resto de los servicios ambientales y no siempre están implicados en el bienestar humano. Estos pueden ser, biodiversidad, hábitats temporales o permanentes para especies, formación del suelo, retención de sedimentos y acumulación de materia orgánica, continuación del ciclo de nutrientes (como almacenamiento, reciclado, y adquisición de ellos) y polinización (CBD, 2015; Moreno-Casasola, 2005; Ramsar, 2015b)

Uno de los más importantes es el de biodiversidad, el cual se caracteriza por la conformación de hábitats para especies residentes o migratorias. La diversidad de especies ha sido una de las características particulares de los humedales costeros, pues en ella se encuentran determinadas especies, algunas de ellas son endémicas o en peligro de extinción (Assessment Millennium Ecosystem, 2005; Dugan, 1992; Van, Sullivan y Nakamura, 2014)

La retención de sedimentos y acumulación de materia orgánica favorece la calidad, principalmente del agua, ya que puede funcionar como una planta de tratamiento de agua, debido a la concentración de los nutrientes durante los diferentes periodos de inundación, sin embargo el exceso de nutrientes causa condiciones eutróficas y grandes alteraciones (Assessment Millennium Ecosystem, 2005; Dugan, 1992; Van, Sullivan y Nakamura, 2014)

Cuadro 2.1. Servicios ambientales de la clasificación de humedales costeros con su magnitud relativa (por unidad de área) tomada de Assessment Millennium Ecosystem (2005).

Tipo de humedal costero		Estuarios y marismas	Manglares	Lagunas, incluye estanques de sal	Pisos intermareales, playas y dunas	Algas	Arrecifes de concha y roca	Lechos de pastos marinos	Arrecifes de coral
Provisión									
Alimento	Producción de peces, algas e invertebrados	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Agua dulce	Almacenamiento y retención de agua, provisión de agua para irrigación y potable	◆		◆					
Fibras, combustible, madera	Producción de madera, leña, forraje	◆	◆	◆					
Productos bioquímicos	Extracción de materiales de la biota	◆	◆			◆			◆
Materiales genéticos	Medicina, genes para resistencia a patógenos de plantas, especies ornamentales.	◆	◆	◆		◆			◆
Regulación									
Cambio climático	Regulación de gases de efecto invernadero, temperatura, precipitación y otros procesos climáticos; composición química de la atmósfera	◆	◆	◆	◆		◆	◆	◆
Regulación biológica	Resistencia de especies invasoras, interacción entre diferentes niveles tróficos, preserva la diversidad funcional e interacciones	◆	◆	◆	◆		◆		◆
Régimen hidrológico	Recarga y descarga de agua subterránea, almacenamiento de agua para la agricultura o la industria	◆		◆					

Tipo de humedal costero		Estuarios y marismas	Manglares	Lagunas, incluye estanques de sal	Pisos intermareales, playas y dunas	Algas	Arrecifes de concha y roca	Lechos de pastos marinos	Arrecifes de coral
Control de contaminación y desintoxicación	Retención, recuperación y eliminación y desintoxicación de exceso de nutrientes y contaminantes	◆	◆	◆		?	◆	◆	◆
Protección contra la erosión	Retención del suelo	◆	◆	◆				◆	◆
Peligros naturales	Control de inundaciones, protección contra tormentas	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Cultural									
Espiritual e inspiracional	Sentimientos personales	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Recreación	Oportunidades para el turismo y actividades recreacionales	◆	◆	◆	◆	◆			◆
Estético	Apreciación de características naturales.	◆	◆	◆	◆				◆
Educacional	Oportunidades educación y capacitación formal e informal	◆	◆	◆	◆		◆		◆
Soporte									
Biodiversidad	Hábitats para especies residentes o migratorias	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Formación del suelo	Sedimentación, retención y acumulación de materia orgánica	◆	◆	◆	◆				
Ciclo de nutrientes	Almacenamiento, reciclado, procesamiento y adquisición de nutrientes	◆	◆	◆	◆	◆	◆		

Magnitud relativa

◆ Alta ◆ Media ◆ Baja;

Capítulo 3. Técnicas y metodologías para la restauración de los humedales costeros

Los ecosistemas son definidos como conjuntos de factores bióticos y abióticos, cuyos componentes varían con el tiempo y espacio, interactúan y se integran (Sánchez, 2005). Cada uno de ellos tiene un cierto grado de resistencia a cambios causados por perturbaciones, que pueden ser contrarrestados, permitiéndole un nivel de resistencia y estabilidad; de la misma forma poseen resiliencia, que dirige la perturbación a un estado anterior al disturbio, es decir, “restaurarlo” de una manera eficiente, natural y autónoma (Begon, Townsend y Harper, 2006a; Sánchez, 2005). Sin embargo, la extensión y frecuencia de la alteración puede causar que un ecosistema no tenga resistencia ni resiliencia (Begon, Townsend y Harper, 2006a).

La palabra restaurar deriva del latín *restaurāre*, que significa volver a poner en pie (erigir) o restablecer (Real Academia Española, 2019). La restauración ecológica se podría entender como el regreso de un ecosistema perturbado por las actividades humanas, a su estado previo, sin embargo, es un proceso complejo que requiere estudios del grado de fragilidad y robustez así como del proceso de sucesión que tendrá hasta lograr que su trayectoria sea autónoma, viable y estable (Sánchez, 2005). También se podría definir como el proceso de ayuda al restablecimiento de un ecosistema que se ha degradado, dañado o destruido, y de manera más general como la acción intencional que inicia o acelera la auto-reparación de un ecosistema (Scheffer y Carpenter, 2003; Society for Ecological Restoration (SER) International, 2004).

Particularmente, Sánchez (2007) plantea que la restauración es regresar el ecosistema a las condiciones con las cuales sea capaz de tomar una trayectoria ecológica autónoma (autosustentable). Debido a la complejidad de los sistemas ecológicos y a su importancia para la continuación de la evolución de las especies, la restauración ecológica debe ejecutarse considerando lo siguiente: 1) la ayuda humana que permite en gran medida las acciones de restauración, por ejemplo, son de gran utilidad los inventarios de flora o fauna, el conocimiento de la estructura y función del ecosistema así como la información histórica del área; 2. Las especies del área y 3) aproximar la reconstrucción guardando los componentes originales (Lindig-Cisneros y Zambrano, 2007).

La restauración de los ecosistemas, incluyendo los humedales, tiene como objetivos: 1) poder detectar con anticipación y a una escala correcta los daños que podría sufrir un ecosistema o los procesos ecológicos de éste y 2) la recuperación de sitios degradados o destruidos, es decir mejorar y restaurar las condiciones ambientales así como los procesos ecológicos naturales, incluyendo la biodiversidad, para que el ecosistema cumpla con las mismas funciones que en su estado original y a la vez pueda mantener los servicios ambientales (Assessment Millennium Ecosystem, 2005; Sánchez, 2005).

Existe una gran necesidad por continuar con el desarrollo y mejora de las técnicas o metodologías para la restauración de los humedales costeros, ya que puede mitigar grandes impactos ambientales como el cambio climático o la pérdida de biodiversidad y de los servicios que proveen (Nilsson y Aradottir, 2013). Muchas de estas se basan en tres elementos básicos, el agua, la biota y el suelo, sin embargo,

el componente hidrológico es el principal factor e indispensable para la restauración (Zhao *et al.*, 2016).

Los humedales costeros y su restauración agrupan varios ecosistemas como popales, tulares, popal-tular, manglares, marismas, así como selvas y palmares, inundables, los cuales definen grandes mosaicos delimitados por gradientes microtopográficos, donde su principal factor recae sobre la salinidad y el grado de inundación, que dan como resultado una composición, estructura vegetal y dinámica particular (Flores-Verdugo *et al.*, 2007).

La restauración de humedales costeros incluye experimentos en combinación con la vegetación, medición de diversos factores físicos como la salinidad y la hidrología, y biológicos como las invasiones de especies exóticas o antropogénicas, asimismo incluye otros estudios como los de contaminación y de salud (Scott, Frail-Gauthier y Mudie, 2014a). El diseño de las estrategias de restauración en humedales costeros podría centrarse en su valoración económica y ambiental. A su vez ésta podría mejorar las políticas públicas y ayudar a los tomadores de decisiones y comunidades involucradas, de tal manera que sea una restauración socialmente eficiente (Pueyo-Ros *et al.*, 2018; Tan *et al.*, 2018).

3.1 Estrategias de la restauración ecológica

Márquez-Huitzil (2005a), Montes y colaboradores (2007) y Perrow y Davy (2002) han implementado distintas estrategias con la finalidad de controlar, mitigar o revertir los efectos de degradación, por ello la recuperación de los humedales

degradados presenta varios caminos según los objetivos deseados, los cuales se describen a continuación:

-Restauración ecológica: intenta restablecer la organización y funcionamiento de un ecosistema degradado o destruido. Además, toma en cuenta las condiciones dinámicas de referencia semejantes a las originales (antes de sus afectaciones). Se realiza con ayuda de un programa coordinado por diferentes actores a corto, medio y largo plazo.

-Rehabilitación: son aquellos proyectos que no tienen como objetivo recuperar las funciones alteradas, si no, solo algunos elementos de su estructura, generalmente, coinciden con poblaciones o comunidades de organismos en leyes y convenios nacionales o internacionales sobre la conservación.

-Recreación: son acciones con el objetivo de crear elementos de ecosistemas o ecosistemas que no existían antes del origen de la perturbación antrópica.

-Remediación: son actividades o técnicas cuyo objetivo es tener un buen desempeño en el proceso y no en el fin. Su principal finalidad es eliminar todo agente causante de deterioro como sustancias contaminantes vertidas en agua, suelo o aire.

-Saneamiento: no existe ninguna intención de regresarlo a su estado original, solo de regresarlo a uno funcional y útil, podría decirse tener un equivalente al estado original, un ecosistema sustituto.

-Mejoramiento: son actividades que benefician el estado de un ecosistema, ya sea en proceso de restauración o no, cuyos objetivos pueden dirigirse al establecimiento de un ecosistema alternativo.

-Mitigación: es un término que tiene poco que ver la con la restauración, puesto que su objetivo es minimizar o moderar un efecto negativo en el ecosistema.

-Recubrimiento vegetal: puede implicar sólo el fortalecer los procesos de sucesión vegetal, productividad, ecología del suelo, incorporación y fijación de nutrientes, cuyo objetivo, es permitir el regreso a un estado original por si sólo solamente estableciendo especies de vegetación o fauna nativas para el recubrimiento.

