
LA MORFOLOGÍA COSTERA POSTHURACÁN COMO INDICADOR DE LA INTENSIDAD DE LA AMENAZA POR HURACANES

GERARDO PALACIO-APONTE

RESUMEN

La amenaza originada por huracanes de alta intensidad promueve el diseño de metodologías preventivas para evaluar, espacialmente, el conjunto de las condiciones naturales que inhiben o magnifican cambios y efectos adversos en los paisajes naturales y antrópicos. Conocer su comportamiento y efectos, a partir de referencias de fenómenos similares ocurridos en el pasado, permite establecer los probables escenarios de cambios o daños extremos que pudieran ocurrir en el futuro. Para este estudio se utilizó la morfología costera post-huracán en costas acumulativo-arenosas, como geoindicador directo de los efectos modificadores de los huracanes y su relación con la intensidad del fenómeno. Se siguieron dos etapas según la ocurrencia del huracán típico de referencia: prehuracán, analizando datos territoriales de la condición morfológica y ambiental previa; y posthuracán, identi-

ficando respuestas geomorfológicas para ámbitos territoriales de homogeneidad relativa. Para ambas etapas se utilizaron referentes cartográficos analógicos y digitales producto de la transformación de imágenes obtenidas por videografía para registros inmediatos justo después de la ocurrencia del fenómeno. En estos ambientes el potencial destructivo de los huracanes se infiere a través de evidencias morfo-sedimentarias. Se distinguieron dos patrones de zonificación de impactos: proximal frontal y proximal asociado, que incluyen el conjunto de rasgos morfológicos más significativos. La expresión de susceptibilidad territorial para el huracán Roxana se presentó en 12 sectores con distintas expresiones de intensidad, la que dependió de la altura relativa del terreno, la predisposición dinámica de las geoformas, la ubicación de los ambientes en el perfil transversal de afectación y la fijación biogénica.

En un periodo de 140 años, 21 huracanes han abarcado en su trayectoria el Estado de Campeche, México (NOAA, 2003). Aunque para las frecuencias regionales son pocas las repeticiones y las intensidades son bajas, cuando ocurren ocasionan cambios y daños extraordinarios, tanto en la estructura y el funcionamiento de los paisajes naturales costeros, como en la infraestructura. El huracán más significativo, en términos de modificación a la zona costera de Campeche, ha sido el Roxana (octubre 1995), que por momentos alcanzó la categoría 3 en la escala Saffir/Simpson (vientos entre 178 y 209km/h). Ocasionó cambios tan notorios en la morfología costera (erosión y acreciones extraordinarias) que después

de su ocurrencia, la línea de costa quedó totalmente transformada.

La situación excepcional de amenaza originada por huracanes de alta intensidad, promueve el diseño de metodologías preventivas, para evaluar espacialmente el conjunto de las condiciones naturales que inhiben o magnifican cambios y efectos adversos en los paisajes naturales y antrópicos. Conocer su comportamiento y efectos destructivos, a partir de la referencia de fenómenos similares ocurridos en el pasado, permite establecer los probables escenarios de cambios o daños extremos que pudieran ocurrir en el futuro.

En este trabajo se destaca la importancia de la morfología costera posthuracán en costas acumulativo-areno-

sas, como geoindicador directo de los efectos destructivos o modificadores de los huracanes y su relación con la intensidad del fenómeno. Cada rasgo geomorfológico erosivo, acumulativo, transitorio o permanente, es evidencia puntual de la intensidad del fenómeno y de las condiciones naturales del terreno que predisponen la capacidad del paisaje costero para amortiguar o magnificar la incidencia de un huracán.

En este primer acercamiento a la construcción del escenario de susceptibilidad del terreno costero ante la ocurrencia de huracanes en el Estado de Campeche, se tipifica la expresión morfológica del relieve posthuracán y la ubicación relativa de los ambientes costeros, como indicadores de la intensidad registrada por

PALABRAS CLAVE / Amenaza Natural / Costas / Huracanes / Morfología Costera / Videografía /

Recibido: 12/05/2009. Modificado: 20/04/2010. Aceptado: 22/04/2010.

Gerardo Palacio-Aponte. Doctorado en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Investigador, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, (UASLP) Dirección: Coordinación de Ciencias Sociales y Humanidades, UASLP, Humanidades, USALP. Av. Industrias, 101-A, Fracc. Talleres. San Luis Potosí, SLP. 78494, México. e-mail: gpalaci-omx@gmail.com

eventos hidrometeorológicos extremos. Se aplican criterios de caracterización geomorfológica propuestos por expertos como, Pilkey y Davis (1987), Benavente *et al.* (2002) y Morton (2002). Los criterios ordenados y ponderados bajo la perspectiva del sistema experto (provee información relevante de especialistas en el área de las amenazas naturales), permite tipificar y ponderar respuestas geomorfológicas posthuracán en su relación con la intensidad del huracán por unidad del terreno en ambientes costeros-acumulativos.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El área de estudio se encuentra sobre las playas bajas arenosas y planicies de cordones litorales del suroeste de Campeche (Figura 1). El campamento tortuguero Chen Kan y la población de Isla Aguada, son las referencias geográficas extremas norte y sur respectivamente. Este sector de la costa corresponde a una de las zonas más afectadas por el huracán Roxana, alrededor de los 19°00'N y los 91°30'O.

