

ARTÍCULO



Simulación de la altura máxima de ola en huracanes con trayectorias similares en el mar Caribe y su relación con los impactos costeros generados

Fecha de recepción: 2011-05-18 / Fecha de aceptación: 2011-09-15

Omar G. LIZANO RODRÍGUEZ, omar.lizano@ucr.ac.cr

Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR),
Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), Departamento de Física Atmosférica, Oceánica y Planetaria (DFAOP), Escuela de Física, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica. Apartado 2060, San José, Costa Rica.

RESUMEN

Simulando con modelos numéricos las distribuciones espaciales de la energía de las olas en huracanes con trayectorias similares, se estudia la relación entre las características del huracán y la altura de las olas y la magnitud de los impactos que estos produjeron en las costas. Se encuentra que la mayor altura de ola generada por un huracán no depende de su intensidad o categoría, sino más bien, de su velocidad de avance. Huracanes como Fifi en 1974 y Joan en 1988, produjeron las mayores alturas de olas en la cuenca del Caribe y tuvieron la capacidad de generar el mayor impacto costero. La poca información que se encuentra apoya este resultado. Sin embargo, el impacto que puede generar un huracán no solo depende de su velocidad de avance, sino también, de su trayectoria hacia la costa, de la batimetría en la plataforma continental, de la existencia de cayos e islas que actúan como disipadores de la energía de las olas. Se argumenta también, que el impacto depende de la mayor vulnerabilidad de la creciente población costera y, posiblemente, de los avisos oportunos que las instituciones gubernamentales emiten ante estos eventos océano-meteorológicos.

Palabras claves: Impacto por huracanes, altura del oleaje, velocidad de avance, mar Caribe, modelos numéricos.

ABSTRACT

The relationships between different hurricane characteristics, the associated wave height and their coastal impacts were studied by simulating with numerical models the spatial distribution of wave energy between hurricanes with similar tracks. The main relationship found was between the wave height and the hurricane velocity. Hurricanes like Fifi (1974) and Joan (1988) produced the main wave heights in the Caribbean basin for the cases studied and had also the theoretical greater capacity for coastal impacts. The scattered information found, supported this result. However, the impact associated with a hurricane not only depends on its velocity, it is also related among other things with its basin track, the continental platform bathymetry and the existence of cays and islands that dissipate wave energy. An important factor to consider is that coastal population is growing and the effectiveness of the official communication ways to advice this population during these ocean – meteorological events.

Key words: Hurricane impact, wave height, forward velocity, Caribbean sea, numerical model.