La restauración intenta regresar a un ecosistema a su trayectoria histórica, por lo tanto, esas condiciones son el punto de partida ideal para establecer los objetivos de la restauración. Sin embargo, el camino para obtener las condiciones originales está limitado por las actuales, y en ocasiones puede orientar su desarrollo por un camino diferente, causar dificultades o imposibilitar su rehabilitación (Figura 3.1; Society for Ecological Restoration International 2004). Por ello, los proyectos de restauración no siempre logran los objetivos deseados y en ocasiones los modelos de restauración presentan una la trayectoria con diferentes opciones, causando o imposibilitando el retorno de un estado de sucesión avanzado o deseado (estructural o funcional).

La estrategia utilizada para los objetivos del proyecto de restauración dependerá de las características o procesos que se busque recuperar, puesto que cada proyecto es particular y único. Por ello, es importante que al iniciar un proyecto de

restauración se deberá de conocer la estructura, composición de biodiversidad y funcionalidad original del ecosistema (Márquez-Huitzil, 2005a).

Márquez-Huitzil (2005b) menciona cinco pasos durante las actividades de restauración: 1. Identificar y terminar la causa de afectación o disturbio; 2. Mitigar los efectos producidos por la afectación o disturbio; 3. Encaminar los objetivos a las condiciones más semejantes al ecosistema de referencia; 4. Incorporar elementos de biodiversidad y abióticos originales y 5. Monitorear y modificar los trabajos de restauración, siempre considerando los objetivos originales.

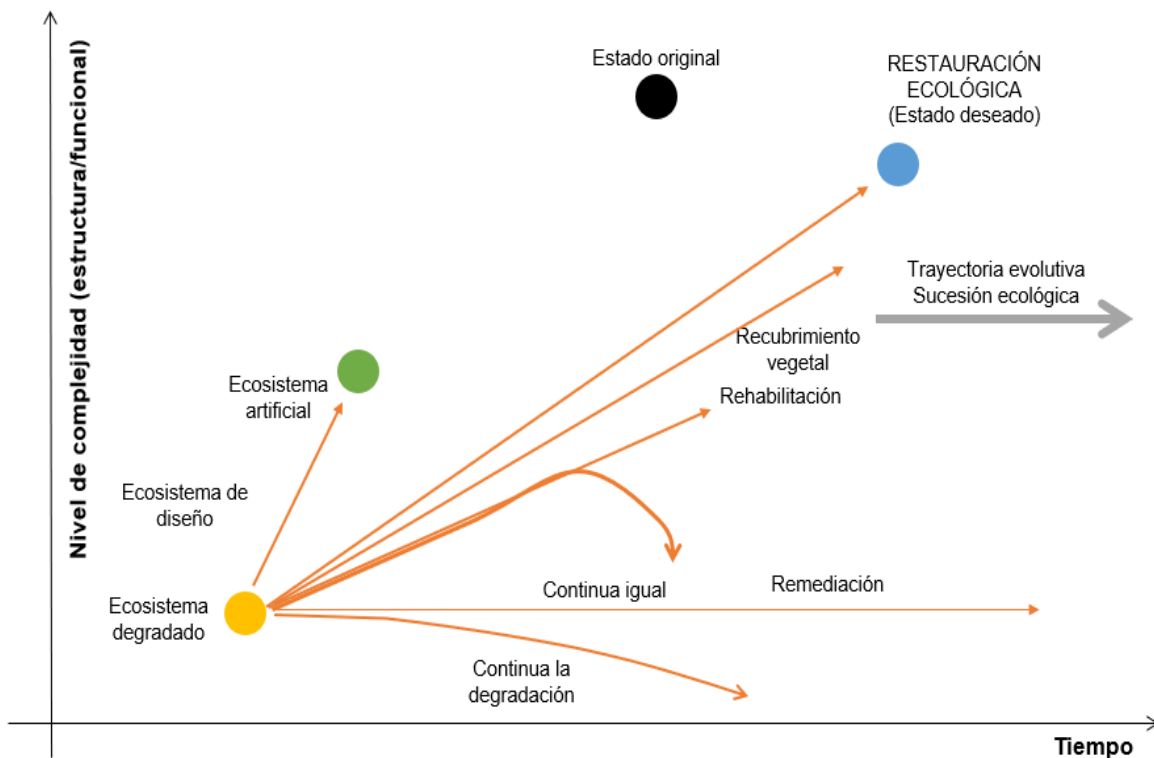


Figura 3.1. Trayectorias para la recuperación de un humedal degradado durante el proceso de restauración. Imagen tomada de Montes et al. (2007) y modificada de (Bradshaw y Chadwick, 1980).

3.2 Trayectoria y alcances de la restauración ecológica

La trayectoria histórica se establece a través del conocimiento sobre la estructura, composición y funcionamiento de un ecosistema, los cuales han sido realizados sobre información ecológica, cultural e histórica, cuya combinación permite tener un ecosistema de referencia (ver más abajo) con el cual se pueda guiar al ecosistema (Society for Ecological Restoration International, 2004). Además, esto permite incorporar diversas estrategias y manejar los ecosistemas de una manera adecuada y garantizar el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y la conservación de la biodiversidad (Lindig-Cisneros y Zambrano, 2007).

Los alcances de la restauración ecológica dependen de diversos factores, los principales son el nivel de perturbación en el sitio y alrededor. El estado de conservación de los alrededores resulta primordial para la restauración, por ejemplo, en los lagos, lagunas, manglares, ubicados en las partes bajas de la cuenca, reciben muchos impactos ambientales que provienen de la degradación de las cuencas e influyen en el periodo de restauración o en la conservación, contrariamente, cuando el sitio a restaurar se encuentra cerca a un costado de un área conservada o protegida resulta favorecida (Lindig-Cisneros y Zambrano, 2007).

La estructura y función de un ecosistema es importante para determinar cómo se puede recuperar y lograr los alcances de la restauración a través de su trayectoria; en la mayor parte de casos se requiere de grandes esfuerzo y largos periodos de tiempo, el trabajo debe ser permanente para llegar al estado deseado (Lindig-Cisneros y Zambrano, 2007; Roberto *et al.*, 2003).

La restauración se hace más difícil de acuerdo con su nivel de degradación, disminuyendo las posibilidades de recuperar la función y estructura, por ello es el factor más importante para determinar la estrategia y las medidas prioritarias, (Sánchez, 2005). Se reconoce que algunos proyectos pueden presentar condiciones de degradación particulares provenientes de las actividades humanas, como la introducción de especies exóticas o invasoras, que en algunos casos pueden ser irreversibles (Lindig-Cisneros y Zambrano, 2007; Zedler, 2000). Un ejemplo de ello es la creación de humedales en sitios donde han sido alterado el régimen hidrológico y que sean dominados por tulares (*Typha* spp.) con el objetivo de retener nutrientes disueltos en el agua y restaurar estas comunidades (Sánchez, 2005; Yin y Lan, 1995).

Dentro de los procesos de degradación se reconocen diferentes aspectos, la pérdida de calidad y de extensión, los cuales permiten determinar el potencial para poder recuperar el área (Figura 3.2). Además, al aumentar el nivel de degradación de un área, los procesos de restauración resultan más complejos y más difíciles de realizar, reduciendo la viabilidad económica y ecológica. La transición entre las etapas de restauración depende de las condiciones dadas por los factores bióticos y abióticos, entre ellos destaca la variación del clima (precipitación y temperatura), ya que al modificar cualquier de los factores puede restablecer la estructura o función (Lindig-Cisneros y Zambrano, 2007).

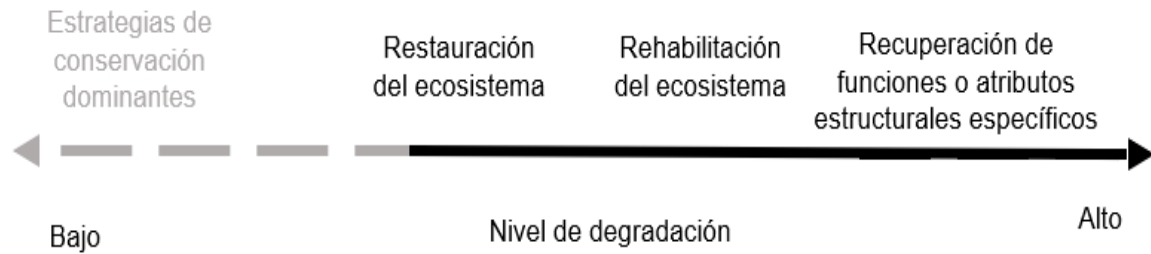


Figura 3.2. Imagen tomada de Lindig-Cisneros y Zambrano (2007). Relación entre el nivel de degradación y las metas alcanzables de un proyecto de restauración; con un mayor nivel de degradación, la posibilidad de recuperar las funciones o complejidad estructural se reducen, así al perder particularidades del sitio durante la degradación irreversible es importante replantear objetivos compatibles y alcanzables.

3.3 Ecosistema de referencia

Son puntos clave en la restauración, sirven para guiar y planificar el proceso de restauración ecológica. Además, sirven para la evaluación de los resultados del proyecto. Un ecosistema de referencia se reconoce como un sitio existente, lo más semejante al sistema original y cercano al área en restauración, idealmente debe compartir condiciones ambientales semejantes (Castillo, 2005; Society for Ecological Restoration (SER) International, 2004).

La selección de la o referencia debe reflejar la combinación de acontecimientos aleatorios que ocurrieron durante el desarrollo del ecosistema, esto otorga a la restauración una variedad de posibles estados, los cuales son importantes de considerar para la trayectoria de restauración (Society for Ecological Restoration International, 2004).

Algunos puntos claves a considerar para el ecosistema de referencia son: la lista de acontecimientos periódicos normales y anormales que mantienen la integridad de los ecosistemas; los sucesos culturales, tales como prácticas o usos y costumbres

de las poblaciones involucradas también son importantes, estas tienen un papel importante en el éxito de la restauración y manejo de los ecosistemas (Society for Ecological Restoration International, 2004).

