

DUNAS Y PROCESOS COSTEROS EN UNA ISLA TROPICAL CARIBEÑA AMENAZADA POR EROSIÓN, ACTIVIDADES HUMANAS Y AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR

Rosana Grafals Soto

ABSTRACT

Coastal dunes mitigate the effects of coastal hazards. Nevertheless, information about the importance of coastal dunes in Puerto Rico and the Caribbean is limited, preventing their effective integration in coastal management plans. This article highlights dunes as a potential alternative in the search of coastal resiliency. Despite conspicuous human impact, such as dam construction, sand mining and coastal infrastructure, most of the municipalities in the northern coast of the Puerto Rico fulfill the dune forming criteria including: 1) dominant onshore wind, 2) a continuous supply of sand, and 3) the presence of obstacles to cause sand deposition. Therefore, there is more potential in dune restoration than it is acknowledged, and many municipalities could benefit from dune protection and/or restoration as mitigation alternatives for erosion and sea level rise. This study aims to provide necessary baseline knowledge to benefit from this potential and achieve the effective integration of dunes in Puerto Rico coastal management plans.

Keywords: coast, dunes, management, coastal hazards, erosion, sea level rise

RESUMEN

Las dunas costeras mitigan los efectos de riesgos costeros, pero existe poca información sobre este importante rol de las dunas en Puerto Rico y el Caribe, dificultando su integración en planes de manejo. Este artículo destaca las dunas como alternativa potencial para la búsqueda de resiliencia en la costa. A pesar del impacto de actividades humanas como construcción de represas, minería de arena e infraestructura costera, la mayoría de la costa norte de la isla cumple con los criterios de formación de dunas: 1) vientos dominantes y fuertes en dirección tierra adentro, 2) suprido continuo de arena, 3) y obstáculos que provoquen deposición. Considerando este dato, existe mayor potencial en la restauración de dunas del que se reconoce, y algunos municipios podrían beneficiarse de la protección y/o restauración de dunas como alternativa de mitigación de erosión y aumento en el nivel del mar.

Este trabajo pretende proveer información necesaria para aprovechar este potencial e integrar efectivamente las dunas de Puerto Rico en los planes de manejo costero.

Palabras clave: costa, dunas, manejo, riesgos costeros, erosión, nivel del mar

RÉSUMÉ

Les dunes côtières réduisent les effets de risques côtiers, mais il existe peu d'informations sur le rôle majeur des dunes à Porto Rico et dans la Caraïbe, ce qui complique leur intégration dans les plans d'urbanisme. Cet article présente les dunes comme mesure de résilience alternative pour les zones côtières. Malgré l'impact des activités humaines comme la construction de réservoirs, la présence de carrières de sable et d'infrastructures côtières, la grande partie de la côte nord de l'île reste favorable à la formation de dunes grâce à 1) des vents forts et dominants en direction des terres ; 2) du sable à disposition, 3) des obstacles qui permettent de constituer des dépôts. Il semblerait donc que la restauration de dunes offre un potentiel supérieur à celui actuellement reconnu et que plusieurs municipalités pourraient ainsi bénéficier de la protection et/ou de la restauration de ces dunes comme mesure de protection contre l'érosion et l'augmentation du niveau de la mer. Cet article souhaite apporter un éclairage sur les apports potentiels de ce type de projet et sur l'intégration des dunes pour une gestion efficace des zones côtières à Porto Rico.

Mots-clés : côte, dunes, gestion des risques côtiers, érosion, niveau de la mer

Recibido: 27 octubre 2016 Revisión recibida: 26 julio 2017 Aceptado: 28 julio 2017

Los procesos costeros se han convertido en una preocupación incuestionable en Puerto Rico y el Caribe. El deterioro de infraestructura y propiedades aledañas a la costa evidencian la ocurrencia de procesos costeros de erosión y deposición que ponen en riesgo la propiedad y la vida de las personas que utilizan, y en ocasiones, dependen de estos espacios. Simultáneamente, esta infraestructura costera y actividades humanas modifican los procesos de erosión y deposición (Brown y McLachlan 2002; Liu *et al.* 2011), que a su vez son impactados por el aumento en la temperatura atmosférica global de las últimas décadas. Los cambios recientes en la atmósfera afectan el paso y severidad de tormentas, el aumento en el nivel del mar y las condiciones para el crecimiento de la vegetación costera (Nordstrom 2000) que paralelamente tienen consecuencias sobre la erosión y deposición.

La erosión costera implica remoción de sedimento de un lugar para ser

transportado y depositado en otro. La erosión constante en las playas ocurre cuando, a causa principalmente del oleaje y las corrientes, el aumento en el nivel del mar o deficiencias en la arena, se remueve el sedimento a una razón mayor de la que se reemplaza (Daniel y Abkowitz 2005a). Factores naturales y antropogénicos, como las tormentas y la minería de arena respectivamente, influyen en un proceso complejo de erosión (Daniel y Abkowitz 2005b; Liu *et al.* 2011) por ser único para cada playa.

La erosión de playa representa un riesgo para el turismo costero, actividad económica principal en las islas caribeñas (Daniel y Abkowitz 2003). Adicionalmente, se espera que según aumente el impacto de las actividades humanas y el cambio climático en la costa, continúe y aumente también la erosión de playas (Cambers 2009). En Puerto Rico, más de la mitad de la población vive en municipios costeros (López Marrero y Acevedo Muñiz 2016), por lo que la costa representa un espacio esencial para los habitantes y sus asentamientos en esta isla caribeña. Ante estos riesgos, las poblaciones costeras podrían beneficiarse de la presencia de dunas.

Las dunas de arena son amortiguadores que protegen los asentamientos costeros de la erosión (Carboni, Carranza y Acosta 2008). Son reservas de arena disponible para acomodarse en la playa durante condiciones de tormenta (UN 1998), estabilizan el sedimento, protegen las playas recreativas y las propiedades frente al mar al controlar la erosión costera (Barbier 2011) y proveen espacio para que la playa migre tierra adentro. Las dunas son hábitat de plantas adaptadas a condiciones extremas y refugio de vida silvestre (Pintó 2014), y según Eastwood y Carter (1981), le añaden complejidad a la playa proveyendo topografía, flora y fauna (citado en Nordstrom 2000).