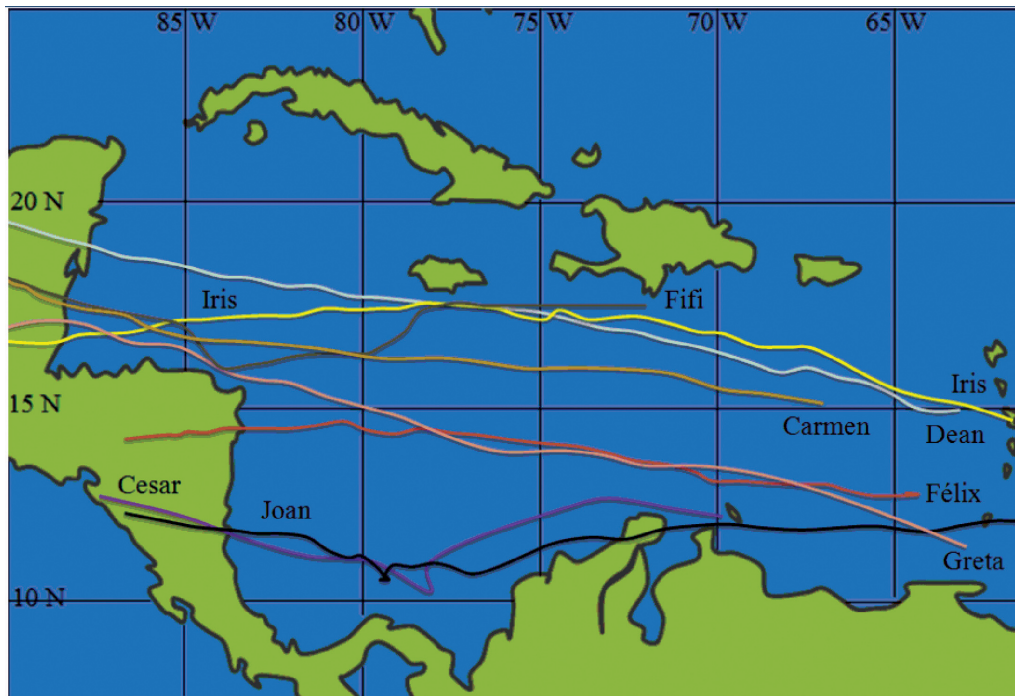


Figura 1. Trayectorias de los huracanes estudiados en este artículo.

INTRODUCCIÓN

La intensidad de un huracán es una función de la Temperatura Superficial del Océano (TSO), de la estructura térmica de la capa superficial del mar y de la temperatura en la tropo pausa [1-3]. La cortante vertical del viento, es el factor limitante para la formación e intensificación de un ciclón tropical [1,3-5]. Mientras que la estructura y la evolución es una interacción compleja entre procesos convectivos de meso escala y de escala sinóptica [6,7], el movimiento de un ciclón tropical (TC), es el resultado de varias influencias internas y externas. El flujo de gran escala en el cual está inmerso el disturbio, es típicamente, la influencia externa más prominente en un ciclón tropical [8,9]. Este aporta entre el 70 al 90 por ciento del movimiento de un ciclón [10]. Estudios teóricos demuestran que en ausencia de un macro fluido ambiental, los ciclones tropicales se mueven hacia los polos y hacia el oeste debido a influencias internas [11]. Dentro de estas influencias internas están los efectos baro clínicos del huracán que pueden producir una asimetría en la liberación de calor, en la distribución de presión atmosférica y en la estructura del viento [1]. También la rotación de la tierra o efecto beta, afecta la dirección de

los ciclones [10]. La trayectoria de un ciclón tropical es significativamente determinante en la distribución de lluvia de la tormenta [12,13]. La velocidad de avance de la tormenta juega un papel importante al crear asimetrías azimutales en el campo de lluvia y en determinar la duración de la lluvia [6]. La velocidad de avance también crea asimetrías de la distribución espacial del viento [8], la cual también crea asimetrías en la distribución espacial de las alturas de las olas sobre la superficie del océano [8,14]. En virtud de esto, mayores alturas de olas se generan a la derecha (hemisferio norte) de la dirección de avance del huracán [15-18]. Las características internas y ambientales durante un huracán, determinan el grado de intercambio de energía entre el océano y la atmósfera. Esta energía se ve reflejada en la distribución espacial de las alturas de las olas, las cuales, según la trayectoria y el entorno batimétrico en el cual se propagan, determinarán los posibles impactos en el medio marino y el impacto costero. A lo largo de la costa caribeña de Centroamérica se encuentran gran cantidad de rasgos batimétricos importantes, entre los cuales hay arrecifes, cayos, islas y plataformas continentales poco profundas. Estos rasgos son importantes como disipadores de energía del oleaje [19,20], y en algunos casos constituyen rompeolas importantísimos en la