3.4 Técnicas y metodologías para la restauración de los humedales costeros

Se han establecido diferentes técnicas y metodologías para la restauración de humedales costeros, donde los mecanismos de ajuste entre la hidrología, la vegetación y el hábitat deben de conocerse antes de seleccionar la técnica adecuada (Zhao *et al.*, 2016). La restauración ecológica puede ser relativamente rápida hasta lenta y sin ningún resultado, lo anterior depende de la estrategia de restauración elegida y utilizada, las cuales puede ser categorizadas en: pasiva, activa y creación (Chazdon, 2008; Pellerin y Lavoie, 2003; Suding, 2011; Zhao *et al.*, 2016).

3.4.1 Restauración activa, pasiva y creación

La restauración activa tiene como objetivo reducir, detener o remover la causa de perturbación, pero con la necesidad de intervención humana, es decir con el control y mediación del área con el objetivo de mejorar, re-crear o restaurar la estructura y función de los procesos o comunidades de los ecosistemas involucrados (Allen, Brown y Allen, 2001; Suding, 2011; Zhao *et al.*, 2016).

Al igual que la restauración activa, la pasiva tiene como objetivo la eliminación de las causas de la degradación para dirigir su trayectoria a un estado saludable, pero bajo condiciones naturales (Wagner *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2016). Este tipo de restauración se enfoca en la mejora y recuperación de los procesos hidrológicos y

ecológicos para generar una auto–restauración (Hunter, Faulkner y Gibson, 2008; Jarzemsky, Burchell y Evans, 2013; Mitsch y Wang, 2000; Zhao *et al.*, 2016).

La creación de humedales, al igual que la restauración pasiva y activa, se realiza para minimizar el impacto por la pérdida de humedales, principalmente marismas (Zhao *et al.*, 2016). Es un proceso de transformar áreas (tierras altas o hábitat submareal) en sitios donde antes no existían este tipo de humedales y requieren de condiciones apropiadas, particularmente hidrológicas (Mitsch y Gosselink, 2015a; Simenstad, Reed y Ford, 2006; Zhao *et al.*, 2016).

La elección de la técnica de restauración o creación deberá de considerar algunos factores ambientales e indicadores claves para analizar el potencial de restauración (Zhao *et al.*, 2016). El éxito de los sitios restaurados por el tipo de restauración elegida depende de diversos factores sociales y ambientales, asociados a la escalera de restauración: biodiversidad y servicios ecosistémicos, tiempo; particularmente el éxito de la restauración pasiva depende de la historia de uso, como el periodo de abandono, tipo y uso del suelo, disponibilidad de recursos bióticos, entre otros (Figura 3.3; Chazdon 2008).

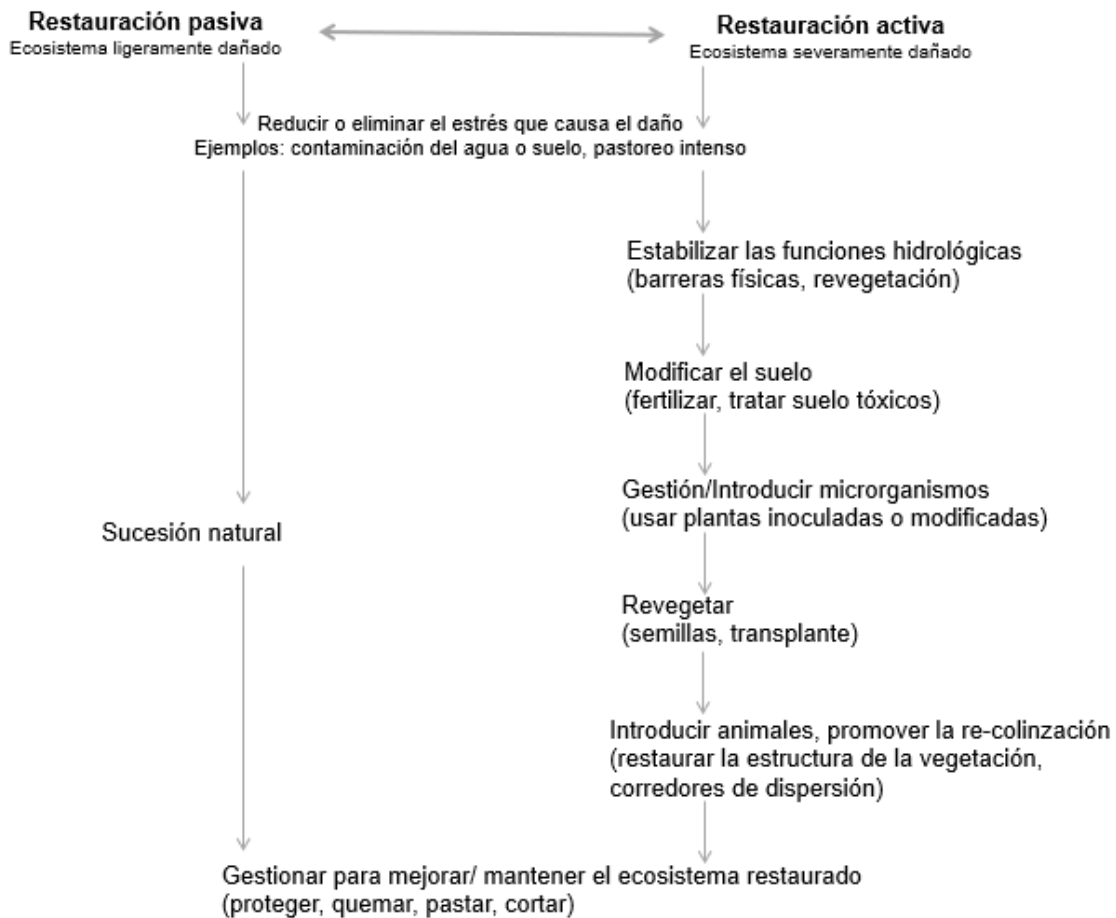


Figura 3.3. Comparación entre la restauración activa y pasiva, imagen tomada de Allen et al. (2001)

3.4.2 La topografía, hidroperiodo y salinidad en la restauración de humedales costeros

Como se mencionó anteriormente, los gradientes microtopográficos, que definen los mosaicos de vegetación están fuertemente influenciados por el hidroperiodo y la salinidad, los cuales condicionan la distribución del tipo de humedal costero, la diversidad de especies y su grado de desarrollo (Flores-Verdugo *et al.*, 2007; Mitsch y Gosselink, 2015c).

El hidroperiodo es el resultado de la frecuencia y periodos de inundación de áreas específicas, donde se conocen las condiciones de oxidación/reducción y la

frecuencias y duración de los periodos de inundación están condicionados a las mareas, ríos, escurrimientos del área, sitios de inundación y fluctuaciones del nivel freáticos (Flores-Verdugo *et al.*, 2007; Mitsch y Gosselink, 2015c).

Las condiciones establecidas por el hidroperiodo son importantes porque mantienen la estructura y funcionamiento del ecosistema, al crear condiciones físico-químico-biológicas únicas relacionadas con algunos factores ambientales (disponibilidad de nutrientes, acumulación de materia orgánica, riqueza y composición de la biodiversidad), a su vez, están relacionadas con el componente biótico que determina la composición química del suelo e hidrología y contrariamente puede inducir la presencia de especies invasivas (Flores-Verdugo *et al.*, 2007; Middleton, 1999; Mitsch y Gosselink, 2015c)

La hidrografía de los humedales costeros presenta vías hidrológicas como la precipitación, escorrentía superficial, agua subterránea, mareas, entre otras. Los patrones de flujo, duración y frecuencia de inundación, así como la profundidad del agua se forman influyen en la bioquímica del suelo (Flores-Verdugo *et al.*, 2007; Mitsch y Gosselink, 2015b).

La salinidad es otro factor que debe tomarse, ya que ayuda determinar y explicar la distribución de la vegetación de acuerdo a su tolerancia a este factor, el cuales depende de la cuña de salinidad, niveles de infiltración de agua dulce y continental así como de la evaporación (Flores-Verdugo *et al.*, 2007).

La selección de las condiciones hidrológicas correctas darán buenos resultados en la trayectoria (funcionamiento biológico y químico) del humedal costero, sin

embargo éstas dependen del clima, los patrones estacionales de aporte y salida de agua hacia y desde el humedal, la marea así como de las fluctuaciones intermitentes del manto freático, es decir del hidropereodo, microtopografía y salinidad (Flores-Verdugo *et al.*, 2007; Mitsch y Gosselink, 2015b).

3.4.3 La sucesión en la restauración de los humedales costeros

La vegetación de humedales costeros ha evolucionado durante siglos para adaptarse a la alta salinidad, periodos de inundación y suelos con bajo nivel de oxígeno. Algunas plantas almacenan la sal en las hojas liberándola posteriormente por medio de las glándulas de sal, otras plantas de humedales costeros presentan adaptaciones fotosintéticas, esto les otorga una mayor tasa de producción de carbono y sitúa a los humedales costeros como hábitats extremadamente productivos donde se almacenan grandes cantidades de carbono en áreas pequeñas (Scott, Frail-Gauthier y Mudie, 2014b)

Las plantas en los humedales costeros han desarrollado adaptaciones que le confieren la capacidad de tolerar condiciones de estrés o especiales, como bajas concentraciones de oxígeno, diferentes periodos de inundación, estrés por las altas concentraciones de salinidad, entre otros. Los humedales costeros se encuentran estrechamente relacionados por medio del flujo superficial del agua y mantos freáticos, además muchos de ellos son considerados comunidades transicionales entre los sistemas terrestres y acuáticos (Lindig-Cisneros y Zedler, 2005).

Las plantas del Tule (*Typha* spp.) son especies de humedales que emergen entre la superficie de agua y dominan en muchos de ellos, tienen la capacidad para tolerar las bajas concentraciones de oxígeno, otras plantas con la misma capacidad son

los manglares, ambas presentan el intercambio gaseoso, la primera de ellas lo hace mayormente con la parte aérea y la segunda utiliza las raíces (Lindig-Cisneros y Zedler, 2005).

Los estudios de cambio en la composición y abundancia de la vegetación durante el tiempo han sugerido mecanismos y sistemas de sucesión (Vega Peña, 2005). La sucesión básicamente se refiere al proceso donde la composición de las comunidades cambia durante un periodo de tiempo, se enfoca en los cambios en la vegetación, el papel de la fauna, hongos, bacterias, así como otros organismos de importancia a través de varias etapas hasta el estado clímax, último estado estable (Cain, Bowman y Hacker, 2014).