La desinformación sobre las dunas en Puerto Rico y los procesos costeros relacionados es alarmante. Se podría aseverar que son muchos los puertorriqueños que desconocen lo que es una duna, su proceso de formación y dónde se ubican en Puerto Rico. A nivel científico y académico, poca literatura se ha publicado sobre las dunas tropicales (p. ej. Álvarez-Molina *et al.* 2012; Bernal *et al.* 2014; Eskuche 1992, Hesp 2004; Martínez, Maun y Psuty 2004; Martínez, Vázquez y Sánchez Colón 2001; Moreno-Casasola 2006; Morton 1957; Moreno-Casasola 2004; Pye 1983; Wong 1990) y más específicamente sobre las dunas caribeñas (p. ej. Castillo y Moreno-Casasola 1998; Guara Requena 1989; Huesca y Pisanty 1982; Moreno-Casasola 1986; Rodríguez-Ramírez y Reyes-Nivia 2008; UN 1998; van der Maarel *et al.* 2010), entre ellas las de Puerto Rico.

En este artículo, se utiliza a Puerto Rico para discutir procesos costeros con énfasis en las dunas en el contexto de una isla tropical caribeña amenazada por riesgos relacionados a erosión, actividades humanas y aumento del nivel del mar. La intención es discutir la importancia de los

procesos costeros para la población que vive, visita, disfruta e influencia la costa arenosa de una forma u otra destacando los sistemas de dunas. La expectativa es generar información para aclarar dudas sobre los procesos costeros y las dunas de Puerto Rico en representación de muchas de las islas caribeñas.

Playas-dunas, actividades humanas y vulnerabilidad

Los sistemas de playas y dunas son distintos pero interactúan a través de intercambios de materiales orgánicos y flujos de materia no orgánica como arena y rocío salino formando una unidad llamada playa-duna dinámica (Mclachlan 1990; Servera, Gelabert y Rodríguez-Perea 2009). La playa se extiende tierra adentro hasta encontrar alguna diferencia geomórfica (p. ej. duna), vegetativa o estructura construida; y mar adentro hasta que la oscilación del oleaje no mueva el sedimento en el fondo marino (Komar 1999). Constituye un espacio de arena expuesta (zona subaérea) y otro de arena sumergida (zona submarina) divididos por una línea de agua que coincide con el ir y venir del oleaje (Figura 1). El movimiento constante de la arena a causa del oleaje, las corrientes y el viento hace de las playas espacios naturalmente inestables, permitiendo la continuidad de sus procesos geomórficos (Komar 1999). La inestabilidad es esencial pues le da flexibilidad a las playas y dunas para absorber la energía del oleaje energético y les permite ajustar su forma y posición (UN 1998). Este ajuste ocurre a través del transporte de arena que se traduce en erosión y deposición.



Figura 1: Sistema de playa/duna. Todas las fotografías por Rosana Grafals Soto.

Antes de considerar la influencia humana, la erosión y deposición de arena constituyen un proceso natural que ocurre en todas las costas arenosas a partir de la interacción entre la arena con la fuerza del agua (oleaje y corrientes) o con el viento. El transporte ocurre en diversas circunstancias espaciales y temporales. Los cambios constantes, rápidos y diarios en una misma playa erosionan arena en un área y la depositan en otra (Cambers 2009). El tiempo atmosférico y los factores naturales relacionados provocan condiciones variadas en el oleaje que responden a temporadas climáticas (Nordstrom 2000, p. ej. Bernal *et al.* 2014), provocando erosión en algunas temporadas y deposición en otras. Bajo estas condiciones, la arena no desaparece sino que se reubica ya sea en diferentes zonas de la misma playa o en playas cercanas. Por ejemplo, la playa debería reconstruirse según se re-deposita su arena poco a poco después de la erosión provocada por una tormenta (UN 1998). Sin embargo, la complejidad de este proceso implica diversidad de factores que le influyen (Daniel y Abkowitz 2005a): naturales y antropogénicos. La erosión causada por factores antropogénicos es la más difícil de revertir pues evita el transporte, limita la movilidad de la arena, y/o la elimina. Algunas actividades humanas que causan erosión incluyen represas en los ríos, minería de arena y construcción de propiedades frente al mar (Cambers 2009).

Las represas obstaculizan el flujo de sedimento del río al océano provocando graves problemas de erosión en las playas (Komar 1999; Brown y McLachlan 2002). Muchas costas deposicionales a nivel mundial se han transformado en costas erosivas por la presencia de represas (en Nordstrom 2000, Awosika *et al.* 1993; Innocenti y Pranzini 1993 y Li *et al.* 2009 en Liu *et al.* 2011). En Puerto Rico, el sedimento que transportan los ríos es fuente esencial de arena para muchas playas. Sin embargo, mucha de esa arena queda atrapada en los numerosos embalses de las represas existentes en los ríos de la Isla.

La minería reduce considerablemente los volúmenes de arena disponibles para la playa (Rajith *et al.* 2008) y su capacidad de amortiguar la energía de las tormentas (Liu *et al.* 2011), destruye la vegetación de las dunas y puede modificar los procesos de transporte de arena (McLachlan y Brown 2006). Una de las razones principales para minar arena es la obtención de agregado de construcción (Nordstrom 2000). En Puerto Rico, para la década del 60, se minaron dunas de 10m de altura para construir el Aeropuerto Internacional (Hernández-Delgado *et al.* 2012) y, según Colón Dávila (2016), recientemente se han reportado varios casos de minería ilegal. Esta práctica ha contribuido grandemente a crear sistemas de playas más expuestos al embate del oleaje y a la erosión en Puerto Rico (Barreto 1997) y, en casi todas las islas caribeñas, se ha convertido en un problema serio (Cambers 2009).

Las propiedades e infraestructura inmóvil en playas construidas entran en conflicto con los cambios constantes en la posición de las playas (UN 1998). En temporadas en las que la línea de agua se ubica más tierra adentro, el oleaje puede destruir las propiedades construidas muy cerca del océano (Komar 1999). La mayoría de las playas en áreas urbanas son estrechas en comparación con áreas poco construidas pues parte de su espacio ha sido ocupado por infraestructura permanente como edificios y carreteras (Nordstrom, Lampe y Vandemark 2000). Más aún, estas playas construidas tienden a estrecharse y hasta a desaparecer al erosionarse, mientras que las playas no construidas tienen el espacio disponible para migrar tierra dentro (Cambers 2009). La falta de espacio contrasta con la publicidad de playa ancha prometida a visitantes y turistas, restringe la movilidad de la costa arenosa, impide la formación de dunas, limita su capacidad para adaptarse a la erosión, lo que aumenta el riesgo de deterioro de infraestructura, disminuye el valor estético y atractivo natural del sistema de playa-duna, aumenta su vulnerabilidad y disminuye su resiliencia.