Dentro de esta área se seleccionó una franja longitudinal a la costa denominada "Sabancuy" con una amplitud de 250m de ancho y una longitud de 39,6km, que corresponden a la zona inmediata a la línea de costa dañada por los efectos directos y asociados del huracán Roxana en 1995. La geodinámica costera es naturalmente inestable por los ritmos alternantes de sedimentación y erosión; sin embargo, la presencia de parches de manglar rojo y negro (*Rhizophora mangle* y *Avicennia germinans*) y otros tipos de vegetación costera rastrera (*Ipomoea pes-caprae* y *Croton punctatus*) y la morfología costera preexistente, permiten diferenciar zonas con tendencias a la estabilidad o la inestabilidad del sustrato litoral.

El huracán Roxana presentó una trayectoria errática para las rutas promedio regionales de los huracanes en los últimos 50 años. Cruzó desde el Mar Caribe por el centro de la Península de Yucatán hasta la plataforma continental frente a la ciudad de Campeche. En un principio se alejó de la ciudad, para luego devolverse y finalmente alejarse (Figura 1). Producto de esta variabilidad se observaron dos máximos y un mínimo en la marea de tormenta. Los máximos de 0,5 y 1,2m, y el mínimo de -0,25m. Por momentos, los máximos de marea de tormenta

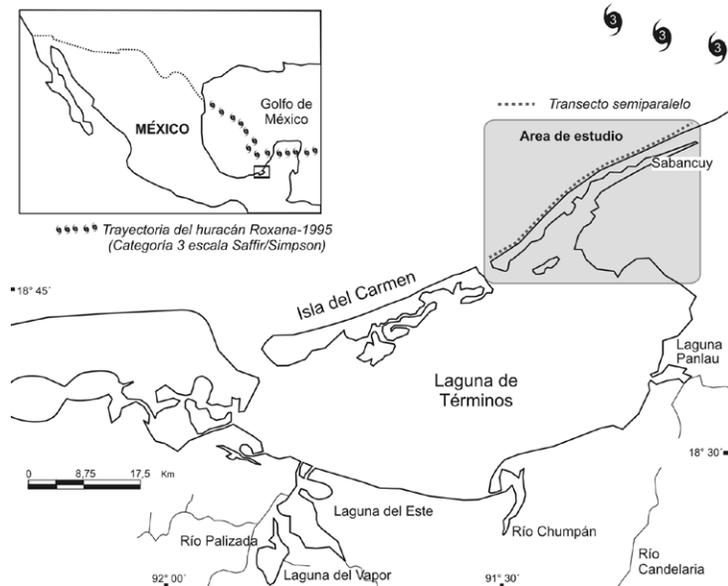


Figura 1. Área de estudio.

coincidieron con el régimen mareal de 28 días, donde se registran niveles de hasta 0,9m (Kjerfve *et al.*, 1988), incrementando, por tanto, la altura promedio del nivel del mar y la presión hidráulica oceánica hacia los cuerpos de agua interiores, sobre todo en frentes de avance restringido como bocas y canales. Para ambientes micromareales (<0,50cm) y playas disipativas como las que dominan en el área de estudio, más de 0,50cm de elevación del mar resultan significativos en términos de invasión de la hidrodinámica costera sobre las playas en su sector seco y sobre la duna costera. El oleaje extremo alcanzó entre 8 y 10m de altura mar adentro, disipándose en la costa según el perfil de playa sumergido.

Recopilación y análisis de datos

La metodología comprende dos etapas, la recopilación y análisis de datos de las condiciones territoriales prehuracán y la interpretación de cambios y/o efectos ambientales posthuracán, organiza-

dos según criterios y variables geomorfológicamente significativas. La etapa prehuracán incluye la caracterización de la cobertura mediante ortofotos escala 1:20000 y una imagen de satélite de alta resolución Spot y su transformación orientada *Tasseled Cap*, para diferenciar rasgos hidrogeomorfológicos preexistentes. Sobre el área de estudio en particular existe el referente geomorfológico para ambientes similares en la Isla del Carmen, donde Palacio *et al.* (1999) registraron a lo largo de 40km acreción y retroceso costero, identificando además cambios geomorfológicos tierra adentro entre 80 y 300m. Las tendencias acumulativas y erosivas asociadas a la sucesión de eventos meteorológicos

ordinarios y extremos, fue registrada también por Palacio-Aponte (2001), detectando tres zonas clave donde los cambios morfológicos entre 1974 y 1998 son más evidentes, punta Zacatal, playa Norte en Isla del Carmen e Isla Aguada.

Por otra parte, la etapa posthuracán considera la identificación inmediata de rasgos geomorfológicos resultado de un fenómeno hidrometeorológico significativo, como lo fue el huracán Roxana. La detección sistemática de los cambios morfológicos y su extensión se realizó a través de un transecto semiparalelo a la costa obtenido mediante imágenes aéreas de video (Figuras 1 y 2). Las imágenes aéreas se obtuvieron mediante un equipo de dos cámaras de formato 8mm montadas en un helicóptero, con un geoposicionador sincronizado mediante una interfase vía computadora portátil. Para alcanzar la resolución espacial esperada (20cm por pixel) se mantuvo una altitud nominal de vuelo de 110m a velocidad promedio terrestre de 90km/h, en correspondencia con lo pro-