La sucesión ecológica después de haber sufrido un cambio, también es definida como “el patrón direccional no continuo y continuo de colonización y extinción en un sitio por poblaciones de especies” (Begon, Townsend y Harper, 2006b; Clements, 1916). Dos tipos de sucesión se reconocen en las primeras etapas: 1. La sucesión primaria comprende la colonización de hábitats que están desprovistos de vida, resultado de una catástrofe o de creación reciente (ej. islas); la sucesión secundaria está involucrada en el restablecimiento de una comunidad donde una parte de sus componentes han sido destruidos, es decir la comunidad aún se encuentra presente y se puede recuperar a partir de ellos (Figura 3.4; Begon, Townsend y Harper, 2006b; Cain, Bowman y Hacker, 2014)

En los humedales costeros dos factores controlan la sucesión de vegetación, que son los mismos de mayor importancia en la restauración, la salinidad y los periodos de inundación. La salinidad determina la distribución de la vegetación, los cambios

de salinidad del suelo inflieren en los estados de sucesión, este factor es influenciado por la salinidad del agua de marea, la frecuencia de inundación, la dilución de la lluvia y la evapotranspiración (Teal, 2016).

Las actividades humanas también afectan los estado de sucesión autógena en los humedales costeros, por ejemplo la contaminación con nitrógeno cambia las relaciones competitivas de la vegetación; el desarrollo costero, particularmente si presenta la eliminación de vegetación leñosa, incrementa la escorrentía y aportes de nitrógeno; la reducción de salinidad permite la instalación de otras especies de humedal; finalmente la introducción intencional de otras especies, el cambio climático con la alteración del nivel del mar y modificaciones en la temperatura media del agua y del aire (Teal, 2016).

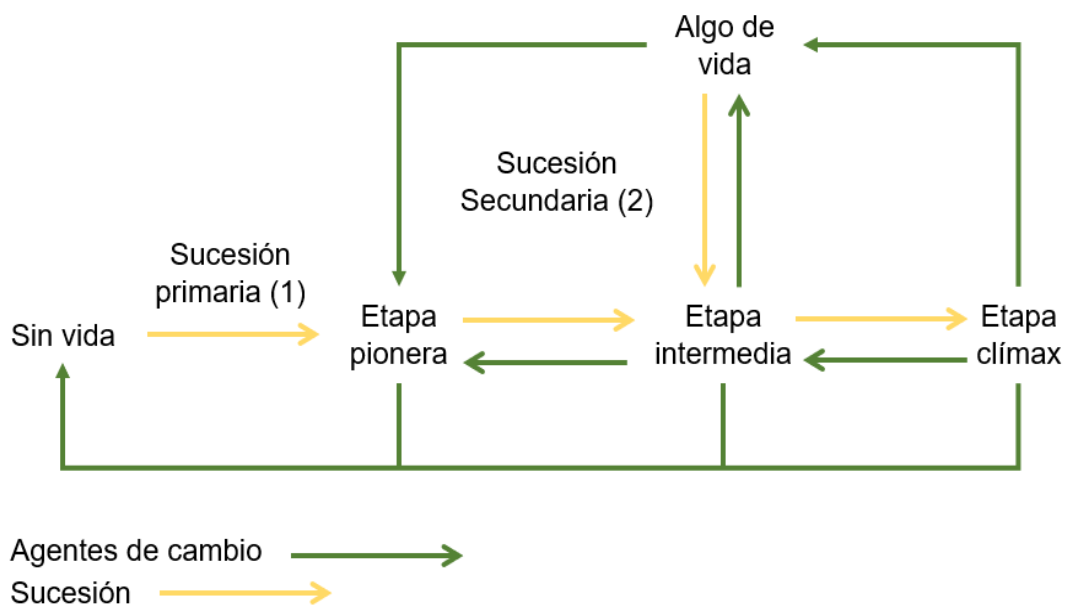


Figura 3.4. Trayectoria de la sucesión, tomado de Cain et al. (2014). La sucesión primaria y secundaria se encuentra en diferentes etapas. 1. Si se presenta un disturbio y no deja vida, sucesión primaria. 2. Cuando una comunidad es afectada severamente por un disturbio, pero no se destruye completamente. En la trayectoria de sucesión ecológica puede ocurrir un disturbio y regresar a alguna etapa previa

3.5 El papel del monitoreo en la restauración de humedales costeros

El papel del monitoreo evalúa algún cambio respecto al tiempo, considerando un estado de referencia, donde incluya: los atributos (diversidad biológica, sociocultural), los cambios naturales respecto al tiempo (físicos, químicos o biológicos), las interacciones entre la estructura y procesos del ecosistema (retención de nutrientes, contaminantes, sedimentos, protección contra tormentas), percepción y producción social (bienestar humano, calidad de vida, recursos agrícolas, abastecimiento de agua; Abarca 2007; Ramsar 2010b)

La SER (Society for Ecological Restoration) menciona que existen tres estrategias para los monitoreos que permiten una evaluación: la comparación directa, identifica y determina parámetros de referencia para compararlos con el sitio monitoreado; el análisis de atributos compara datos cuantitativos y semicuantitativos de un monitoreo establecido con el de referencia, con el objetivo de saber cuánto se ha recuperado y el análisis de la trayectoria evalúa las tendencias del sitio restaurado mediante gráficas de datos recolectados periódicamente con el objetivo de confirmar la trayectoria deseada (Society for Ecological Restoration (SER) International 2004).

Es importante señalar que el monitoreo en humedales debe de realizarse con un equipo interdisciplinario y contener elementos esenciales: 1. Definición de metas y objetivos claros; 2. Planteamiento de preguntas clave, hipótesis y escala; 3. Diseño apropiado del monitoreo; 4. Definir los parámetros a medir; 5. Número de sitios y duración del monitoreo; 6. Planteamiento de los protocolos de monitoreo para la colecta de parámetros fisicoquímicos y biológicos; 7. Implementación del programa

de monitoreo; 8. Análisis de resultados (Elaboración de bases de datos); 9. Evaluación; 10. Elaboración del reporte con resultados y 11. Comunicación de los mismos (Abarca, 2007).

Ramsar presenta un manual para realizar inventarios, evaluaciones y monitoreos con el objetivo de ayudar a la conservación y uso racional de los humedales, en el presenta la diferencia entre tres tipos de procedimientos: evaluación rápida, inventario, evaluación y monitoreo, este último lo define como: “reunión de información específica a largo plazo, atendiendo a hipótesis derivadas de actividades de evaluación, y aplicación de estos resultados de monitoreo a las actividades de gestión” sin embargo, los proyectos de restauración en humedales suelen contemplar todos esos procedimientos en uno (Abarca, 2007; Ramsar, 2010a).

Las sinergias que provocan diversos factores naturales, artificiales, autóctonos o alóctonos, causan que los programas de monitoreo sean más costosos y que sean más estrictos en sus diversas etapas (planeación, ejecución, análisis, comunicación). Por ello, los monitoreos deberán tener un enfoque que mida la integridad ecológica de los humedales (Abarca, 2007). El concepto de integridad biótica surge como respuesta a los intentos de integrar elementos estructurales y funcionales de los ecosistemas, principalmente acuáticos, con el objetivo de conocer el estado aproximado de sus procesos ecológicos y evolutivos (Karr, 1981). Posteriormente dicho concepto extrapola al concepto de integridad ecológica, que pretendía integrar otros elementos y generalizarlo. Los índices desarrollados para medir la integridad (biótica o ecológica) permiten reconocer de una manera natural

la variación de las comunidades, donde la medición puede ser de costo eficiente, válida científicamente, ofrece resultados rápidos, tiene enfoque regional, entre otros. Por lo anterior algunos organismos utilizados son macroinvertebrados acuáticos, peces, vegetación, aves (Pérez Munguía, Pineda López y Medina Nava, 2007).

3.5.1 Estudio de caso sobre los monitoreos biológico-ecológicos: **los peces como indicadores de éxito en la restauración de humedales costeros**

Los indicadores de éxito en la restauración ecológica se han focalizado en la respuesta de la cobertura vegetal o hidrología, y en pocas ocasiones se han considerado indicadores del funcionamiento (Badillo-Alemán *et al.*, 2016). La fauna es considerada un indicador del funcionamiento de la recuperación de hábitat, ya que sirve para medir el éxito en la trayectoria de restauración ambiental, principalmente en manglares (Badillo-Alemán *et al.*, 2016; Macintosh, Ashton y Havanon, 2002).

Los peces (ictiofauna) son organismos sensibles a los cambios de una amplia gama de factores ambientales, por lo que son considerados como comunidades biológicas que reflejan las condiciones ambientales (Karr, 1981). Tienen diversas ventajas como indicadores: presentan una historia de vida extensa, un rango de especies situadas en diferentes niveles tróficos, son fáciles de identificar, con ellos se puede evaluar los efectos de la toxicidad y estrés, entre otros (Karr, 1981). Por lo anterior son indicadores potenciales y útiles, ya que un conjunto de peces en particular puede integrar la variabilidad ambiental a diferentes escalas espaciales (Fierro, 2009; Oberdorff *et al.*, 2002).

En la restauración de humedales costeros y continentales la ictiofauna ha sido uno de los indicadores ambientales más utilizados, principalmente mediante el uso de índices de integridad biótica (IIB), en los cuales es importante analizar elementos de composición, estructura y función, particularmente la presencia de atributos de una comunidad y aspectos autoecológicos de las especies elegidas (Schmitter-Soto, 2014).

En la Península de Yucatán, cerca de uno de los puertos más importantes de su parte norte, se realizó la valoración de la restauración de diferentes áreas de manglar con diferentes periodos de actividades (Badillo-Alemán *et al.*, 2016). En el estudio, Badillo y colaboradores evaluaron la composición, abundancia y diversidad de la ictiofauna en diferentes áreas de manglar restauradas, así como algunas variables fisicoquímicas (materia orgánica, salinidad, temperatura y oxígeno disuelto). Encontraron en diferentes tiempos de la restauración ecológica una recuperación de la complejidad del ensamble de peces, además de las funciones ecológicas.