Se entiende vulnerabilidad como condiciones que causan erosión acelerada llevando al sistema a un estado de degradación avanzado (Davies, Williams y Curr 1995). Mientras que resiliencia es la capacidad del sistema de regresar al estado dinámico previo a su degradación (Martínez *et al.* 2006). Este estado previo es distinto en cada sistema y puede ser muy difícil de definir. Aun así, se reconoce que las playas anchas, son más capaces de sobrellevar modificaciones como el aumento en el nivel del mar y oleaje energético, que una playa estrecha restringida por estructuras de concreto (Cambers 2009). Las dunas altamente resilientes se caracterizan por el sedimento abundante de sus playas mientras que las playas altamente resilientes cuentan con el suministro de arena que proveen las dunas (Martínez *et al.* 2006). Un sistema poco vulnerable cuenta con un suministro abundante de arena y poco impacto humano (Martínez *et al.* 2006).

No obstante, siendo la densidad poblacional en la costa tres veces mayor que tierra adentro, la costa está expuesta a impactos ambientales graves por actividades humanas que disminuyen su resiliencia (Martínez *et al.* 2006). Según Nordstrom y Mitteager (2001), en espacios urbanos o construidos, se prefieren las playas planas sin dunas porque facilitan el acceso a áreas recreativas y turísticas. Los dueños de edificios que bordean las playas construidas se benefician de la topografía plana pues preserva las vistas al mar las cuales aumentan los precios de venta y alquiler. Aun así, es importante lograr resiliencia al adaptarnos al cambio climático (Carter y Raps 2008), considerando la importancia económica de las playas y dunas, y la seguridad de las comunidades que las habitan particularmente en el Caribe.

El Caribe y riesgos costeros

El Caribe es la región del mundo que más depende del turismo (Bolaky 2011) pues es su principal fuente de ingresos económicos (Ayala 2004). La mayoría de las ciudades y centros de pueblos de sus islas están en la costa (Cambers 2009). El turismo en el Caribe destaca atractivos relacionados a mar, playa, sol y cruceros (Ayala 2004, Zapino 2005). Los asentamientos y actividades turísticas en las islas caribeñas se concentran a lo largo de la costa (Daniel y Abkowitz 2005a), la mayoría localizados en los 800m adyacentes a la línea de marea alta (Zapino 2005).

Ante este escenario, las facilidades costeras turísticas del Caribe están en riesgo de erosión de playa e inundación (Daniel y Abkowitz 2003 y 2005a). La ocurrencia de oleaje energético por tormentas causa los procesos erosivos más desastrosos de las costas caribeñas (Daniel y Abkowitz 2005b). Adicionalmente, las islas caribeñas son vulnerables al aumento en la intensidad de las tormentas y al aumento en el nivel del mar por el cambio climático (Cambers 2009). Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), el aumento promedio en el nivel del mar en el Caribe en el siglo 20 fue de 1 mm yr⁻¹ (IPCC, 2012) y se anticipa que excederá el promedio mundial (Dasgupta *et al.* 2009). Este aumento en nivel del mar como consecuencia del cambio climático reciente se relaciona con desastres más intensos y frecuentes (Cambers 2009). Los riesgos asociados al aumento en el nivel del mar son especialmente importantes dado el dominio continuo del turismo costero y la realidad de isla pequeña de muchas naciones en el Caribe (IPCC 2012). Estos riesgos se suman a los problemas de erosión que ocurren en el Caribe desde mucho antes de iniciarse la discusión sobre el aumento en el nivel del mar.

En Puerto Rico, recientemente se ha registrado una tasa anual de aumento en el nivel mar de aproximadamente 2.04 mm (Mercado 2017). Este aumento parecería insignificante hasta que se considera su efecto acumulativo tierra adentro y a largo plazo. Considerando que en Puerto Rico, el 61% de la población se ubica en 44 municipios costeros, los servicios e infraestructura de su costa son particularmente vulnerables (López Marrero y Acevedo Muñiz 2016). A partir de esta realidad, ha aumentado el interés por mitigar los efectos del aumento en el nivel del mar y la erosión costera. La presencia de dunas costeras podría ser una alternativa de protección pues, según Brown y McLachlan (2002), las playas con dunas sufrirán menos el aumento en el nivel del mar si tienen espacio tierra dentro que les de movilidad y capacidad de adaptación.

¿Qué es una duna y cómo se forma?

Las dunas son montículos de arena transportada tierra adentro por el viento y depositada detrás de la playa (Figura 1) no importa su tamaño, altura, forma, orientación, o presencia/ausencia de vegetación. Las dunas intercambian arena con la playa constantemente (Psuty 2004) pues las playas son la fuente de arena de la duna, y las dunas son el almacén de arena de la playa. Si el oleaje energético erosiona la duna, la arena se ubica en la zona subaérea o submarina de la playa (Figura 1). El oleaje es importante para las dunas porque modifica el ancho de la playa, pero el oleaje forma la playa y el viento forma la duna en un proceso eólico. La formación de dunas ocurre bajo los siguientes criterios: 1) vientos dominantes en dirección tierra adentro que puedan transportar la arena, 2) suplido continuo de arena, y 3) obstáculos que reduzcan la velocidad del viento provocando deposición (Maun 2009).

Para que el viento influencie la playa, esta tiene que estar orientada de cara al viento. En Puerto Rico, y el Caribe en general, los vientos alisios del este-noreste son la fuente principal de vientos constantes y fuertes. Distinto a las playas lineales de los continentes, muchas de las playas de las islas caribeñas tienden a tener forma de media luna lo cual modifica la forma en que el viento incide sobre ellas. En el caso de la playa en la Figura 2, solo el lado oeste de la media luna es influenciado por los vientos alisios de forma apropiada para formar dunas, no así el lado este.