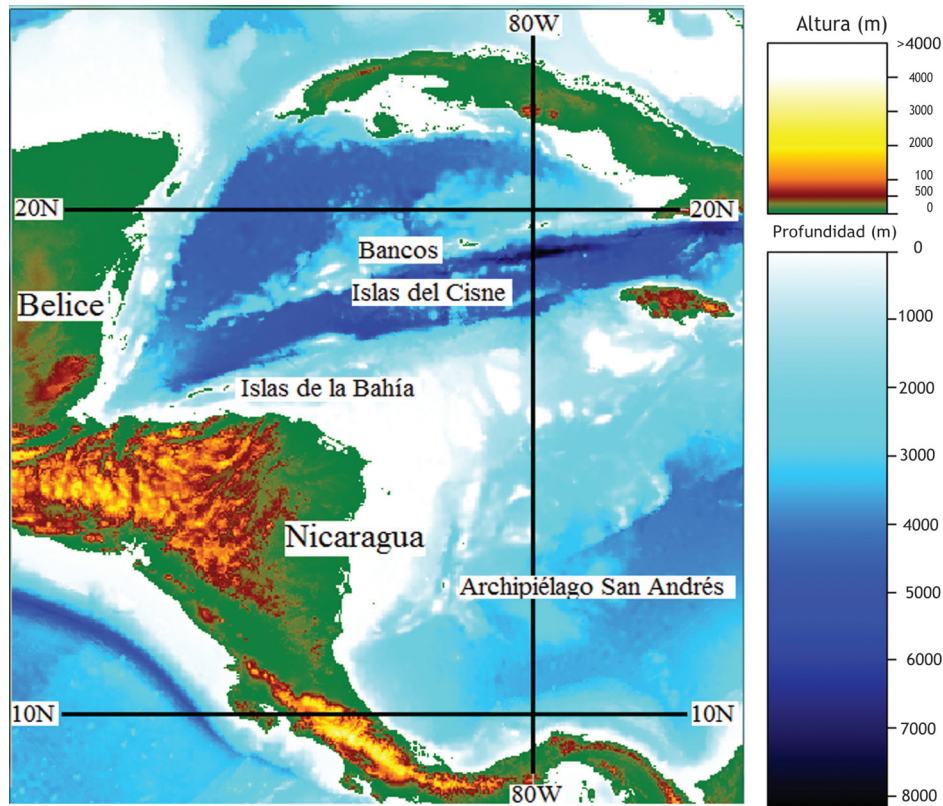


Figura 2. Batimetría del mar Caribe. Batimetría GEBCO, 1 min. resolución espacial.

protección de la costa y disminuyen el impacto de estos ciclones tropicales. Varios estudios se han hecho sobre los impactos de los huracanes en Centroamérica [21,22], pero pocos estudios se realizan sobre impactos de estos fenómenos en las costas. En este estudio se analiza la relación entre trayectorias de algunos huracanes en el Caribe, su intensidad, las alturas máximas de ola y su distribución espacial y su relación con las velocidades de avance de ciclón tropical. También se analiza el papel de los rasgos batimétricos de la plataforma continental del Caribe como disipadores de energía y su relación con los impactos que estos fenómenos tienen sobre nuestras costas.

MATERIALES Y MÉTODOS

La información sobre las características de los huracanes y sus trayectorias (figura 1) fueron extraídos del banco de datos de HURDAT del Centro Nacional de Huracanes, versión corregida [23]. Los resultados del modelo paramétrico de

viento de huracán de Lizano [8,18], interpoladas las posiciones, en algunos casos para cada 3 horas, fueron utilizados como entrada en el programa de generación de olas SWAN (ver. 40.72) para calcular la distribución espacial de las alturas de las olas. Un tamaño de rejilla de 5 mn fue utilizado para simular los vientos ya que este tamaño resuelve muy bien los radios máximos de los huracanes [18,24]. Se utilizó la batimetría de la General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) (<http://www.gebco.net/>) cuya resolución espacial es de 1 minuto (figura 2). El modelo SWAN fue corrido con los parámetros usuales recomendados [25] y con la parametrización de triadas para tomar en cuenta los efectos de aguas poco profundas (plataformas arrecifales) en todos los casos. Se graficó las alturas de las olas en cada huracán para obtener la composición de la altura máxima de ola a lo largo de toda la trayectoria. Finalmente se estudiaron las relaciones estadísticas de los parámetros que caracterizan los huracanes. La mayoría de la literatura encontrada sobre los impactos costeros de los huracanes fue extraída por medio de la