Actualmente las áreas restauradas funcionan como sitios de alimentación y crianza de ciertos grupos de peces, lo que indica que las actividades de restauración cumplen con su trayectoria de recuperación de funciones ecológicas y de servicios ambientales. En algunos sitios restaurados encontraron peces juveniles que tienen comportamiento migratorio (del manglar al mar). Dos especies de las más abundantes (con reproducción vivípara) de la familia Poeciliidae (*Gambusia yucatanana* y *Poecilia velífera*) se registraron y relacionaron como un recurso alimenticio para otros peces (Badillo-Alemán *et al.*, 2016)

El registro de otra especie de pez (*Fundulus persimilis*) es un indicador del éxito de la restauración, ya que es una especie de servicio de provisión y de sostén, así como especies de la familia Mugilidae (lisas y parientes) que se alimentan del fango y materia orgánica. Por otra parte, la presencia de un depredador tope (*Belonesox belizanus*) revela que existen interacciones tróficas a diferentes niveles. Con todo lo anterior, se puede concluir que los peces como indicadores de recuperación de manglar aportan una gran cantidad de información, en especial cuando se realiza el monitoreo en diferentes periodos, así como cuando se conoce el estado de perturbación y como cambia la estructura, ya que con el tiempo existe una tendencia a que la comunidad sea más diversa y a que los manglares recuperen su función como sitios de alimentación y crianza de peces juveniles así como de otros gremios tróficos (Badillo-Alemán *et al.*, 2016; Schmitter-Soto, 2014).

3.6 Estudios de caso de restauraciones exitosas de humedales costeros

A continuación, se presentan cuatro ejemplos de acciones de restauración en diferentes humedales costeros, las cuales tuvieron respuestas favorables y sirven para futuros proyectos.

3.6.1 Estudio de caso: **restauración de una marisma en el estuario del río Tijuana**

El estuario del río Tijuana se localizan en México (tres cuartas partes) y el resto en los Estados Unidos. Restaurar el estuario del río Tijuana ha sido una prioridad porque alberga un gran número de especies de flora y fauna, algunas raras o amenazadas. Debido a la división política este humedal presenta un ambiente complejo y una difícil gestión, principalmente social, además el aumento de la

densidad poblacional ha causado diversas afectaciones como el aporte de aguas negras, contaminantes derivados de las actividades agrícolas y sedimentación en aumento (Lindig-Cisneros y Zedler, 2005).

A partir de 1986 el *Pacific Estuarine Research Laboratory* comenzó con actividades de monitoreo, en las cuales evaluó la creciente de sedimentación, aporte de agua negras, tormentas e incremento del nivel del mar. Posteriormente elaboró un plan de restauración con una serie de etapas que conforme avanzaron, la superficie restaurada incrementó (Lindig-Cisneros y Zedler, 2005).

Probaron diferentes metodologías para la recuperación de la marisma, dos de las principales fueron la construcción de un canal que conectó la laguna de oxidación de aguas negras con el sistema natural de canales intermareales y la investigación sobre el número de especies necesarias para el restablecimiento de la vegetación en la planicie intermareal). Los administrados determinaron que es más eficiente diseñar una metodología adaptable, con pruebas *in situ* antes de la restauración, ya que la marisma de California es muy compleja, principalmente porque como se mencionó antes, se encuentra entre dos países y necesita de una colaboración binacional, se espera que dicho estuario continúe su trayectoria de restauración, la cual puede ser seguida debido a la gran cantidad de información acumulada (Lindig-Cisneros y Zedler, 2005).

3.6.2 Estudio de caso: **la restauración del manglar en la Laguna de Términos, México**

En Campeche, México, se encuentra la laguna de Términos, alberga un ecosistema de manglar que sufre de factores estresantes (biológicos, químicos y físicos) que

causan la muerte y pérdida de considerables superficies de manglar. La principal causa de mortalidad en manglar son los eventos hidrometeorológicos extremos, tales como tormentas tropicales o ciclones, los cuales aportan grandes cantidades de sedimentos en poco tiempo. Esto hizo necesario un programa de restauración de manglar, el cual se basó en la rehabilitación hidrológica (apertura de un canal y canales secundarios) y posteriormente en la reforestación con plántulas de mangle negro (*Avicennia germinans*; Agraz y Arriaga, 2010)

El área de trabajo fue de 104.5 ha, pero solo se restauraron 24.5 ha y se eligió como sistema de referencia un bosque de manglar conservado, en él se midió la estructura forestal, microrelieve y parámetros fisicoquímicos. Se tuvo un éxito de supervivencia de plántulas del 90% y el éxito del programa de restauración se debe a la identificación de los factores estresantes que inhibían el crecimiento del manglar, el restablecimiento de las condiciones hidrológicas y la elección de especies de manglar idóneas, provenientes de vivero (Agraz y Arriaga, 2010; Agraz Hernández *et al.*, 2010; Villalobos Zapata *et al.*, 1999).

3.6.3 Estudio de caso: **Prueba de reforestación de mangle en una ciénaga costera semiárida de Yucatán, México**

La pérdida de vegetación de manglar en los humedales costeros del noroeste de Yucatán, en México, ha sido ocasionada por el cambio del régimen hidrológico y la hipersalinización causados por impactos ambientales naturales y antropogénicos (construcción de caminos, puertos, crecimiento poblacional, intrusión de agua marina mediante la apertura de dunas costeras, sedimentación de manantiales y huracanes, especialmente el huracán Gilberto en 1988). La importancia de estos manglares es que se desarrollan en suelos cársticos, con ausencia de ríos

superficiales, se forman y mantienen generalmente por la dinámica de las corrientes marinas que forman dunas o islas de barrera y por los sistemas lagunares, que aportan agua dulce subterránea (Febles-Patrón, López Novelo y Batllori Sampedro, 2009).

Desde 2003 se inició el programa de restauración ambiental y fortalecimiento regional en la microcuenca costera para implementar por medio de hombres y mujeres locales el desazolve de manantiales, construcción de un vivero de mangle y pruebas de reforestación en la ciénaga; con ello se evaluó la supervivencia y el crecimiento de las plántulas de mangle rojo (*Rhizophora mangle*) y mangle negro (*Avicennia germinans*) en diferentes condiciones que registra la ciénega. El área restaurada fue un sistema de humedales costeros (5.65 ha) utilizadas por el régimen de marea y la vegetación de manglar (Febles-Patrón, López Novelo y Batllori Sampedro, 2009).

El éxito de la restauración, especialmente para ciénagas costeras semiáridas, se basó en identificar el origen de las afectaciones, particularmente en este estudio se identificó la construcción de puentes y carreteras como fuente de afectación de los propágulos de manglar, por lo que el desazolve permitió cambiar la salinidad y el nivel de inundación, que determinan el crecimiento y la supervivencia de las plantas. Por lo que de éste estudio se concluye que para la restauración de ciénagas costeras semiáridas es necesario contar con un monitoreo de los parámetros hidrológicos y de suelo (inundación y salinidad), ya que permite seleccionar eficientemente las especies de manglar que produzcan un mayor éxito en la restauración (Febles-Patrón, López Novelo y Batllori Sampedro, 2009).

3.6.4 Estudio de caso: **experiencia de la restauración de la marisma salina en la Bahía de San Francisco, California, Estados Unidos**

La Bahía de San Francisco es un tipo de marisma salina localizada entre la zona intermareal de la línea de costa de California. Durante 25 años en el área se presentaron grandes esfuerzos para la restauración de las funciones ecológicas (la producción primaria, los ciclos de nutrientes, hábitat y refugio para vida silvestre principalmente de peces y aves) y se realizaron actividades de restauración en 730 ha, sin embargo, los ejecutores de los primeros proyectos de restauración no lograron entender el funcionamiento ecológico del área de forma integral, hasta que al final con la participación de múltiples gestores, se comprendió más detalladamente su funcionamiento (Broome, Seneca y Woodhouse, 1988; Williams y Faber, 2001).

La restauración de estos sitios se ha realizado mediante la revegetación, que intenta estabilizar la línea de costa y mitigar los efectos negativos de la sedimentación (Broome, Seneca y Woodhouse, 1988; Williams y Faber, 2001). Los resultados son interesantes e importantes, puesto que otorgaron una serie de lecciones aprendidas en un periodo de tiempo que permitió replicarse en otros sitios, sin embargo se considera que el éxito depende de una investigación científica continua y del planteamiento de objetivos biológicos claros, alcanzables y medibles, finalmente es prioritario considerar a este tipo de ecosistemas como sistemas evolutivos con funciones cambiantes (Broome, Seneca y Woodhouse, 1988; Williams y Faber, 2001).

Conclusión

La presente revisión documental analizó en primer lugar el sistema de clasificación de los humedales costeros por tres agencias internacionales (USFWS, CCS, RAMSAR), las cuales coinciden en clasificar a los humedales por dos importantes componentes: el agua y el suelo. Estas agencias realizan acciones de conservación, monitoreo y gestión de los humedales de acuerdo a su posición geográfica, paisaje, así como tipo de vegetación. El sistema de Ramsar resultó ser el más completo, porque incluye más elementos (la vegetación, áreas de transición y especies vulnerables o en riesgo).

Debido a lo anterior y a las funciones ecológicas propias de los humedales, derivadas de sus características hidrológicas, biológicas y químicas, cuatro tipos de humedales costeros fueron contemplados en esta revisión: los humedales ribereños, las marismas de agua dulce, las marismas salinas y los manglares.

Además, se examinó el valor e importancia de los humedales a través del tiempo, el cual tuvo un gran cambio, ya que anteriormente se desconocían o desvaloraban. Posteriormente, la gestión de los humedales y sus recursos naturales integraron los análisis exhaustivos sociales, económicos y ecológicos, mejorando la valoración y su conocimiento.

En una segunda parte se presenta una revisión sobre la conservación de los humedales costeros a través de la cooperación internacional, principalmente mediante la convención Ramsar. Como resultado de este análisis se entiende que la conservación de los humedales costeros es una prioridad. Debido a que muchas comunidades e incluso naciones comparten sus recursos naturales (gran cantidad

de humedales se encuentran entre dos naciones) por lo que pueden compartir experiencias en su gestión.

El análisis de información muestra que existen grandes amenazas sobre los humedales costeros, ya que las actividades humanas no sustentables, no tradicionales, son las que ocasionan mayores alteraciones (ganadería, cultivo, turismo, urbanización, contaminación, introducción de especies exóticas) y constituyen la mayor amenaza. Lo anterior ocasiona la pérdida de humedales costeros con impactos que pueden ser severos, acumulativos y sinérgicos. Además, los efectos del cambio climático tienen consecuencias sobre elementos de los humedales costeros (hidrología y vegetación). Si bien se encontró que ante cualquier situación de cambio natural los humedales tienen resistencia y resiliencia hidrológica, existe un límite tolerable, asimismo el efecto de la sinergia de los factores que afectan aún no es predecible.