El ancho de la playa define la disponibilidad del suplido continuo de arena y el tamaño de la arena determina si el viento podrá transportarla. Es entonces más común encontrar dunas en formación en playas anchas



Figura 2: Playa en forma de media luna. Sólo su lado oeste está orientado de cara a los vientos alisios. Carolina, P.R. Google Earth 2016.

de arena fina. Las playas anchas usualmente se caracterizan por tener oleaje energético capaz de producir las corrientes que transportan y depositan grandes cantidades de arena. En ocasiones, las temporadas de oleaje energético pueden estrechar las playas con dunas. Este proceso es comúnmente temporero y la playa se recupera al disminuir la energía del oleaje si el sedimento esté disponible para ser transportado y depositado de regreso. La costa norte de Puerto Rico cuenta con oleaje energético capaz de crear playas anchas y extensas, algunas de ellas sobrepasando los 45m de ancho especialmente durante el verano (Figura 3). Existen playas estrechas con dunas pero en Puerto Rico tienden a ser dunas estables, inactivas y densamente cubiertas de vegetación o estrechas como resultados de ciclos de erosión de playa en temporadas específicas.



Figura 3: Una de las playas más anchas y dunas más altas visitadas. Camuy, P.R., 2013.

La vegetación es el obstáculo más común que provoca deposición de arena durante el transporte eólico. La vegetación en las dunas está adaptada para tolerar condiciones extremas como vientos de alta velocidad, rocío salino y enterramiento (Maun 2009) lo que le permite disminuir la velocidad del viento, provocar deposición de arena e iniciar la formación de dunas. En Puerto Rico y el Caribe, las especies que favorecen la formación inicial de las dunas, o especies pioneras, son gramíneas de un promedio de 10cm de altura con hojas finas y estrechas pero menudas incluyendo el matojo de burro (*Sporobolus virginicus*) (Figura 4) y la yerba de sal (*Spartina patens*). Estas disminuyen la velocidad del viento y permiten que la arena pase a través de sus hojas depositándose directamente detrás de la planta siguiendo la dirección del viento. La acumulación de



Figura 4: Especies forman y/o estabilizan la duna: Matojo de burro, Batata de playa y Uva de playa. Manatí, Puerto Rico, 2011.

arena inicial provocada por estas especies permite la formación de una duna incipiente, aquélla de poco tamaño colonizada por vegetación pionera (Figura 5) y localizada cercana a la línea de agua.



Figura 5: Ondulaciones en la arena y duna incipiente colonizada por vegetación pionera, Arecibo, P.R., 2015.

Otros tipos de vegetación que comúnmente se observan en los mismos espacios ocupados por estas gramíneas, son las enredaderas como la batata o bejuco de playa (*Ipomea pes-caprae*) (Figura 4) y la haba de playa (*Canavalia rosea*). Estas enredaderas tienen adaptaciones para sobrevivir enterramiento pero sus hojas son anchas en forma de óvalo o de corazón y su capacidad de provocar deposición es distinta a la de las gramíneas. Ambas, enredaderas y gramíneas, tienen raíces superficiales que les permite estabilizar la arena.

Según la duna aumenta en tamaño, otros tipos de plantas la colonizan tierra dentro. En la pendiente de la duna que mira al océano y en la cresta (parte de mayor elevación de la duna), comúnmente se encuentran arbustos como la uva de playa (*Cocoloba uvifera*) (Figura 4). Esta especie de hojas anchas y redondas, con troncos y ramas sólidas y fuertes, tiene adaptaciones para sobrellevar el embate del oleaje, inundaciones periódicas, viento, rocío salino y altas temperaturas. Son excelentes para estabilizar las dunas ya formadas pero tienen menos capacidad de iniciar la formación de dunas que las gramíneas y las enredaderas.

El desarrollo de la vegetación en la playa y duna ocurre si hay espacio para su crecimiento. La disponibilidad de espacio se puede asociar al uso otorgado y a las actividades realizadas en cada área de la playa. Esto incluye la ubicación de infraestructura que sustituye las dunas o limita el espacio disponible para su formación y de actividades humanas como la limpieza de playas. Los edificios, estacionamientos y carreteras reducen el ancho de la playa, sustituyen la arena y restringen el espacio disponible para la formación de dunas (Figura 6). La limpieza frecuente de la playa,



Figura 6: Duna incipiente adyacente a edificio y ondulaciones en la arena. Isla Verde Carolina, Puerto Rico, 2014.

utilizando rastrillos amarrados a vehículos de motor, elimina por igual la basura generada por la gente, las semillas, algas y detrito (p. ej. pedazos de troncos), además de que compacta la arena haciendo difícil la germinación de las semillas que puedan permanecer. Las algas y el detrito son obstáculos capaces de iniciar la formación de dunas (Figura 7). En playas donde se recoge la basura manualmente seleccionando sólo la basura generada por la gente, las semillas tienen mejor oportunidad de crecer y, eventualmente, formar dunas. Las estructuras humanas (p. ej. zafacones, edificios y paredes (Figura 6), también tienen el potencial de formar dunas. Pero éstas son dunas vulnerables a la energía del oleaje y su desarrollo podría ser intermitente y limitado por su cercanía a la línea de agua y el poco espacio disponible.



Figura 7: Pedazo de tronco y restos de algas (detrito) como barrera al transporte del viento, rodeadas de ondulaciones en la arena. Culebra, Puerto Rico 2015.

¿Dónde están las dunas en Puerto Rico?

Observando imágenes de satélite (Figura 2) se identificaron las playas que cumplen con dos de los criterios de formación de dunas: 1) orientación a vientos dominantes y 2) playa ancha como fuente de

sedimento. El tercer criterio (obstáculos que inicien la formación) se corroboró con visitas al campo. Las playas orientadas hacia los vientos alisios miran hacia el norte o el noreste de Puerto Rico. Las playas anchas se identificaron visualmente por la acumulación de arena (determinable por su color crema) adyacente al océano. Las playas identificadas con las imágenes se visitaron entre el 2014 y el 2016 para corroborar que cumplieran con los criterios de formación de dunas.

La mayoría de los municipios de la costa norte de Puerto Rico cumplen con los criterios de formación de dunas identificables en las imágenes. Algunas excepciones incluyen municipios mayormente de costa rocosa (p. ej. Quebradillas), de costa de humedal (Guaynabo y Cataño) o con grandes extensiones de arrecifes que limitan la energía del oleaje en la línea de agua (p. ej. Fajardo).