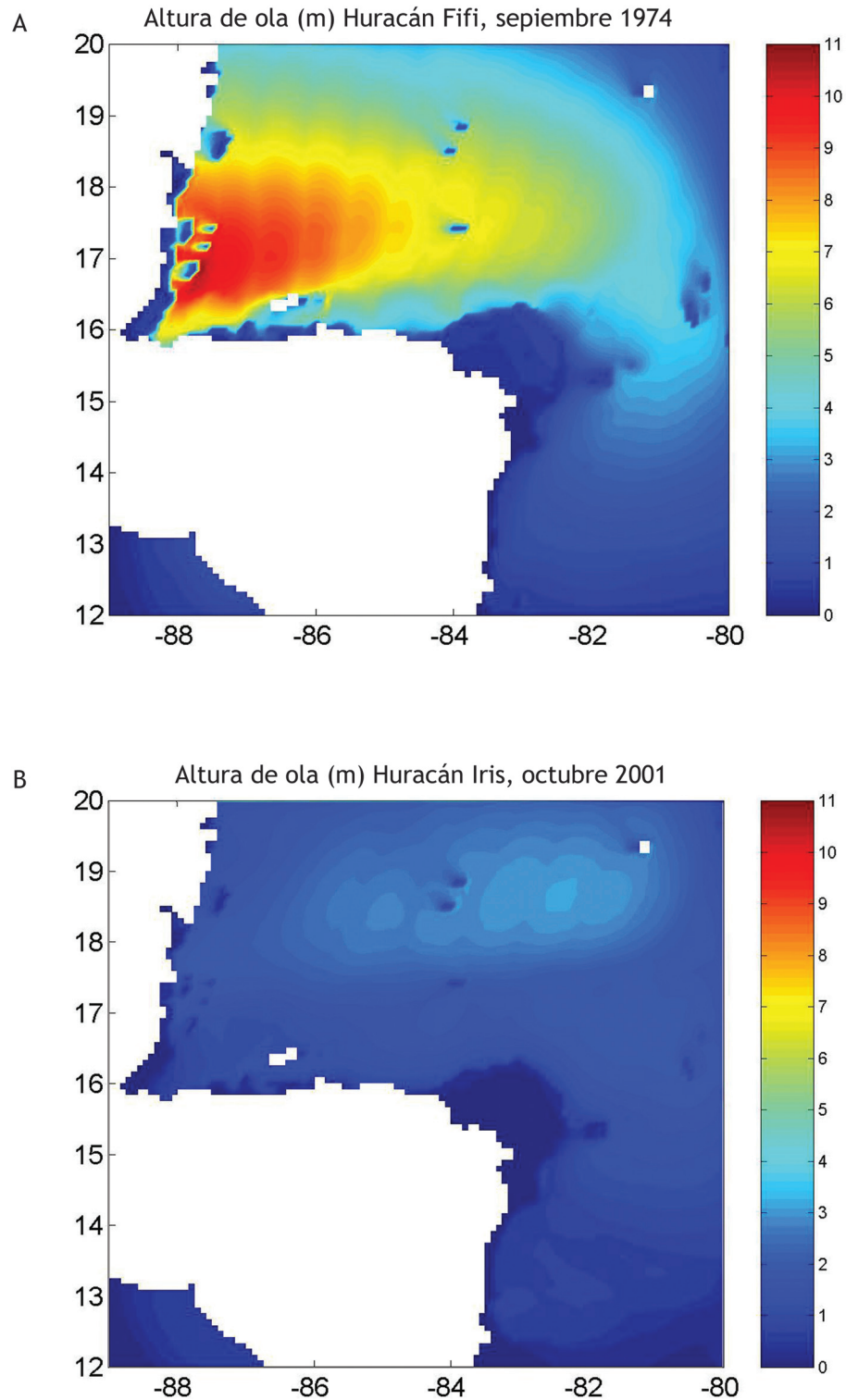


Figura 3. Distribución espacial acumulada de la altura (H) significativa máxima de ola (m) para: A: Huracán Fifi, y B: Huracán Iris.

Internet, además de informes y periódicos centroamericanos.

RESULTADOS

La distribución espacial acumulada de la altura significativa [26] máxima de ola de cada tres horas y durante toda la simulación, se muestra en las siguientes figuras para cada par de huracanes, seleccionados según sus trayectorias similares.

De la figura 3, es claro que la mayor altura de ola simulada es para el Huracán Fifi en comparación con el Huracán Iris a lo largo de toda su trayectoria. Esa mayor altura de ola se registra justamente frente a las costas de Belice, donde los resultados indican altura de hasta 11 m. La mayor parte de esta energía es disipada por los sistemas arrecifales, cayos e islas en esta región que muestra la figura 2. Es notoria también, la disipación de energía que ejercen Isla Cisne y los Bancos al norte de esta isla.