La pérdida de los humedales costeros y sus amenazas afectan los servicios ambientales, por ello, la gestión, conservación y visualización generan un vínculo entre el grado de conservación y la calidad de los servicios ambientales. Esto dos anteriores se relacionan con el potencial económico y el bienestar humano, logrando una adecuada y amplia valoración.

La restauración de los humedales y en general de los ecosistemas costeros será una estrategia fundamental para su gestión, conservación, así como para el mantenimiento de sus funciones y servicios ambientales. La participación humana, así como el aporte científico serán prioritarios para la identificación anticipada del

origen de los daños ambientales, el restablecimiento de los ecosistemas degradados, dañados o destruidos.

La restauración dependerá del tiempo y de las características del sitio, además, es recomendable incluir en el programa datos de un ecosistema de referencia (información ecológica, cultural e histórica), así como considerar las afectaciones actuales (nivel de degradación). Finalmente, en todos los programas de restauración se deberá de integrar un equipo interdisciplinario que elabore un monitoreo que incluya, evalúe y compare los elementos y funciones más importantes de los sitios restaurados, preferentemente en períodos largos. Se considera y recomienda que los indicadores de éxito ayudarán a conocer y determinar la trayectoria de restauración, como lo fue con la ictiofauna en el estudio de Badillo-Alemán y colaboradores (2016) de la Península de Yucatán donde los resultados mostraron una pronta recuperación de las funciones ecológicas del humedal restaurado a pesar de que aún no se recuperara por completo la vegetación, siendo un ejemplo de que los componentes biológicos se pueden utilizar como indicadores de éxito.

Las técnicas de restauración en humedales costeros se centran en los componentes agua, salinidad, biota y suelo, como la restauración de manglar en la Laguna de Términos, México que se basó principalmente en la rehabilitación hidrológica y la reforestación con manglar, en el cual se contemplaron factores químicos durante la apertura de canales.

Un factor clave a considerar en los proyectos de restauración es la capacidad de la vegetación para tolerar condiciones de estrés, lo que condiciona en parte el éxito de

restauración, pero cuando se logra comprender el funcionamiento de este factor y su interacción con los otros componentes, es más fácil llevar a cabo acciones que favorezcan el proceso de sucesión (por ejemplo, restablecimiento de las conexiones hidrológicas) y rehabilitación de sus funciones, como en los estudios del estuario del río Tijuana y la ciénaga costera de Yucatán, presentados en esta revisión documental.

Finalmente, dichos estudios de casos nos demuestran que no existe un solo camino para lograr una restauración exitosa, sin embargo, el estudio de sus componentes, funciones e identificación del origen de sus afectaciones son elementos imprescindibles en todos ellos.

Bibliografía

Abarca, F. J., 2007. "Técnicas y metodologías para la evaluación y monitoreo del estado de los humedales y ecosistemas acuáticos", en Sánchez, Ó. et al. (eds.) *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. Primera ed. DF, México: Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), pp. 113–144.

Agraz, C. M. y Arriaga, V., 2010. "Restauración del manglar en la Laguna de Términos", en Carabias, J. et al. (eds.) *Patrimonio natural de México. Cien casos de éxito*. DF, México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, pp. 150–153.

Agraz Hernández, C. et al., 2010. "Estrategias de restauración de Ecosistemas de manglar en México.", *JAINA, Boletín informativo*, 21(2), pp. 5–27.

Allen, E. B., Brown, J. S. y Allen, M. F., 2001. "Restoration of animal, plant, and microbial diversity", *Encyclopedia of Biodiversity*, 5, pp. 185–202.

Alongi, D. M., 2008. "Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(1), pp. 1–13.

Amador-del Ángel, L. E. y Wakida-Kusunoki, A. T., 2014. "Peces invasores en el Sureste de México", en Mendoza Alfaro, R. E. y Koleff Osorio, P. (eds.) *Especies acuáticas invasoras en México*. Primera ed. DF, México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, pp. 425–433.

Assessment Millennium Ecosystem, 2005. *Ecosystems and Human well-being: Wetlands and Water Synthesis*. Washington, Estados Unidos: World Resources Institute.

Badillo-Alemán, M. et al., 2016. "Los peces como indicador de restauración de áreas de manglar en la costa norte de Yucatán", *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(2), pp. 489–496.

Barros, D. y Albernaz, A., 2015. "Possible impacts of climate change on wetlands and its biota in the Brazilian Amazon", *Brazilian Journal of Biology*, 74(4), pp. 810–820.

Begon, M., Townsend, C. R. y Harper, J. L. (eds.), 2006a. *Ecology: from individuals to Ecosystems*. Cuarta ed. Malden, Estados Unidos.

Begon, M., Townsend, C. R. y Harper, J. L., 2006b. "The Nature of the Community: Patterns in Space and Time", en Blackwell Publishing (ed.) *Ecology: from individuals to ecosystems*. Cuarta ed. Malden, Estados Unidos, p. 725.

Berlanga-Robles, C. A., Ruiz-Luna, A. y de la Lanza Espino, G., 2008. "Esquema de clasificación de los humedales de México", *Investigaciones Geograficas*, 66, pp. 25–46.

Blum, M. J. et al., 2014. "Remediation and restoration of northern Gulf of Mexico coastal ecosystems following the Deepwater Horizon event", en Ponisseril, S. et al. (eds.) *Oil Spill Remediation: Colloid Chemistry-Based Principles and Solutions*. Primera ed. Nueva Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., pp. 59–88.

- Bradshaw, A. D. y Chadwick, M. J., 1980. *The restoration of land: the ecology and reclamation of derelict and degraded land*. Editado por Univ of California Press. Berkeley, California: Blackwell Scientific Publications.
- Brink, P. ten *et al.*, 2013. *The Economics of Ecosystem and Biodiversity for Water and Wetlands*, *Institute for European Environmental Policy, IEEP*. Gland, Suiza: Secretaria Ramsar.
- Brinson, M. M., Lugo, A. E. y Brown, S., 1981. "Primary productivity, decomposition and consumer activity in freshwater wetlands", *Annual Review of Ecology & Systematics*, 12, pp. 123–161.
- Brix, H. *et al.*, 2012. "Wetlands, carbon, and climate change", *Landscape Ecology*. Springer Netherlands, 28(4), pp. 583–597.
- Broome, S. W., Seneca, E. D. y Woodhouse, W. W., 1988. "Tidal salt marsh restoration", *Aquatic Botany*. Elsevier, 32(1), pp. 1–22.
- Bruland, G. L., 2008. "Coastal wetlands: function and role in reducing impact of land-based management", *Coastal Watershed Management*, 13, pp. 85–124.
- Burkett, V. y Kusler, J., 2000. "Climate change: Potential impacts and interactions in wetlands of the United States", *Journal of the American Water Resources Association*. John Wiley & Sons, Ltd (10.1111), 36(2), pp. 313–320.
- Cain, M. L., Bowman, W. D. y Hacker, S. D. (eds.), 2014. *Changes in communities, Ecology*. Massachusetts, Estados Unidos: Sinauer.
- Castillo, A., 2005. "Comunicación para la restauración: perspectiva de los actores en intervenciones con y por medio de las personas", en Sánchez, O. *et al.* (eds.) *Temas sobre restauración ecológica*. México: Instituto Nacional de Ecología, pp. 67–76.
- Catford, J. A. *et al.*, 2011. "Flow regulation reduces native plant cover and facilitates exotic invasion in riparian wetlands", *Journal of Applied Ecology*. John Wiley & Sons, Ltd (10.1111), 48(2), pp. 432–442.
- CBD, 2015. *Wetlands and Ecosystem Services, Convention on biological diversity*. Disponible en: www.cbd.int (Consultado: el 22 de enero de 2019).
- Chapman, V. J., 1960. *Salt marshes and salt deserts of the world*. Segunda ed. Nueva York, Estados Unidos: London : L. Hill, 1960. (Plant science monographs).
- Chazdon, R. L., 2008. "Beyond deforestation: Restoring forests and ecosystem services on degraded lands", *Science*, 320(5882), pp. 1458–1460.
- Clements, F. E., 1916. *Plant Succession; an analysis of the development of vegetation*, *The Carnegie Institution of Washington*. Washington, Estados Unidos.
- Conesa, H. M. y Jiménez-Cárceles, F. J., 2007. "The Mar Menor lagoon (SE Spain): A singular natural ecosystem threatened by human activities", *Marine Pollution Bulletin*, 54(7), pp. 839–849.

- Contreras-Balderas, S. *et al.*, 2008. "Freshwater fishes and water status in México: A country-wide appraisal", *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 11(3), pp. 246–256.
- Cowardin, L. M. *et al.*, 2013. *Classification of Wetlands and Deepwater Habitats of the United States*. 2a ed, US Department of the Interior, US Fish and Wildlife Service. 2a ed. Washington, Estados Unidos: Wetlands Subcommittee, Federal Geographic Data Committee and U.S. Fish and Wildlife Service.
- D'Antonio, C. y Meyerson, L. A., 2002. "Exotic plant species as problems and solutions in ecological restoration: A synthesis", *Restoration Ecology*. John Wiley & Sons, Ltd (10.1111), 10(4), pp. 703–713.
- Day, J. W., Yáñez-Arancibia, A. y Kemp, W. M., 2012. "Human Impact and Management of Coastal and Estuarine Ecosystems", en *Estuarine Ecology*. New Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., pp. 483–495.
- Dugan, P. J., 1992. *Conservación de humedales: Un análisis de temas de actualidad y acciones necesarias*. Primera ed. Editado por P. J. Dugan. Gland, Suiza: IUCN.
- Erwin, K. L., 2009. "Wetlands and global climate change: The role of wetland restoration in a changing world", *Wetlands Ecology and Management*, 17(1), pp. 71–84.
- Espinosa-Pérez, H., 2014. "Biodiversidad de peces en México", *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, pp. 450–459.
- FAO, 1999. "Aquaculture Production Statistics - 1988-1997", *Fisheries Circular*. Rome, Italia: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 815(11), p. 15 p.
- FAO, 2009. *Programa de información de especies acuáticas. Penaeus monodon*, Departamento de Pesca y Acuicultura de la FAO [en línea]. Disponible en: http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Penaeus_monodon/es (Consultado: el 17 de febrero de 2019).
- Febles-Patrón, J. L., López Novelo, J. y Batllori Sampedro, E., 2009. "Pruebas de reforestación de mangle en una ciénaga costera semiárida de Yucatán, México", *Madera y bosques*, 15(3), pp. 65–86.
- Ferrati, R., Canziani, G. A. y Ruiz Moreno, D., 2005. "Esteros del Ibera: Hydrometeorological and hydrological characterization", *Ecological Modelling*, 186, pp. 3–15.
- Fierro, A., 2009. "Indicadores funcionales y estructurales para evaluar el estado de conservación de humedales costeros en el Sur de Tamaulipas", *CienciaUAT*. Universidad Autónoma de Tamaulipas, 4(1), pp. 61–63.
- Findlay, C. S. y Bourdages, J., 2000. "Response time of wetland biodiversity to road construction on adjacent lands", *Conservation Biology*. John Wiley & Sons, Ltd (10.1111), 14(1), pp. 86–94.
- Flores-Verdugo, F. *et al.*, 2007. "La topografía y el hidroperíodo: dos factores que condicionan la restauración de los humedales costeros", *Boletín de la Sociedad Botánica*

de México, 80(80S), pp. 33–47.