Los municipios que cumplen con los criterios de formación de dunas en al menos una porción mínima de su territorio incluyen: Culebra, Vieques, Luquillo, Loíza, Carolina, San Juan, Dorado, Manatí, Barceloneta, Arecibo, Hatillo, Camuy, Isabela y Aguadilla (Figura 8). En Culebra, hay dunas en Playa Flamenco, Resaca y Brava. En Luquillo, hay dunas pequeñas en la playa San Miguel del Corredor Ecológico del Noreste. En Loíza, existen dunas entre la pocita de Piñones y Punta Vacía Talega. En Carolina, las dunas están aledañas al cementerio de Isla Verde y justo al este en el área más ancha y vegetada de la playa, además hay dunas muy pequeñas justo al este del Hotel Courtyard Marriott y algunas intermitentes adyacentes al edificio de Casa Cuba. En San Juan, hasta

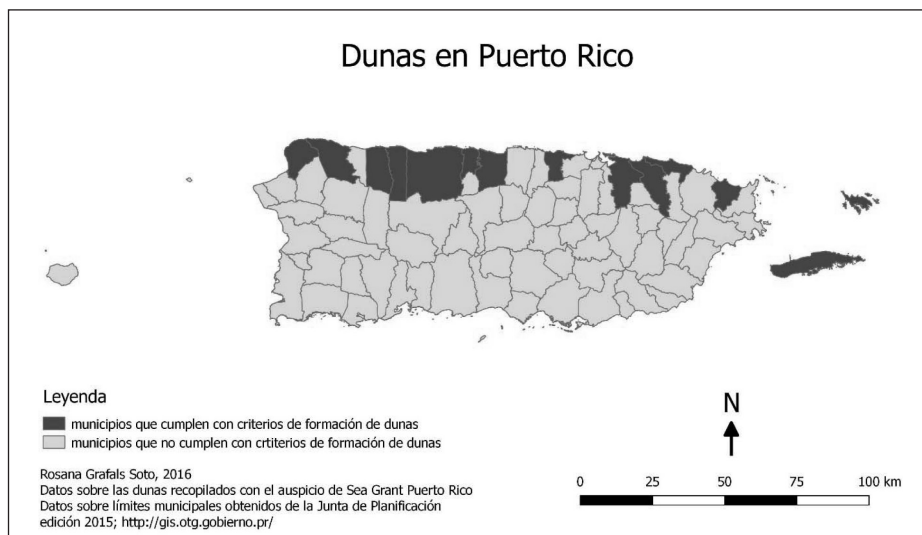


Figura 8: Municipios que cumplen con los criterios de formación de dunas en Puerto Rico.

principios del 2017, había dunas al final de la calle Gertrudis donde la playa es ancha y vegetada, sin embargo fueron removidas reciente e inexplicablemente: otra evidencia del desconocimiento sobre la importancia de las dunas en Puerto Rico. En Dorado, hay dunas en la Reserva Natural Playa Grande. En Manatí, existen dunas móviles en la Poza de las Mujeres y en Los Tubos, y estáticas en la Playa de Punta Manatí. Casi toda la costa de Barceloneta y Arecibo (particularmente en Islote) tiene dunas de aproximadamente metro y medio de alto o más. En Hatillo, las dunas son pocas pero evidentes en algunas áreas del Balneario La Sardinera. Las dunas de Camuy son altas y anchas en la Finca Nolla entre la desembocadura del Río Camuy y Peñón Brusi (Figura 3), en otras áreas se han deteriorado y están en restauración con el compromiso de Vida Marina, Centro de Restauración Ecológica y Conservación Costera de la Universidad de Puerto Rico en Aguadilla dirigido por el Dr. Robert Mayer en conjunto con el DRNA y el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de Estados Unidos. Las dunas de Isabela están muy deterioradas, pero aún existen también con la ayuda de Vida Marina. En un área muy limitada de Aguadilla, adyacente a Isabela justo al oeste de la Quebrada de los Cedros, se observan algunas dunas pequeñas. También en Aguadilla hay un área pequeña de dunas en la playa de Punta Borinquén también conocida como las Ruinas. Las dunas más impresionantes por su altura y/o ancho se pueden observar en Arecibo, Camuy (Figura 3), Manatí, Isabela y Loíza.

En los viajes de campo también se observó que algunos municipios cuentan con oleaje energético pero las playas son naturalmente estrechas y/o la arena de grano muy grueso como para que el viento la pueda transportar. Éste es el caso de Vega Alta y Vega Baja. Otras playas han sido estrechadas por la presencia de casas y hoteles y/o son de difícil acceso (p. ej. Río Grande, Dorado). Algunas playas en Puerto Rico cumplen con todos los criterios de formación pero no tienen dunas. Esto ocurre particularmente en playas urbanas y turísticas (p. ej. San Juan) limpiadas diaria y mecánicamente.

Las dunas de Puerto Rico son de variedad de tamaños, alturas y formas en lugares rurales o urbanos adyacentes a edificios, permanentes o intermitentes, desnudas y móviles, o densamente colonizadas por vegetación y estables. Algunas son observables sólo en ciertos periodos del año respondiendo a los cambios en la energía del oleaje y a los ciclos de erosión y deposición que provocan ensanchamiento o estrechamiento de las playas. Las dunas más fáciles de identificar son aquéllas de gran tamaño y con evidencia de transporte de arena en pequeñas ondulaciones que forma el viento en la arena según la transporta (Figura 5, 6 y 7).

Protección, restauración y manejo

El manejo de dunas debe integrar la protección y la restauración. Protección es el mecanismo utilizado cuando se reconoce la importancia de las dunas costeras ya formadas. Si este reconocimiento ocurre una vez las dunas están deterioradas o se han removido, la restauración es la alternativa que permite facilitar su formación.

Las restauración de dunas es uno de los métodos preferidos para mitigar la erosión costera y se utiliza como una opción usualmente económica y eco-amigable (Gómez-Pina *et al.* 2002, Vittal-Hedge 2010). Particularmente en áreas intensamente construidas, la restauración de dunas tiene más potencial del que se reconoce (Nordstrom 2000). Esta restauración debe facilitar la formación de la duna a través de su proceso eólico natural y promover la reintroducción de especies pioneras (Martínez *et al.* 2006). Una vez iniciado el proceso de restauración es esencial proteger las dunas y los mecanismos utilizados para facilitar su formación.