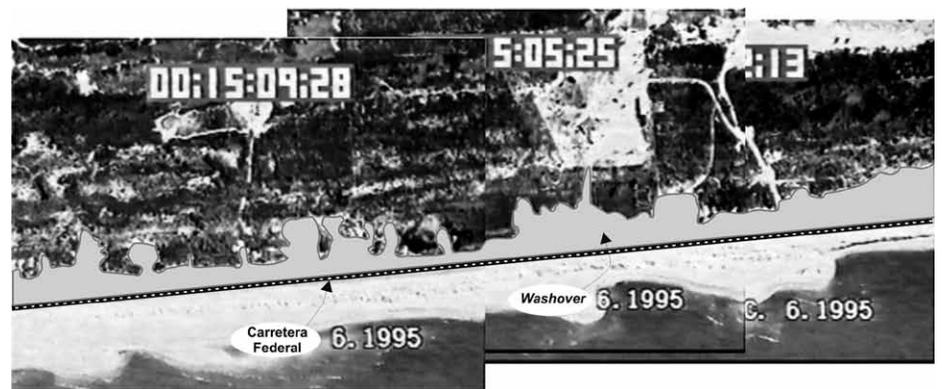
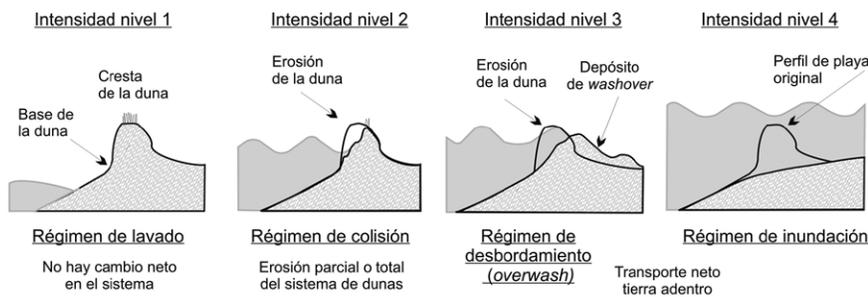


Figura 2. Mosaico de tomas instantáneas obtenidas por videografía mostrando el efecto de washover sobre un sector entre Sabancuy e Isla Aguada, Campeche.



Clasificación de las respuestas morfológicas inducidas por regímenes de tormenta extremos			
	Emplazamiento geomorfológico		
	Tierra firme de planicies formadas por cordones litorales y dunas	Isla barrera	
		Nivel del mar \geq Nivel de la laguna o estero	Nivel del mar $<$ Nivel de la laguna o estero
Nivel del mar $<$ duna, o sin duna, escalón de berma	Erosión (y acreción súbita puntual por migración de la berma) confinada a la playa Intensidad nivel 1	Erosión frontal sobre la duna Intensidad nivel 2	Sobrelavado y flujo bidireccional laguna-oceano a través de canales. Intensidad nivel 4
Nivel del mar \geq duna o, escalón de berma	Terraza de washover Intensidad nivel 3	Abanicos de washover hacia pantanos interiores en estratos laminares Intensidad nivel 3 Incisión de canales (<i>ebb channels</i>) Intensidad nivel 4	-----

Figura 3. Relación entre la intensidad de los huracanes y la respuesta morfológica. Modificado de Sallenger (2000) y Morton (2002).

puesto por Doyle *et al.* (2009). La obtención de datos por este método tienen ventajas tales como la resolución espacial a detalle y la disposición inmediata y oportuna para el intérprete (Palacio y López, 1994; Everitt y Escobar, 1995). Posteriormente, mediante un programa multimedia, las imágenes son digitalizadas y cortadas en segmentos de 2seg para detectar por medio de instantáneas, sectores de la costa con rasgos geomorfológicos significativos. A cada toma representativa de los cambios en la morfología costera, se le aplica un filtro direccional para destacar los bordes e identificar con claridad los cambios morfológicos. En la Figura 2 se observa, por ejemplo, el efecto de *washover* o sobre sedimentación súbita (hasta 1,80m de espesor) tierra adentro, generada por el oleaje de tormenta del huracán Roxana.

Una vez identificados sistemáticamente los rasgos geomorfológicos distintivos, se le asocian patrones de intensidad condicionados por la hidrodinámica costera cuando ocurren huracanes y se valida su relación con la condiciones medioambientales circundantes, como la distancia a cuerpos de agua cercanos, fijación biogénica (capacidad del sistema radicular de la vegetación y los microorganismos para fijar el sustrato), distancia al sistema de cordones antiguos elevados y/o bocas naturales y artificiales. Las variables y su

área de influencia asociada tienen como contexto espacial las unidades del terreno (*land units*) o unidades de mapeo homogéneo, concebidas como una porción del territorio con un conjunto de condiciones fisiográficas y funcionales comunes que se diferencian de unidades adyacentes mediante fronteras definidas (Hansen *et al.*, 1995). A partir de este concepto se desarrolla un mapa que refleja la susceptibilidad del terreno a partir de criterios físico-geográficos significativos.

Para el análisis y ponderación de las variables, se utilizó el sistema experto. Este se basa en estudios realizados por especialistas sobre los efectos destructivos de los huracanes en ambientes costeros acumulativos y biogénicos similares y detecta principios de análisis repetibles para el área de estudio. Se utiliza como referencia principal, la clasificación de respuestas geomorfológicas en costas arenosas ante la ocurrencia de tormentas propuestas por Sallenger (2000) y Morton (2002), quienes establecieron cuatro niveles de impacto o intensidad según, el régimen geodinámico durante la ocurrencia de un huracán (Figura 3). En esta clasificación los procesos geomorfológicos erosivo-acumulativos son condicionados principalmente por gradientes hidráulicos diferenciales entre ambientes costa afuera y los humedales o cuerpos de agua costa adentro. De

manera que las diferencias en la altura relativa del agua, condicionada por la marea de tormenta, es el factor detonante de todos los procesos físicos y amenazas originadas por huracanes en la zona litoral. En el nivel 1 (moderado), se presenta el lavado de la pendiente de playa en su sector seco por ascenso del nivel del mar; sin embargo, el oleaje no erosiona aún la base de la duna. Para el nivel 2, se inicia la erosión sobre la base de la duna y en ese nivel, se contienen los volúmenes de agua. Al incrementarse la intensidad del huracán se llega al nivel 3, o de régimen de *overwash*, donde se modifica drásticamente la morfología costera, destruyendo o trasladando la duna y originando canales de tormenta (*ebb channels*) y depósitos de *washover* en distintas modalidades (lengüetas, terrazas, abanicos). El nivel 4 supone la modificación total de la morfología costera al experimentar inundaciones semipermanentes, exhumación de regolita y flujos de agua intensos y perpendiculares a la costa.