Folke, C. *et al.*, 2009. “Resilience and Sustainable Development: Building Adaptive Capacity in a World of Transformations”, *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 31(5), pp. 437–440.

Greenberg, R. *et al.*, 2006. “Tidal Marshes: A Global Perspective on the Evolution and Conservation of Their Terrestrial Vertebrates”, *BioScience*, 56(8), p. 675.

Gunderson, L. H., 2000. “Ecological Resilience—In Theory and Application”, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 31(1), pp. 425–439.

Hamer, A. J., Harrison, L. J. y Stokeld, D., 2016. “Road density and wetland context alter population structure of a freshwater turtle”, *Austral Ecology*. John Wiley & Sons, Ltd (10.1111), 41(1), pp. 53–64.

Hein, L., 2000. *Efectos de la cría de camarones en los manglares de la costa oriental de la India*, FAO. Roma, Italia. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/x8080s/x8080s08.htm> (Consultado: el 16 de febrero de 2019).

Hernández-Arana, H. A. y Ameneiro-Angeles, B., 2011. “Benthic biodiversity changes due to the opening of an artificial channel in a tropical coastal lagoon (Mexican Caribbean)”, *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 91(5), pp. 969–978.

Herrera-Silveira, J. A., Comín, F. y Capurro, L., 2004. “Los usos y abusos de la zona costera en la Península de Yucatán”, en Rivera Arriaga, E. *et al.* (eds.) *El Manejo Costero en México*. Quintana Roo, México: Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo, p. 644.

Hunter, R. G., Faulkner, S. P. y Gibson, K. A., 2008. “The importance of hydrology in restoration of bottomland hardwood wetland functions”, *Wetlands*. Springer Netherlands, 28(3), pp. 605–615.

International Wetlands, 2019. *Acuicultura, la pesca y la agricultura costera - Wetlands Internacional Latinoamérica y el Caribe*. Disponible en: <https://lac.wetlands.org/nuestro-enfoque/costas-y-deltas-llenos-de-vida/acuicultura-la-pesca-y-la-agricultura-costera/#read-more> (Consultado: el 16 de febrero de 2019).

IPCC, 2014. *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Suiza.

Jarzemsky, R. D., Burchell, M. R. y Evans, R. O., 2013. “The impact of manipulating surface topography on the hydrologic restoration of a forested coastal wetland”, *Ecological Engineering*. Elsevier, 58, pp. 35–43.

Karr, J. R., 1981. “Assessment of Biotic Integrity Using Fish Communities”, *Fisheries*. Taylor & Francis Group, 6(6), pp. 21–27.

Li, Y. *et al.*, 2014. “Ecological effects of roads on the plant diversity of coastal wetland in the

Yellow River Delta”, *The Scientific World Journal*, 2014, p. 8.

Lindig-Cisneros, R. y Zambrano, L., 2007. “Aplicaciones prácticas para la conservación y restauración de humedales y otros ecosistemas acuáticos”, en *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*, pp. 167–188.

Lindig-Cisneros, R. y Zedler, J. B., 2005. “La restauración de humedales”, en Sánchez, Ó. et al. (eds.) *Temas sobre restauración ecológica*. DF, México: Instituto Nacional de Ecología, pp. 201–214.

López Portillo, J. A. et al., 2010. “Humedales”, en Florescano, E. y Ortiz, J. (eds.) *Atlas del patrimonio Natural, Histórico y Cultural de Veracruz*. Primera ed. Veracruz, México: Comisión del Estado de Veracruz para la Conmemoración de la Independencia Nacional y la Revolución Mexicana, pp. 227–248.

Macintosh, D. J., Ashton, E. C. y Havanon, S., 2002. “Mangrove rehabilitation and intertidal biodiversity: A study in the Ranong mangrove ecosystem, Thailand”, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 55(3), pp. 331–345.

Marín-Muñiz, J. L. et al., 2016. “Percepciones sobre servicios ambientales y pérdida de humedales arbóreos en la comunidad de Monte Gordo, Veracruz”, *Madera Bosques*, 22(1), pp. 53–69.

Márquez-Huitzil, R., 2005a. “Fundamentos teóricos y convenciones para la restauración ecológica: Aplicación de conceptos y teorías a la resolución de problemas en restauración”, en Sánchez, O. et al. (eds.) *Temas sobre restauración ecológica*. México: Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), pp. 159–168.

Márquez-Huitzil, R., 2005b. “Planificación para la restauración asociada con el aprovechamiento de los recursos naturales”, en Sánchez, O. et al. (eds.) *Temas sobre restauración ecológica*. México: Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), pp. 169–179.

Mehvar, S. et al., 2019. “Climate change-driven losses in ecosystem services of coastal wetlands: A case study in the West coast of Bangladesh”, *Ocean and Coastal Management*. Elsevier, 169, pp. 273–283.

Middleton, B. . (ed.), 1999. *Wetland Restoration, Flood Pulsing, and Disturbance Dynamics*, John Wiley and Sons. Nueva York, Estados Unidos: John Wiley and Sons Ltd.

Mitsch, W. J. y Gosselink, J. G., 2015a. “Human Impacts and Management of Wetlands”, en Mitsch, W. J. y Gosselink, J. G. (eds.) *Wetlands*. Quinta ed. Nueva Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., pp. 477–501.

Mitsch, W. J. y Gosselink, J. G., 2015b. “Wetland Hydrology”, en Mitsch, W. J. y Gosselink, J. G. (eds.) *Wetlands*. Quinta ed. Nueva Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., pp. 111–115.

Mitsch, W. J. y Gosselink, J. G., 2015c. “Wetlands of the World”, en Mitsch, W. J. y Gosselink, J. G. (eds.) *Wetlands*. Quinta ed. Nueva Jersey, Estados Unidos: John Wiley &

Sons, Inc., pp. 45–106.

Mitsch, W. J. y Wang, N., 2000. "Large-scale coastal wetland restoration on the Laurentian Great Lakes: Determining the potential for water quality improvement", *Ecological Engineering*. Elsevier, 15(3–4), pp. 267–282.

Moles, A. T., Gruber, M. A. M. y Bonser, S. P., 2008. "A new framework for predicting invasive plant species", *Journal of Ecology*. John Wiley & Sons, Ltd (10.1111), 96(1), pp. 13–17.

Montes, C. *et al.*, 2007. *Manual de restauración de humedales mediterráneos*, *Journal of Chemical Information and Modeling*. Sevilla, España: Consejería de Medio Ambiente.

Moreno-Casasola, P., 2005. "Servicios ambientales que proporcionan los humedales". Veracruz, México: Instituto de Ecología A.C, pp. 1–12.

Moreno-Casasola, P., 2008. "Los humedales en México: tendencias y oportunidades", *Cuadernos de biodiversidad*, pp. 10–18.

Moreno-Casasola, P. y Infante, M. D., 2010. "II. Gente y pueblos de humedales", en Veracruz, C. O. del E. de (ed.) *Veracruz tierra de ciénagas y pantanos*. Veracruz, México, pp. 45–81.

Muralidhar, M. *et al.*, 2012. "Case study on the impacts of climate change on shrimp farming and developing adaptaion measures for small-scale shrimp farmers in Krishna District , Andhra Pradesh , India: Case study report", *Network of Aquaculture Centers*. Asia-Pacific, p. 126 pp.

Naciones Unidas, 2019. *Portada | Naciones Unidas*. Disponible en: <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html> (Consultado: el 22 de febrero de 2019).

Negandhi, K. *et al.*, 2019. "Blue carbon potential of coastal wetland restoration varies with inundation and rainfall", *Scientific Reports*, 9(1), p. 4368.

Nilsson, C. y Aradottir, Å. L., 2013. "Ecological and Social Aspects of Ecological Restoration: New Challenges and Opportunities for Northern Regions", *Ecology and Society*, 18(4), p. 35.

NOSS, R. F., 1990. "Indicators for Monitoring Biodiversity: A Hierarchical Approach", *Conservation Biology*, 4(4), pp. 355–364.

Oberdorff, T. *et al.*, 2002. "Development and validation of a fish-based index for the assessment of 'river health' in France", *Freshwater Biology*. John Wiley & Sons, Ltd (10.1111), 47(9), pp. 1720–1734.

Onaindia, O. M., 2010. "Biodiversidad y servicios de los ecosistemas", en Viota Fernández, N. y Maraña Saavedra, M. (eds.) *Servicios de los ecosistemas y bienestar humano*. Bilbao, España: UNESCO Etxea, p. 86.

Páez-Osuna, F., 2005. "Retos y perspectivas de la camaronicultura en la zona costera",

Revista Latinoamericana de Recursos Naturales, 1, pp. 21–31.

Pellerin, S. y Lavoie, C., 2003. “Reconstructing the recent dynamics of mires using a multitechnique approach”, *Journal of Ecology*, 91(6), pp. 1008–1021.

Peñuelas, J. *et al.*, 2018. “Assessment of the impacts of climate change on Mediterranean terrestrial ecosystems based on data from field experiments and long-term monitored field gradients in Catalonia”, *Environmental and Experimental Botany*. Elsevier, 152, pp. 49–59.

Pérez Munguía, R., Pineda López, R. y Medina Nava, M., 2007. “Integridad biótica de ambientes acuáticos”, en Sánchez, Ó. *et al.* (eds.) *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. Primera ed. DF, México: Instituto Nacional de Ecología, pp. 71–111.