En América del Norte, Europa y, recientemente, en Puerto Rico, se utilizan verjas para acelerar la formación de dunas. Las verjas más utilizadas en Estados Unidos tienen una altura de 1.2m y están hechas de tablas verticales de madera de 35mm de ancho unidas por alambre y con 50% de porosidad (Grafals-Soto y Nordstrom 2009). En Puerto Rico, se han utilizado verjas de bambú seco y paletas de madera para acelerar la formación de dunas en lugares donde fueron minadas, deterioradas y/o reemplazadas por la presencia de infraestructura como carreteras (p. ej. Loíza, Isabela y Camuy). Considerando los usos humanos de las dunas, una vez restauradas, el valor del espacio que ocupan será mayor que el valor percibido del mismo espacio previo a la restauración (Nordstrom 2000).

El manejo de dunas debe visualizarse en un contexto que integre aspectos físicos, económicos y sociales de los sistemas costeros (UN 1998) incorporando la individualidad de las características de las playas (Cammers 2009). Las estrategias de manejo de dunas deben incluir la variabilidad en vulnerabilidad y dinámicas costeras de cada área a restaurar para lograr políticas y prioridades específicas en términos geográficos considerando la resiliencia de cada lugar (Martínez *et al.* 2006). Reconociendo que Puerto Rico está en un momento crítico en el que las acciones de hoy trazarán el futuro del país como destino turístico (Hernández-Delgado *et al.* 2012), esta integración es más que importante. Más aún, Zapino (2005) sugiere motivar y apoyar a las comunidades locales a mejorar sus espacios costeros a través de la coordinación de grupos de acción y otros incentivos.

Conclusión

Las playas y las dunas son sistemas diferentes pero integrados. Las dunas protegen la vida y la propiedad contra las inundaciones costeras, y proporcionan hábitat y diversidad topográfica proveyendo resiliencia ante la erosión y los efectos del cambio climático. Sin embargo, existe variedad de procesos humanos que destruyen y/o dificultan la formación de dunas.

Como resultado principalmente de procesos humanos, en Puerto Rico hay menos arena en la costa y menos dunas que en el pasado lo que ha aumentado la vulnerabilidad de las costas arenosas. Sin embargo, aún quedan dunas en más lugares de los reconocidos por las autoridades (véase DRNA 2007), y las que se han deteriorado podrían restaurarse considerando sus beneficios especialmente en regiones como el Caribe donde la costa es esencial.

La mayoría de los municipios de la costa norte de Puerto Rico tienen dunas pero necesitan protección y, en algunos casos, restauración. La protección y restauración de dunas es esencial para educar sobre la importancia de estos sistemas, acelerar su proceso de formación y recuperar, al menos parcialmente, las dunas deterioradas por actividades humanas que han causado daños permanentes. El manejo costero debe considerar la protección y restauración de sistemas de dunas y priorizar la integración de sus procesos físicos con los aspectos socio-económicos que caracterizan la costa. El reconocer la importancia del dinamismo del sistema permitirá conservar su valor humano a largo plazo a la luz de la sustentabilidad de sus procesos geomórficos y permanencia de sus usos humanos.

Recomendaciones

Es recomendable comparar las dunas de Puerto Rico con dunas en otras islas caribeñas para establecer descripciones específicas de esta región del mundo que faciliten el desarrollo de estrategias de manejo considerando las características y necesidades geográficas, físicas y humanas de esta región. El enfoque en estudios regionales caribeños podría facilitar el análisis de la efectividad de diversos métodos de manejo de dunas utilizados en el Caribe que podrían ayudar a optimizar y hacer consistente la restauración y protección.

Se recomienda describir y analizar las características geomórficas, vegetativas y humanas de las dunas de Puerto Rico con énfasis en su localización y vulnerabilidad para entender su funcionamiento y justificar el desarrollo e implementación de guías de manejo sostenible considerando la sustentabilidad del sistema de dunas y su interdependencia con la

playa. Este análisis debe incluir el estudio de la remoción de dunas de zonas urbanas/turísticas, el estudio de los efectos de la minería de arena y de las represas en la erosión de playas, y el estudio de la efectividad de las paletas y las verjas de bambú en Puerto Rico. Se recomienda por último la creación de programas y recursos educativos que incluyan las experiencias de las comunidades costeras que viven las dinámicas constantes de la costa. Estos recursos se utilizarían para comunicar los beneficios geográficos, socio-económicos y ambientales de los sistemas de playa-duna.

Agradecimientos

Gracias a todos los voluntarios que trabajaron o ayudaron en la recopilación de datos en las visitas a las dunas y en otras tareas relacionadas, incluyendo a: Nicole Virella, Aníbal Soto Cardalda, Edwin D. Grafals Lugo, Nemesio Soto García, Luis Villanueva, Eddie Olmeda, Abimarie Otaño, Alfredo Montañez, Osvaldo de Jesús, Génesis Rivera Carrasquillo y Sheila Rodríguez. Las visitas al campo para identificar y fotografiar las dunas en Puerto Rico fueron auspiciadas por el Programa Sea Grant Puerto Rico de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez y el Fondo de Investigación para el Desarrollo Institucional de la Universidad de Puerto Rico en Cayey.

Referencias

- Álvarez-Molina, Lucero, María Luisa Martínez, Octavio Pérez-Maqueo, Juan B. Gallego-Fernández y P. Flores. 2012. "Richness, Diversity, and Rate of Primary Succession over 20 Years in Tropical Coastal Dunes." *Plant Ecology* 213(10):1597-1608.
- Ayala, Héctor. 2004. "Actualidad y perspectivas del turismo en el Caribe Insular". *Revista Retos Turísticos* 3(1):1-12.
- Awosika, Lawrence Folajimi, A. Chidi Ibe y C.E. Ibe. 1993. "Anthropogenic Activities Affecting Sediment Load Balance Along the West African Coastline." Pp. 26-39 en *Coastlines in Western Africa*. New York: American Society of Civil Engineers.
- Barbier, Edward B., Sally D. Hacker, Chris Kennedy, Evamaria Koch, Adrian Sier y Brian Silliman. 2011. "The Value of Estuarine and Coastal Ecosystem Services." *Ecological Monographs* 81(2):169-193.
- Barreto, Maritza. 1997. "Shoreline Changes in Puerto Rico (1936-1993)." Tesis doctoral, Departamento de Ciencias Marinas, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez.
- Bernal, Gladys., Ligia Estela Urrego, Ángela M. Gómez-García, Sara Betancur y Andrés F. Osorio. 2014. "Evolución geomorfológica y vegetación costera