Según los criterios expuestos, el potencial destructivo de los huracanes se puede deducir en ambientes acumulativos arenosos a través de evidencias sedimentarias y morfológicas. Las respuestas morfológicas dependerán de la intensidad y duración del huracán y de la elevación relativa del terreno costero en su relación con la marea de tormenta y los cuerpos de agua interconectados o cercanos. El potencial de amenaza asociado a la morfología del terreno posthuracán, permite diferenciar sectores del litoral con diferentes intensidades de modificación. La intensidad muestra el grado de actividad o potencia relativa de un fenómeno.

Las variables propuestas en este trabajo son, en su concepción individual y de conjunto, aplicables para evaluar la susceptibilidad del terreno y la intensidad potencial de los huracanes en costas bajas acumulativas inundables de zonas tropicales. Incluyen dos componentes geomorfológicos costeros, la ubicación relativa de la amenaza en perfil transversal de afectación, y las evidencias sedimentarias y morfológicas del oleaje de tormenta.

Resultados y Discusión

Ubicación relativa de la amenaza en el perfil transversal de afectación y su relación con procesos físicos

La intensidad y magnitud de los huracanes se caracteriza por el conjunto de evidencias o modificaciones registradas por unidad del terreno. A su vez, cada unidad muestra diferentes grados de exposición al fenómeno, según su ubicación relativa o emplazamiento ante la trayectoria preferente, intensidad,

recurrencia y permanencia de cada huracán. De manera que, en un perfil transversal del océano hacia el interior del continente, y a partir del momento en que el huracán toca tierra, se distinguen dos tipos de impacto, proximal frontal y proximal asociado.

En el impacto proximal frontal, las unidades del terreno resienten toda la energía del fenómeno y todos los procesos físicos asociados al huracán, tales como vientos ciclogénicos, oleaje de tormenta, marea de tormenta y reflujo de tormenta, dejando evidencias o daños que permiten identificar los mayores efectos destructivos y grados de amenaza.

Por otra parte, el impacto proximal asociado se refiere al impacto directo atenuado al momento en que el huracán toca tierra. Su potencial energético se reduce y por tanto también sus efectos destructivos o modificadores. A diferencia del impacto proximal frontal, se presentan diferentes modalidades extendidas de daños por vientos e inundaciones y no se muestran efectos físicos directos derivados del oleaje o la marea de tormenta.

El impacto proximal frontal se presenta en las geformas y ambientes expuestos hacia el océano, como bocas, marismas, islas barrera, cordones litorales y playas (Figura 4). Por otra parte, el impacto proximal asociado ocurre en geformas de transición mar-continente con una protección relativa al encuentro frontal con el fenómeno y tiene que ver con los niveles donde solo se presentan inundaciones y vientos. De igual manera, la ubicación relativa de la amenaza es diferenciable en función de la protección por fijación biogénica y la altura relativa del terreno. Bajo condiciones de peligrosidad extrema, diferencias topográficas de 0-60cm marca la diferencia en la extensión de las inundaciones y las transgresiones marinas.

Para los ambientes interiores donde se presenta el impacto proximal asociado, se observaron colonizaciones jóvenes de manglar de entre 6 y 10 años de edad. Estos atenúan la energía del oleaje cuando por inundación se iguala el nivel de agua entre cuerpos de agua interiores y el mar. Obstaculizan el movimiento orbital de las olas dispersando la energía entre raíces y troncos. La atenuación depende de la densidad y altura de los árboles o arbustos, el diámetro de troncos y raíces y la densidad de las copas (Massel *et al.*, 1999). Para los manglares de *A. germinans* se observan franjas de 30m de ancho que en teoría y según lo observado por Othman (1991) en Malasia, podría reducir la energía total de olas con 1m de altura. Al mismo tiempo