Perrow, M. R. y Davy, A. J., 2002. *Handbook of Ecological Restoration*. Cambridge University Press.

Pueyo-Ros, J. *et al.*, 2018. “Ecological Restoration of a Coastal Wetland at a Mass Tourism Destination. Will the Recreational Value Increase or Decrease?”, *Ecological Economics*. Elsevier, 148, pp. 1–14.

Ramsar, 2002. “Servicios de los ecosistemas de humedales”. Gland, Suiza: Convención Ramsar, p. 2.

Ramsar, 2006a. *Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971)*. 4a ed. Gland (Suiza): Secretaría de la Convención de Ramsar.

Ramsar, 2006b. *Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán)*. 4a ed, Ramsar. 4a ed. Secretaría de la Convención de Ramsar.

Ramsar, 2010a. *Manual 13 - Inventario, evaluación y monitoreo*. 4a ed. Gland, Suiza: Secretaría de la Convención de Ramsar.

Ramsar, 2010b. *Uso racional de los humedales: Conceptos y enfoques para el uso racional de los humedales. Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales, 4ª edición, vol. 1*. Gland, Suiza.

Ramsar, 2014a. *La Convención de Ramsar y su misión*. Disponible en: <https://www.ramsar.org/es/acerca-de/la-convencion-de-ramsar-y-su-mision> (Consultado: el 14 de marzo de 2019).

Ramsar, 2014b. *Uso racional de los humedales*. Disponible en: <https://www.ramsar.org/es/acerca-de/uso-racional-de-los-humedales> (Consultado: el 14 de marzo de 2019).

Ramsar, 2015a. “Estado de los humedales del mundo y de los servicios que prestan a las personas: una recopilación de análisis recientes”, *Nota informativa Ramsar 7*.

Ramsar, 2015b. “Estado de los humedales del mundo y de los servicios que prestan a las personas: una recopilación de análisis recientes”, *Nota informativa Ramsar 7*, p. 20.

Ramsar, 2016. "The Fourth Ramsar Strategic Plan 2016–2024", en *Ramsar handbooks for the wise use of wetlands*. Quinta. Gland, Suiza: Secretaria de la Convención Ramsar.

Ramsar, 2017. *Historia de la Convención de Ramsar*. Disponible en: <https://www.ramsar.org/es/acerca-de/historia-de-la-convencion-de-ramsar> (Consultado: el 14 de marzo de 2019).

Ramsar, 2018. *Partes Contratantes en la Convención de Ramsar*. Gland, Suiza.

Ramsar, 2019. "The List of Wetlands of International Importance", *Convención Ramsar*, pp. 1–48.

Ramsar CREHO, 2010. *Tipos de humedales*. Disponible en: <https://creho.org/humedales/tipos-de-humedales/> (Consultado: el 16 de abril de 2019).

Real Academia Española, 2019. *Diccionario de la Lengua Española, El Diccionario de la lengua española*. Disponible en: <https://dle.rae.es/?id=WEDDoZm> (Consultado: el 21 de abril de 2019).

Roberto, L.-C. *et al.*, 2003. "Wetland restoration thresholds: can a degradation transition be reversed with increased effort?", *Ecological Applications*. John Wiley & Sons, Ltd, 13(1), pp. 193–205.

RSIS, 2008. *Servicio de Información sobre Sitios Ramsar*. Disponible en: [https://rsis.ramsar.org/es/ris-search/?language=es&f%5B0%5D=regionCountry_es_ss%3AAmerica Latina y el Caribe&f%5B1%5D=wetlandTypes_es_ss%3AHumedales marinos o costeros](https://rsis.ramsar.org/es/ris-search/?language=es&f%5B0%5D=regionCountry_es_ss%3AAmerica%20Latina%20y%20el%20Caribe&f%5B1%5D=wetlandTypes_es_ss%3AHumedales%20marinos%20o%20costeros) (Consultado: el 3 de enero de 2019).

Sánchez, Ó., 2005. "Restauración ecológica: algunos conceptos, postulados y debates al inicio del siglo XXI", en Sánchez, Ó. *et al.* (eds.) *Temas sobre restauración ecológica*. DF, México: Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), p. 256.

Scheffer, M. y Carpenter, S. R., 2003. "Restauration écologique: Contexte, contraintes et indicateurs de suivi", *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, 14(1), pp. 203–211.

Schmitter-Soto, J. J. *et al.*, 2006. *Evaluación del riesgo de extinción de los cíclidos mexicanos y de los peces de la frontera sur incluidos en la NOM-059 (Informe técnico)*. Quintana Roo, México.

Schmitter-Soto, J. J., 2014. "Los índices bióticos de integridad en el monitoreo ambiental", en González Zuarth, A. C. *et al.* (eds.) *BIOINDICADORES: Guardianes de nuestro futuro ambiental*. Primera ed. DF, México, pp. 65–82.

Scott, D. B., Frail-Gauthier, J. y Mudie, P. J. (eds.), 2014a. "Using mesocosms as a way to study coastal wetlands", en *Coastal Wetlands of the World: Geology, Ecology, Distribution and Applications*. North Carolina, Estados Unidos: Cambridge University Press, pp. 279–296.

Scott, D. B., Frail-Gauthier, J. y Mudie, P. J. (eds.), 2014b. "Zonations and plants: development, stressors and adaptations", en *Coastal Wetlands of the World*. Cambridge: Cambridge University Press.

Sfriso, A., Facca, C. y Ghetti, P. F., 2003. "Temporal and spatial changes of macroalgae and phytoplankton in a Mediterranean coastal area: the Venice lagoon as a case study", *Marine Environmental Research*, 56(5), pp. 617–636.

Shuldiner, P. W., Cope, D. F. y Newton, R. B., 1979. "Ecological Effects of Highway Fills on Wetlands: Examples from the Field", *Transportation Research Record*. NCHRP Report, (218B)., 736, pp. 29–37.

Simenstad, C., Reed, D. y Ford, M., 2006. "When is restoration not? Incorporating landscape-scale processes to restore self-sustaining ecosystems in coastal wetland restoration", *Ecological Engineering*. Elsevier, 26(1), pp. 27–39.

Society for Ecological Restoration (SER) International, 2004. *Principios de SER Internacional sobre la Restauración Ecológica*, Grupo de trabajo sobre ciencia y políticas. www.ser.org y Tucson: Society for Ecological Restoration International.

Society for Ecological Restoration International, 2004. "Society or Ecological Restoration (SER) International, Grupo de trabajo sobre ciencias y políticas.Principios de SER Internacional sobre la Restauración Ecológica", *Society for Ecological Restoration International*, p. 16.

Spalding, M., Blasco, F. y Field, C. (eds.), 1997. *World Mangrove Atlas*, *The International Society for Mangrove Ecosystems*. Okinawa, Japón: The International Society for Mangrove Ecosystems.

Suding, K. N., 2011. "Toward an Era of Restoration in Ecology: Successes, Failures, and Opportunities Ahead", *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. Annual Reviews, 42(1), pp. 465–487.

Tan, Y. *et al.*, 2018. "Valuation of environmental improvements in coastal wetland restoration: A choice experiment approach", *Global Ecology and Conservation*. Elsevier, 15, pp. 1–8.

Teal, J., 2016. "Succession in coastal wetlands", en *The Wetland Book*. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 73–75.

The National Wetlands Working Group, 1997. *The Canadian Wetland Classification System*. Segunda ed. Editado por B. G. Warner y C. D. A. Rubec. Waterloo, Ontario: The Wetlands Research Centre.

Trombulak, S. C. y Frissell, C. A., 2000. "Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities", *Conservation Biology*. John Wiley & Sons, Ltd (10.1111), 14(1), pp. 18–30.

Valiela, I. *et al.*, 2009. "Global losses of mangroves and salt marshes", en Duarte, C. M. (ed.) *Global Loss of Coastal Habitats Rates, Causes and Consequences*. Primera ed.

España: Bilbao: Fundación BBVA, pp. 1–36.

Van, B. J.-W., Sullivan, E. y Nakamura, T. (eds.), 2014. *The importance of mangroves to people: A call to action*, United Nations Environment Programme World Conservation Monitoring Centre. Cambridge.

Vega Peña, E. V., 2005. “Algunos conceptos de ecología y sus vínculos con la restauración”, en Sánchez, Ó. et al. (eds.) *Temas sobre restauración ecológica*. México: Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), pp. 147–158.

Vidal, L. et al., 2015. “Implementación del plan estratégico Ramsar en humedales costeros de la Península de Yucatán: normativas y regulación”, *Lat. Am. J. Aquat. Res*, 43(5), pp. 873–887.

Villalobos Zapata, G. J. et al., 1999. “Ecología y Manejo de los Manglares en la Laguna de Términos, Campeche, México”, en *Ecosistemas de Manglar en América Tropical*. México: Instituto de Ecología A.C, pp. 263–274.

Vitousek, P. M. et al., 1997. “Introduced species: a significant component of human-caused global change”, *Journal of Ecology*, 21(1), pp. 1–16.

Wagner, K. I. et al., 2008. “Wetland restoration in the new Millennium: Do research efforts match opportunities?”, *Restoration Ecology*. John Wiley & Sons, Ltd (10.1111), 16(3), pp. 367–372.

Williams, K. et al., 2003. “Interactions of Storm, Drought, and Sea-level Rise on Coastal Forest: A Case Study”, *Source: Journal of Coastal Research Journal of Coastal Research Journal of Coastal Research*, 19(194), pp. 1116–1121.

Williams, P. y Faber, P., 2001. “Salt Marsh Restoration Experience in San Francisco Bay”, *Journal of Coastal Research*, 27, pp. 203–211.

Yin, C. y Lan, Z., 1995. “The nutrient retention by ecotone wetlands and their modification for Baiyangdian lake restoration”, *Water Science and Technology*, 32(3), pp. 159–167.

Zedler, J. B., 2000. “Progress in wetland restoration ecology”, *Trends in Ecology and Evolution*. Elsevier Current Trends, pp. 402–407.

Zhang, Y. et al., 2019. “Coastal wetland resilience to climate variability: A hydrologic perspective”, *Journal of Hydrology*. Elsevier, 568, pp. 275–284.

Zhao, Q. et al., 2016. “A review of methodologies and success indicators for coastal wetland restoration”, *Ecological Indicators*. Elsevier Ltd, 60, pp. 442–452.