- de playa Palmeras, Parque Nacional Natural Isla Gorgona, Pacífico Colombiano". *Latin American Journal of Aquatic Research* 42(3):622-638.
- Bolaky, Bineswaree. 2011. "La competitividad del turismo en el Caribe". *Revista Cepal* 104:55-79.
- Brown, Alexander Claude y Anton McLachlan. 2002. "Sandy Shore Ecosystems and the Threats Facing Them: Some Predictions for the Year 2025." *Environmental Conservation* 29(1):62-77.
- Cambers, Gillian. 2009. "Caribbean Beach Changes and Climate Change Adaptation." *Aquatic Ecosystem Health and Management* 12(2):168-176.
- Carboni, Marta, María Laura Carranza y Alicia Acosta. 2008. "Assessing Conservation Status on Coastal Dunes: A Multiscale Approach." *Landscape and Urban Planning* 91:17-25.
- Carter, Lynne y Beth Raps. 2008. "Adapting to Climate Change: It is Just Better Planning." *Basins and Coasts* 2(1):29-31.
- Castillo, Silvia y Patricia Moreno-Casasola. 1998. "Análisis de la flora de dunas costeras del litoral Atlántico de México". *Acta Botánica Mexicana* 45:55-80.
- Centro de Restauración y Conservación Costera de la Universidad de Puerto Rico <<https://es-la.facebook.com/vida.aguadilla/>>.
- Colón Dávila, Javier. 2016. "Acusan a cuatro por extracción ilegal de arena en dunas de Isabela". *El Nuevo Día*, 16 de marzo. Accedido el 7 de octubre de 2016 <<http://www.elnuevodia.com/noticias/tribunales/nota/acusanacuatro-porextraccionilegaldearenaendunasdeisabela-2175079/>>>.
- Daniel, Edsel y Mark D. Abkowitz. 2003. "Development of Beach Analysis Tools for Caribbean Small Islands." *Coastal Management* 31(3):255-275.
- . 2005a. "Improving the Design and Implementation of Beach Setbacks in Caribbean Small Islands." *URISA Journal* 17(1):53-65.
- . 2005b. "Predicting Storm-induced Beach Erosion in Caribbean Small Islands." *Coastal Management* 33:53-69.
- Dasgupta, Sumita, Benoit Laplante, Craig Meisner, David Wheeler y Jianping Yan. 2009. "The Impact of Sea Level Rise on Developing Countries: A Comparative Analysis." *Climatic Change* 93(3-4):379-388.
- Davies, Paul, Allan Williams y Richard Curr. 1995. "Decision Making in Dune Management: Theory and Practice." *Journal of Coastal Conservation* 1:87-96.
- Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA). 2007. *Dunas de Puerto Rico. Hojas de Nuestro Ambiente*. San Juan, PR: Estado Libre Asociado de Puerto Rico, Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. Recuperado de (<http://drna.pr.gov/wp-content/uploads/2015/04/Dunas-de-Puerto-Rico.pdf>).
- Eastwood, David y William Carter. 1981. "The Irish Dune Consumer." *Journal of Leisure Research* 13:273-281.
- Eskuche, Ulrich. 1992. "La vegetación de las dunas marítimas de América Latina". *Bosque* 13(1): 23-28.

- Google Earth. 2016. "Playa del Hotel Ritz Carlton y el Balneario de Carolina". Google Earth. 18°26'54.03" 66°01'37.78". 9 de septiembre 2015. Recuperado el 25 de octubre de 2016.
- Gómez-Pina, Gregorio, Juan Muñoz-Pérez, José Ramírez y Carlos Ley. 2002. "Sandy Dune Management Problems and Techniques, Spain." *Journal of Coastal Research* 36:325-332.
- Grafals-Soto, Rosana y Karl Nordstrom. 2009. "Sand Fences in the Coastal Zone: Intended and Unintended Effects." *Environmental Management* 44(3):420-429.
- Guara Requena, Miguel. 1989. "La influencia de la distancia al mar en la distribución de la flora de las dunas del Cabo de Gata". *Acta Botánica Malacitana* 14:151-159.
- Hernández-Delgado, Edwin. A., Carlos E. Ramos-Scharrón, Carmen R. Guerrero-Pérez, Mary Ann Lucking, Pablo A. Méndez-Lázaro, Ricardo Laureano y Joel Meléndez-Díaz. 2012. "Long-Term Impacts of Non-Sustainable Tourism and Urban Development in Small Tropical Islands Coastal Habitats in a Changing Climate: Lessons Learned from Puerto Rico." En *Visions for Global Tourism Industry - Creating and Sustaining Competitive Strategies*, editado por Murat Kasimoglu. InTechOpen, DOI: 10.5772/38140. Available from *INTECH Open* <[https://www.intechopen.com/books/visions-for-global-tourism-industry-creating-and-sustaining-competitive-strategies/\(long-term-impacts-of-non-sustainable-tourism-and-urban-development-in-tropical-coastal-habitats-in-a\)](https://www.intechopen.com/books/visions-for-global-tourism-industry-creating-and-sustaining-competitive-strategies/(long-term-impacts-of-non-sustainable-tourism-and-urban-development-in-tropical-coastal-habitats-in-a)>.
- Hesp, Patrick. 2008. "Coastal Dunes in the Tropics and Temperate Regions: Location, Formation, Morphology and Vegetation Processes." Pp. 29-49 en *Ecological Studies 171, Coastal Dunes: Ecology and Conservation*, editado por María Luisa Martínez y Norbert P. Psuty. Berlin: Springer.
- Innocenti, Lucia y Enzo Pranzini. 1993. "Geomorphical Evolution and Sedimentology of the Ombrone River Delta, Italy." *Journal of Coastal Research* 9:481-93.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2012. "Summary for Policymakers." Pp. 1-19 en *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY: Cambridge University Press.
- Junta de Planificación. 2015. Límites Municipales Edición 2015. San Juan, PR: Estado Libre Asociado de Puerto Rico. Recuperados de: <<http://www2.pr.gov/agencias/gis/Pages/default.aspx>>.
- Li, Bing, Feng Cai, Lihua Cao, Jianhui Liu y Gang Lei. 2009. "Causes of Beach Erosion in Fujian and Prevention." *Journal of Oceanography in Taiwan Strait* 28(2):156-162.
- Liu, Jianhui., Feng Cai, Hongshuai Qi, Gang Lei y Lihua Cao. 2011. "Coastal Erosion along the West Coast of the Taiwan Strait and Its Influencing Factors." *Journal of Ocean University of China* 10(1):23-34.