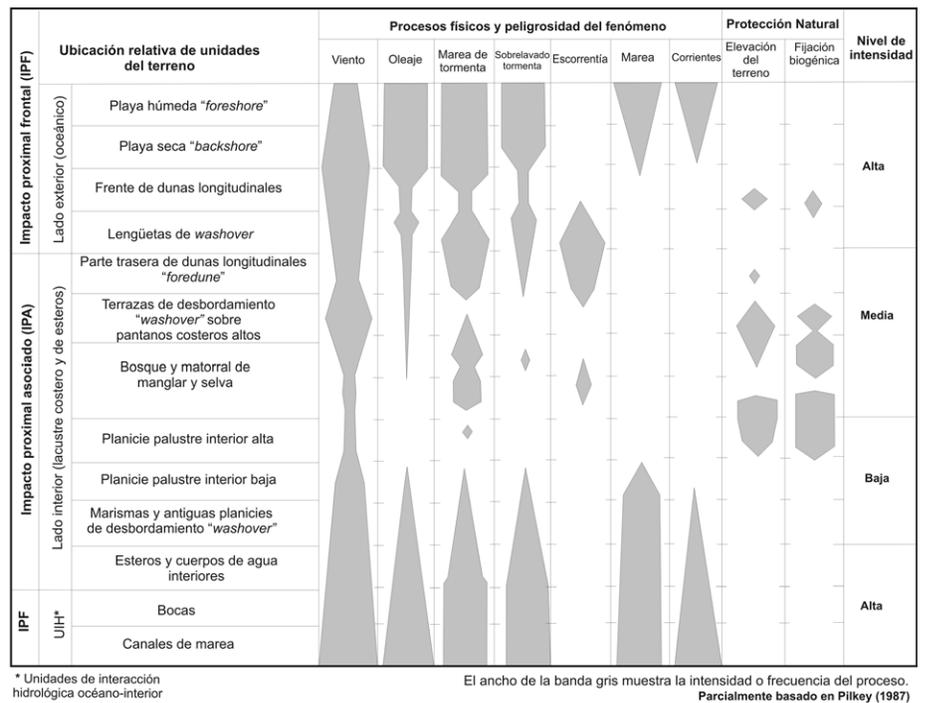


Figura 4. Tipo de impacto por huracanes, procesos físicos asociados y afectación según el sector del ambiente costero.

las presencia de neumatóforos es efectiva en la dispersión de olas <0,15m.

Aunque los impactos específicos sobre el tipo de manglar afectado no son diferenciables a la escala del video, en campo se verificaron daños notorios para parches con árboles >3m de altura y diámetros >5cm. Por el contrario, las zonas con matorral de manglar con diámetros en troncos <5cm cumplieron con la función de estabilizar el sustrato arenoso-arcilloso, debido a su elasticidad y a su menor resistencia aerodinámica. Estos registros corresponden con lo observado por Doyle *et al.* (2009) en los Everglades (Florida, EEUU).

Evidencias morfológicas e intensidad del oleaje y marea de tormenta

Esta clasificación es aplicable a planicies de cordones litorales o barreras arenosas, que mantienen comunicación con cuerpos o canales de agua hacia el interior del continente en zonas tropicales (Tabla I). Sobre las denominadas costas suaves constituidas en mayor parte por material arenoso no consolidado.

La evaluación de la intensidad de la amenaza por huracanes se basa en la correlación entre los rasgos geomorfológicos representativos o de mayor significación posthuracán y los procesos físicos asociados al comportamiento local del huracán Roxana. De manera que los tipos morfológicos generales identificados y caracterizados

se pueden presentar en costas morfogenéticamente similares. Sin embargo, la diferencia radicarán en los patrones de combinación de rasgos geomorfológicos individuales.

Cartografía de indicadores geomorfológicos e intensidad de huracanes

Los huracanes, al igual que todos los fenómenos naturales, tienen una expresión espacial de susceptibilidad que depende de las características intrínsecas de la relación entre el fenómeno y las formas de asimilación del territorio. A nivel espacial, los efectos modificadores de las amenazas naturales son muy variados. Algunos son aislados y localizados; otros son difusos y dispersos (Darío-Cardona, 1993).

La expresión territorial de la susceptibilidad para el Roxana se presentó en unidades del terreno dispuestas en sectores o franjas con distintas expresiones de intensidad y por lo tanto de amenaza. Franjas, porque a partir de la línea de costa el avance de la afectación hacia el continente es perpendicular, y en sectores que dependen principalmente de la predisposición dinámica de las geformas, la fijación biogénica y la ubicación de los ambientes en el perfil transversal de afectación.

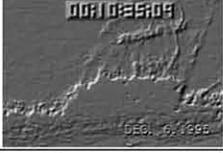
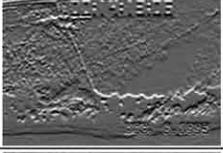
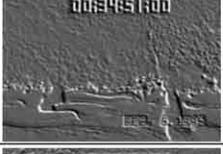
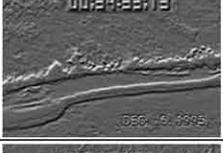
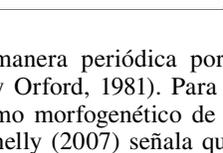
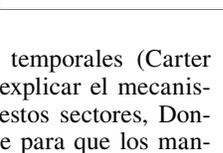
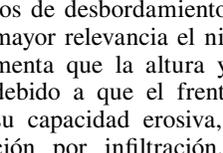
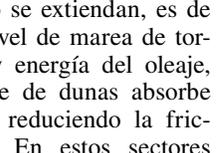
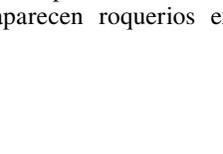
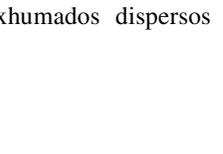
La representación espacial de la zonificación de la intensidad de la amenaza hidrometeorológica para el huracán

Roxana, es resultado del álgebra de mapas en un Sistema de Información Geográfica (ArcGis 9.0) entre las coberturas *raster* de susceptibilidad sobre zonas *buffer* de 250m que siguen el trazo de la línea de costa. Incluyen los ámbitos territoriales de las unidades del terreno señalados en la Figura 2 y su relación con la intensidad del fenómeno. Para fines de representación en una figura, la cartografía fue simplificada de polígonos (*buffers*) a líneas (Figura 5).

En la identificación y caracterización de los sectores costeros según la intensidad de los cambios en la morfología costera, se encontraron los siguientes resultados (Tabla II). Los sectores con intensidad alta se presentan con mayor frecuencia, pero con sumatorias de longitud menores (31,8%). Corresponden con puntas y salientes así como bocas y entrantes pronunciadas y vulnerables, aun ante expresiones fenomenológicas de intensidad baja. La intensidad en la transformación de la morfología original varía de unas playas a otras en función del tipo de perfil inicial y, por tanto, del volumen inicial de arena disponible. Las playas con perfil de partida disipativo, de mayor extensión y con mayor cantidad de arena, presentan una evolución más progresiva y un menor encajamiento del nuevo perfil disipativo. Sin embargo, las playas con perfil inicial reflectivo, más estrechas y con menor disponibilidad de arena, muestran una destrucción rápida e intensa del perfil.

Los sectores determinados con intensidad media son los de mayor cobertura territorial en el área estudio (53%). Son identificables a través de depósitos de desbordamiento (*washover*) en todas sus modalidades morfológicas. Todos sobrepasan las crestas de los cordones de dunas en aquellos puntos donde la altura inicial de las dunas era menor (por causas naturales o antrópicas). Este proceso es habitual en playas con perfiles disipativos afectadas de

TABLA I
TIPOS DE RESPUESTA MORFOLÓGICA ANTE LA OCURRENCIA DE HURACANES

Geoformas	Toma instantánea representativa	Filtro direccional para destacar morfología	Nivel de intensidad
Dunas inestables			Baja
Bermas de tormenta			
Flechas litorales nuevas			
Terrazas y abanicos de desbordamiento (<i>washover</i>)			Media
Terraza			
Abanico lobular			
Bocas (ruptura perpendicular)			Alta
▪ Nueva			
▪ Migración			
Apertura de paleo-bocas y paleo-canales			
Barras emergentes (ruptura longitudinal)			
Roquerios exhumados (basamento expuesto)			

manera periódica por temporales (Carter y Orford, 1981). Para explicar el mecanismo morfogenético de estos sectores, Donnelly (2007) señala que para que los mantos de desbordamiento se extiendan, es de mayor relevancia el nivel de marea de tormenta que la altura y energía del oleaje, debido a que el frente de dunas absorbe su capacidad erosiva, reduciendo la fricción por infiltración. En estos sectores aparecen roquerios exhumados dispersos

en zonas karst geológicamente reciente, con perfiles costeros reflectivos y poca acumulación original de arenas.

Los sectores afectados con intensidad baja (14,8%), corresponden a morfologías erosivas incipientes sobre dunas longitudinales estabilizadas por matorral de manglar y herbáceas rastreras, e interdigitadas con planicies palustres altas, producto de la estabilización litoral de antiguos depósitos de *washover*.

El emplazamiento geomorfológico y condición ambiental de la costa antes de la ocurrencia de un huracán, determinan en gran medida los grados de exposición y tipos de respuesta morfológica. Posteriormente y en sinergia con la ocurrencia del huracán se presenta una alta variabilidad micromorfológica, asociada también a la alta variabilidad del comportamiento hidrometeorológico del huracán. Para ambientes similares al área de estudio, Fearnley *et al.* (2009) encontraron que después de que ocurre un huracán, los cambios morfológicos son extremadamente variables a niveles puntuales, pero en general hay un significativo retroceso de la línea de costa. La recuperación en el largo plazo es poco probable, sobre todo si la recurrencia regional de huracanes es alta. En este mismo sentido, Doyle *et al.* (1995) señalaron que como resultado de los efectos modificadores de los huracanes siempre se presenta una alta fragmentación del paisaje y una serie de efectos residuales de carácter funcional que dejan huellas en las unidades de terreno durante muchos años.

Las evidencias morfológicas no se presentan aisladas ni de manera individual, sino agrupadas al menos en pares y con frecuencia rela-

TABLA II
RELACIÓN DE SECTORES, NIVEL DE AFECTACIÓN Y PORCENTAJES DE LONGITUD

Intensidad	Sectores	Distancia (km)	(%)
Alta	6	12,6	31,8
Media	5	21,1	53,4
Baja	2	5,9	14,8

cionadas a lo largo de un perfil transversal. En función de la intensidad local del fenómeno predomina algún rasgo geomorfológico como resultado de la dominancia relativa en los períodos de atenuación o incremento de la intensidad del huracán.

La ventaja y utilidad observada al elaborar el mapa de las intensidades, radica en la fácil identificación de los niveles de amenaza, a través de variables morfológicas, sobre todo en zonas donde no hay un seguimiento sistemático de los cambios en la morfología costera.

Se pueden tipificar patrones de susceptibilidad y resiliencia probable a través de la relación frecuencia de geoformas-intensidad. Asimismo, se puede obtener un monitoreo rápido de los grados de modificación de la costa y elaborar un diagnóstico ambiental inicial.

Un inconveniente de esta propuesta es que no tiene el beneficio de un conjunto de referentes morfológicos multitemporales para verificar tendencias o ritmos de acreción o pérdida de terreno costero. El disponer de registros morfológicos sistemáticos interdecadales le daría un valor adicional a la propuesta metodológica en términos prácticos, sobre todo en la definición de tendencias y la construcción de escenarios.

La tipificación de morfologías aplica, en su relación con la intensidad modificadora de los huracanes, para planicies de cordones litorales de reciente formación geológica y preferentemente en costas tropicales con perfiles disipativos.

Conclusiones

La zonificación de amenaza por fenómenos hidrometeorológicos extremos depende de la escala espacio-temporal con que el fenómeno perturbador se analice, de tal manera que el diseño de índices y la aplicación de modelos responde siempre a realidades ambientales específicas y a fenomenologías irrepetibles. Sin embargo, existen tendencias en las formas de asimilación esperables de los componentes del paisaje ante la ocurrencia de fenómenos específicos, a partir de las cuales se