- López Marrero, Tania y Orialis Acevedo Muñiz. 2016. *Dinámicas poblacionales en los municipios costeros de Puerto Rico: 1980-2015*. Centro Interdisciplinario de Estudios del Litoral. Mayagüez, PR: Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez. 78 pp.
- Martínez, María Luisa, Juan Gallego-Fernández, José García-Franco, Coral Moctezuma y Claudia Jiménez, Claudia. 2006. "Assessment of Coastal Dune Vulnerability to Natural and Anthropogenic Disturbances along the Gulf of Mexico." *Environmental Conservation* 33(2):109-117.
- Martínez, María Luisa, Anwar M. Maun y Norbert Psuty. 2004. "The Fragility and Conservation of the World's Coastal Dunes: Geomorphological, Ecological and Socioeconomic Perspectives." Pp. 355-369 en *Ecological Studies 171, Coastal Dunes: Ecology and Conservation*, editado por María Luisa Martínez y Norbert P. Psuty. Berlin: Springer.
- Martínez, María Luisa, G. Vázquez y S. Sánchez Colón. 2001. "Spatial and Temporal Variability during Primary Succession on Tropical Coastal Sand Dunes." *Journal of Vegetation Science* 12(3):361-372.
- Maun, Anwar. 2009. *The Biology of Coastal Sand Dunes*. London: Oxford University Press.
- McLachlan, Anton. 1990. "The Exchange of Materials between Dune and Beach Systems." Pp. 201-215 en *Coastal Dunes: Form and Process*, editado por Karl Nordstrom, Norbert P. Psuty y William Carter. New York: John Wiley and Sons.
- McLachlan, Anton y Alexander Brown. 2006. *Ecology of Sandy Shores*. London: Academic Press.
- Mercado, Aurelio. 2017. "Puerto Rico se afectará". *El Nuevo Día*, 8 de junio. p. 51.
- Moreno-Casasola, Patricia. 2006. *Entornos veracruzanos: La costa de La Mancha*. Veracruz, México: Instituto de Ecología. A.C., Xalapa, Veracruz, México.
- . 2004. "A Case Study of Conservation and Management of Tropical Sand Dune Systems: La Mancha-El Llano." Pp. 319-333 en *Ecological Studies 171, Coastal Dunes: Ecology and Conservation*, editado por María Luisa Martínez y Norbert P. Psuty. Berlin: Springer.
- Moreno-Casasola, Patricia e Ileana Espejel. 1986. "Classification and Ordination of Coastal Sand Dune Vegetation along the Gulf and Caribbean Sea of Mexico." *Vegetatio* 66(3):147-182.
- Morton, J.K. 1957. "Sand-dune Formation on a Tropical Shore." *The Journal of Ecology*. 495-497.
- Nordstrom, Karl. 2000. *Beaches and Dunes of Developed Coasts*. Massachusetts: Cambridge University Press.
- Nordstrom, Karl, Reinhard Lampe y Lisa Vandemark. 2000. "Reestablishing Naturally Functioning Dunes on Developed Coasts." *Environmental Management* 25(1):37-51.
- Nordstrom, Karl y Wendy Mitteager. 2001. "Perceptions of the Value of Natural

- and Restored Beach and Dune Characteristics by High School Students in New Jersey, USA.” *Ocean & Coastal Management* 44(7):545-559.
- Pintó, Joseph, Carolina Martí y Rosa Fraguell. 2014. “Assessing Current Conditions of Coastal Dune Systems of Coastal Dune Systems of Mediterranean Developed Shores.” *Journal of Coastal Research* 30(4):832-842.
- Psuty, Norbert. 2004. “The Coastal Fore-dune: A Morphological Basis for Regional Coastal Dune Development.” Pp. 11-27 en *Ecological Studies 171, Coastal Dunes: Ecology and Conservation*, editado por María Luisa Martínez y Norbert P. Psuty. Berlin: Springer.
- Pye, K. 1983. “Dune Formation on the Humid Tropical Sector of the North Queensland Coast, Australia.” *Earth Surface Processes and Landforms* 8(4):371-381.
- Rodríguez-Ramírez, A. y M.C. Reyes-Nivia. 2008. “Evaluación rápida de los efectos del huracán beta en la Isla Providencia (Caribe colombiano).” *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR* 37(1):215-222.
- Servera, Jaime, Bernadi Gelabert y Antonio Rodríguez-Perea. 2009. “Development and Setting of the Alcudia Bay Beach-dune System (Mallorca, Spain).” *Geomorphology* 110(3):172-181.
- Torres, Wendy, Martha Méndez, Alfredo Dorantes y Rafael Durán. 2010. “Estructura, composición y diversidad del matorral de duna costera en el litoral yucateco”. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 86:37-51.
- United Nations (UN) Environment Programme: Caribbean Environment Programme. 1998. “Manual for Sand Dune Management in the Wider Caribbean.” Pp. 1-66.
- van der Maarel, Eddy, Silvia Castillo, M.L. Huesca e Irene Pisanty. 1982. “Ecología de la vegetación de dunas costeras: estructura y composición en el Morro de la Mancha, Veracruz”. *Biótica* 7:491-526.
- Vittal Hedge, Arkal. 2010. “Coastal Erosion and Mitigation Methods – Global State of Art.” *Indian Journal of Geo-Marine Sciences* 39(4):521-530.
- Wong, Poh Poh. 1990. “Geomorphological Basis of Beach Resort Sites: Some Malaysian Examples.” *Ocean and Shoreline Management* 13:127-147.
- Zappino, Vincenzo. 2005. “Caribbean Tourism and Development: An Overview.” *European Centre for Development Policy Management Discussion Paper* 65:1-38.