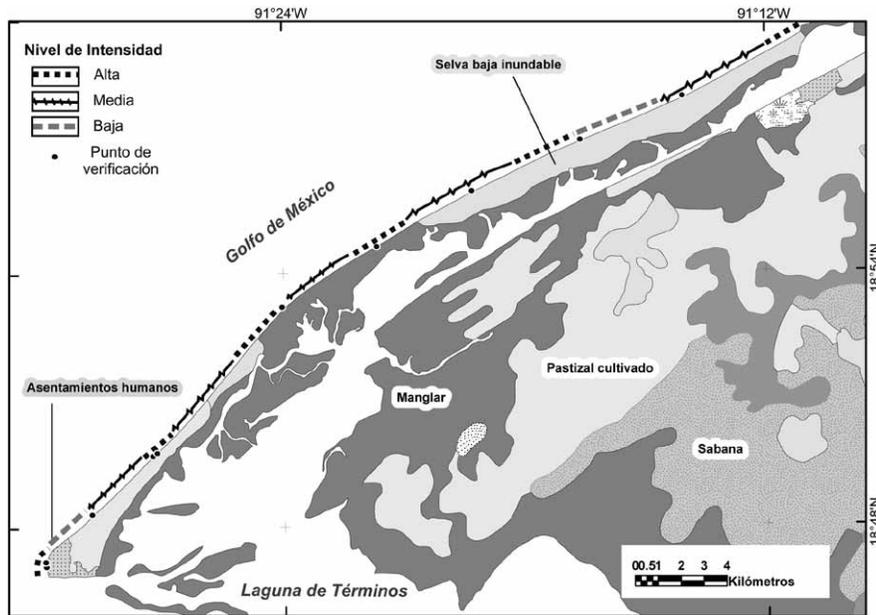


Figura 5. Delimitación de sectores costeros por morfología costera e intensidad asociada a la ocurrencia de huracanes.

puede tipificar la relación entre las evidencias geomorfológicas directas y la intensidad del fenómeno.

Aunque los efectos destructivos del huracán Roxana, y en general de cualquier fenómeno natural, no se expresan en fronteras lineales, sí se pueden delimitar áreas de dominio en función de efectos destructivos observados o esperables sobre la línea de costa. La aplicación de corredores o *buffers* es válida para costas en donde las condiciones geológico-geomorfológicas, de hidrodinámica costera y de fijación biogénica mantienen cierto grado de homogeneidad relativa. Los ambientes morfogenéticamente heterogéneos requerirán variantes o adecuaciones de sitio, en función de la contribución relativa del fenómeno en cuestión y de la resiliencia del paisaje.

Los rasgos geomorfológicos identificables y repetibles se asocian a características morfogenéticas y morfométricas específicas, para un ambiente costero en particular. De manera que los criterios de evaluación de la intensidad reconocibles para un sector costero no son necesariamente repetibles en otro.

La intensidad del fenómeno presenta diferentes dimensiones espaciales. Esto implica diferentes formas de asimilación en el territorio a escala subregional, pero un solo patrón para la intensidad o agresividad del fenómeno a escala local. Es así que la variabilidad meteorológica del fenómeno dentro la escala Saffir/Simpson puede originar patrones morfológicos repetibles de amplia cobertura espacial, pero respuestas morfológicas únicas e irrepetibles a nivel local.

Estas últimas originadas por la altísima variabilidad de las condiciones meteorológicas en el mar cuando ocurren los huracanes y a las formas de asimilación del territorio.

En términos prácticos para los tomadores de decisiones, la intensidad inferida a través de la morfología sintetiza, por una parte, el comportamiento meteorológico local de los huracanes en los ambientes marinos sublitorales y, por otra, el conjunto de respuestas ambientales y resiliencia probable de las unidades del terreno costero.

Se comprobó que el uso de imágenes de video permite generar una

base de datos espaciales de los efectos modificadores y/o destructivos de los fenómenos perturbadores, en tiempo real, con alta resolución espacial y a costos accesibles.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue parte de la tesis de doctorado del autor, quien agradece al grupo de Hidráulica Marítima e Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería, UNAM, por la digitalización del video original, al Centro EPOMEX de la Universidad Autónoma de Campeche, y a Pemex por el vuelo en helicóptero. También se agradece a Liliana Torres Castro y Ramón Zetina por el soporte técnico.

REFERENCIAS

- Benavente J, Del Río L, Anfuso G, Gracia FJ, Reyes JL (2002) Utility of morphodynamic characterization in the prediction of beach damage by storms. *J. Coast. Res.* 36: 56-64.
- Carter RWG, Orford JD (1981) Overwash processes along a gravel beach in South-East Ireland. *Earth Surf. Proc. and Landsc.* 6: 413-426.
- Darío-Cardona O (1993) Manejo ambiental y prevención de desastres: Dos temas asociados. En Maskrey A. (Comp.) *Los Desastres no Son Naturales*. La Red. Colombia. pp. 75-88.
- Donnelly C (2007) Morphologic change by overwash: establishing and evaluating predictors. Proc. 9th Int. Coastal Symposium. *J. Coast. Res.* 50: 520-526.
- Doyle TW, Smith III TJ, Robblee MB (1995) Wind damage effects of Hurricane Andrew on mangrove communities along the

- southwest coast of Florida, EEUU. *J. Coast. Res.* 21: 159-168.
- Doyle TW, Krauss KW, Wells CJ (2009) Landscape analysis and pattern of hurricane impact and circulation on mangrove forests of the Everglades. *Wetlands* 29: 44-53.
- Everitt JH, Escobar DE (1995) Using video imaging technology for remote sensing of natural resources. *VII Simp. Latinoam. Percepción Remota*. Puerto Vallarta, México. pp. 753-773.
- Fearnley SM, Miner MD, Kulp M, Bohling C, Penland S (2009) Hurricane impact and recovery shoreline change analysis of the Chandeleur Islands, Louisiana, EEUU: 1855 to 2005. *Geo-Mar. Lett.* 29: 455-466.
- Hansen A, Franks CAM, Kirk PA, Brimicombe AJ (1995) The application of GIS to landslide hazard assessment in Hong Kong. En Carrara A, Guzzetti F (Eds.) *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer. Dordrecht, Holanda. pp. 135-175.
- Kjerfve B, Magill KE, Sneed JE (1988) Modeling of circulation and dispersion in Terminos Lagoon. En Yáñez-Arancibia A, Day JW Jr (Eds.) *Ecology of Coastal Ecosystems in Southern Gulf of Mexico: The Terminos Lagoon Region*. Editorial Universitaria. México D.F. pp. 111-138.
- Massel SR, Furukawa K, Brinkman RM (1999) Surface wave propagation in mangrove forests. *Fluid Dynam. Res.* 24: 219-249.
- Morton AR (2002) Factors controlling storm impacts on coastal barriers and beaches-A preliminary basis for near real-time forecasting. *J. Coast. Res.* 18: 486-501.
- NOAA. (2003) *Historical Hurricane Tracks*. Coastal Services Center <http://hurricane.csc.noaa.gov/hurricanes/index.htm>.
- Othman, IMA (1991) *Value of Mangroves in Coastal Protection*. Department of Irrigation and Drainage. Malasia. 9 pp.
- Palacio-Aponte AG (2001) Detección de cambios en la morfología litoral de Punta Zacatal y parte occidental de la Isla del Carmen, Campeche, mediante el análisis multitemporal de imágenes de satélite. *Inv. Geogr., Bol. Inst. Geogr. UNAM* 46: 7-14.
- Palacio JL, López J (1994) Videography: an alternative remote sensing tool for monitoring gully erosion. *ITC Journal* 3: 233-237.
- Palacio JL, Ortiz MA, Garrido A (1999) Cambios morfológicos costeros en Isla del Carmen, Campeche, por el paso del huracán "Roxanne". *Inv. Geogr., Bol. Inst. Geogr. UNAM* 40: 48-57.
- Pilkey OH, Davis TW (1987) An analysis of coastal recession models: North Carolina Coast. En Nummedal D, Pilkey OH, Howard JD (Eds.) *Sea-Level Fluctuation and Coastal Evolution*. Special Publication N° 41. Society for Sedimentary Geology. Tulsa, OK, EEUU. pp. 59-68.
- Sallenger AH Jr (2000) Storm impact scale for barrier islands. *J. Coast. Res.* 16: 890-895.

COASTAL POST-HURRICANE MORPHOLOGY AS AN INDICATOR OF THE INTENSITY THREAT OF HURRICANES

Gerardo Palacio-Aponte

SUMMARY

The threat from high intensity hurricanes prompts the design of preventive methodologies for the spatial analysis of natural conditions that inhibit or magnify adverse changes and effects of hurricanes in natural and anthropic landscapes. Knowing hurricane behavior and effects based on records of similar past events allows for establishing possible change scenarios or extreme damage that could possibly occur in the future. For the present study, post-hurricane coastal morphology of sandy-accumulative coasts was used as a direct geoindicator of modifying effects of hurricanes and their relation with hurricane intensity. Two stages were followed according to occurrence of the reference typical hurricane: pre-hurricane, in which territorial data of previous morphological and environmental conditions are analyzed; and post-hurricane, identifying

geomorphological responses for relatively homogeneous territorial ranges. In both stages analogical and digital cartographic references were used that were produced by processing images obtained through videographic records taken immediately after the hurricane. The destructive potential of hurricanes in coastal environments is inferred from morpho-sedimentary evidence. Two impact zoning patterns were discerned by the inclusion of most relevant morphological features: proximal frontal and proximal associated. The territorial susceptibility for the hurricane Roxanne was expressed in 13 sectors with different intensity responses depending on relative terrain elevation, dynamic predisposition of geofoms, location in the transverse incidence profile, and biogenic fixation.

A MORFOLOGIA COSTEIRA PÓS-FURACÃO COMO INDICADOR DA INTENSIDADE DA AMEAÇA POR FURACÕES

Gerardo Palacio-Aponte

RESUMO

A ameaça originada por furacões de alta intensidade promove o desenho de metodologias preventivas para avaliar, espacialmente, o conjunto das condições naturais que inibem ou magnificam mudanças e efeitos adversos nas paisagens naturais e antrópicas. Conhecer seu comportamento e efeitos, a partir de referências de fenômenos similares ocorridos no passado, permite estabelecer os prováveis cenários de mudanças ou danos extremos que poderiam ocorrer no futuro. Para este estudo foi utilizada a morfologia costeira pós-furacão em costas, com solo acumulativo-arenosos, como geoindicator direto dos efeitos modificadores dos furacões e sua relação com a intensidade do fenômeno. Seguiram-se duas etapas segundo a ocorrência do furacão típico de referência: pré-furacão, analisando dados territoriais da condição morfológica e ambiental prévia; e pós-furacão,

identificando respostas geomorfológicas para âmbitos territoriais de homogeneidade relativa. Para ambas etapas foram utilizados referenciais cartográficos analógicos e digitais produto da transformação de imagens obtidas por videografia para registros imediatos justo depois da ocorrência do fenômeno. Nestes ambientes, o potencial destrutivo dos furacões é inferido através de evidências morfo-sedimentares. Distinguiram-se dois padrões de zonificação de impactos: proximal frontal e proximal associado, que incluem o conjunto de rasgos morfológicos mais significativos. A expressão de susceptibilidade territorial para o furacão Roxana se apresentou em 12 setores com distintas expressões de intensidade, a que dependeu da altura relativa do terreno, a predisposição dinâmica das geofomas, a localização dos ambientes no perfil transversal de afetação e a fixação biogênica.