Un resumen de la literatura consultada sobre los impactos de estos huracanes indica lo siguiente. *Las enormes cantidades de lluvia del Huracán Fifi causaron daños cuando tocó tierra en Honduras. Aunque las estimaciones del número de muertos van de 3000 a 10.000, una cifra de 8.000 muertos es de aceptación general. Esto hace que el Huracán Fifi fuese el cuarto huracán más mortal registrado en el Atlántico [27]. Sobre el Huracán Iris se encuentra un poco más de información, posiblemente por ser más reciente: Después de pasar al sur de Jamaica, alcanzó Categoría 4 en la escala de huracanes. Hizo su entrada en tierra cerca de Monkey River Town, Belice el 9 de octubre conservando su categoría, pero se debilitó rápidamente, disipándose el mismo día. La cantidad exacta de muertes es desconocida, pero se confirmaron 31, 3 en la República Dominicana, 8 en Guatemala y 20 del M/V Wave Dancer, un barco que estaba atracado en la costa de Belice. Los periódicos reportaron 30 muertes más en Belice, pero el gobierno sólo ha confirmado 20 del Wave Dancer [28]. Aunque en algunos casos la comparación del número de muertes causadas por los ciclones no es un parámetro para medir los impactos, en este caso es evidente que el Huracán Fifi fue un huracán más intenso y destructivo que Iris.*

En el caso de los huracanes Dean y Carmen (figura 4), ambos huracanes generaron alturas máximas de ola similares, excepto que el Huracán

Dean se debilitó antes de llegar a la costa, mientras que el Huracán Carmen se mantuvo intenso conforme se acercó a la Península de Yucatán. Un resumen de la literatura consultada sobre los impactos, es el siguiente. *Las altas temperaturas superficiales del mar tuvieron como resultado un rápido desarrollo e intensificación del Huracán Dean, que avanzó rápidamente hacia el oeste. El 21 de agosto tocó tierra finalmente en la península de Yucatán, en México, con una magnitud de [29]. No se encontró información sobre impactos costeros en este caso.*

Sobre el Huracán Carmen se encontró que causó daños significativos sobre la Península de Yucatán, y que fue el huracán más intenso que golpeó la costa de los Estados Unidos de América después del Huracán Camille [30]. Esto es consistente con la mayor altura de ola del Huracán Carmen sobre la costa, como lo muestra la figura 4-B.

En el caso de los huracanes Félix y Greta, es evidente la mayor altura de ola durante del Huracán Greta respecto de Félix (figura 5). A pesar de que ambos tuvieron trayectorias similares desde sus inicios (figura 1), al final Félix ingresó a tierras nicaragüenses y disipó toda la energía de las olas en los bajos batimétricos al norte las costas de Nicaragua. Mientras que Greta continuó hacia Belice generando olas con suficiente energía hasta alcanzar las costas de la Península de Yucatán.

Una revisión de literatura sobre los impactos de estos huracanes indica lo siguiente. *El martes 4 de septiembre, el Huracán Félix pasó por territorio nicaragüense y dejó atrás destrucción y desastre. Según cifras oficiales preliminares hay 198.006 personas afectadas, 136 rescatados, 102 muertos y 133 desaparecidos. No obstante, extraoficialmente se estima que los daños son mayores. Debido a que muchos cadáveres han desaparecido en el mar, probablemente nunca se sabrá la cantidad exacta de muertos que ocasionó el paso de Félix, pero según sobrevivientes, autoridades y pescadores que participaron en las operaciones de rescate son muchos, posiblemente cientos. Tras el Huracán Félix, la flota pesquera artesanal de la RAAN quedó prácticamente destruida por lo cual el gobierno, a través del Instituto Nicaragüense de la Pesca (Inpesca), destinará US\$6.2 millones de dólares para reactivarla. Lo que beneficiará a 4,500 familias dedicadas a la pesca [31]. El paso del Huracán Félix por Nicaragua, dejó una situación crítica en los humedales nicaragüenses. Hasta la fecha no se han desarrollado estudios de impacto*

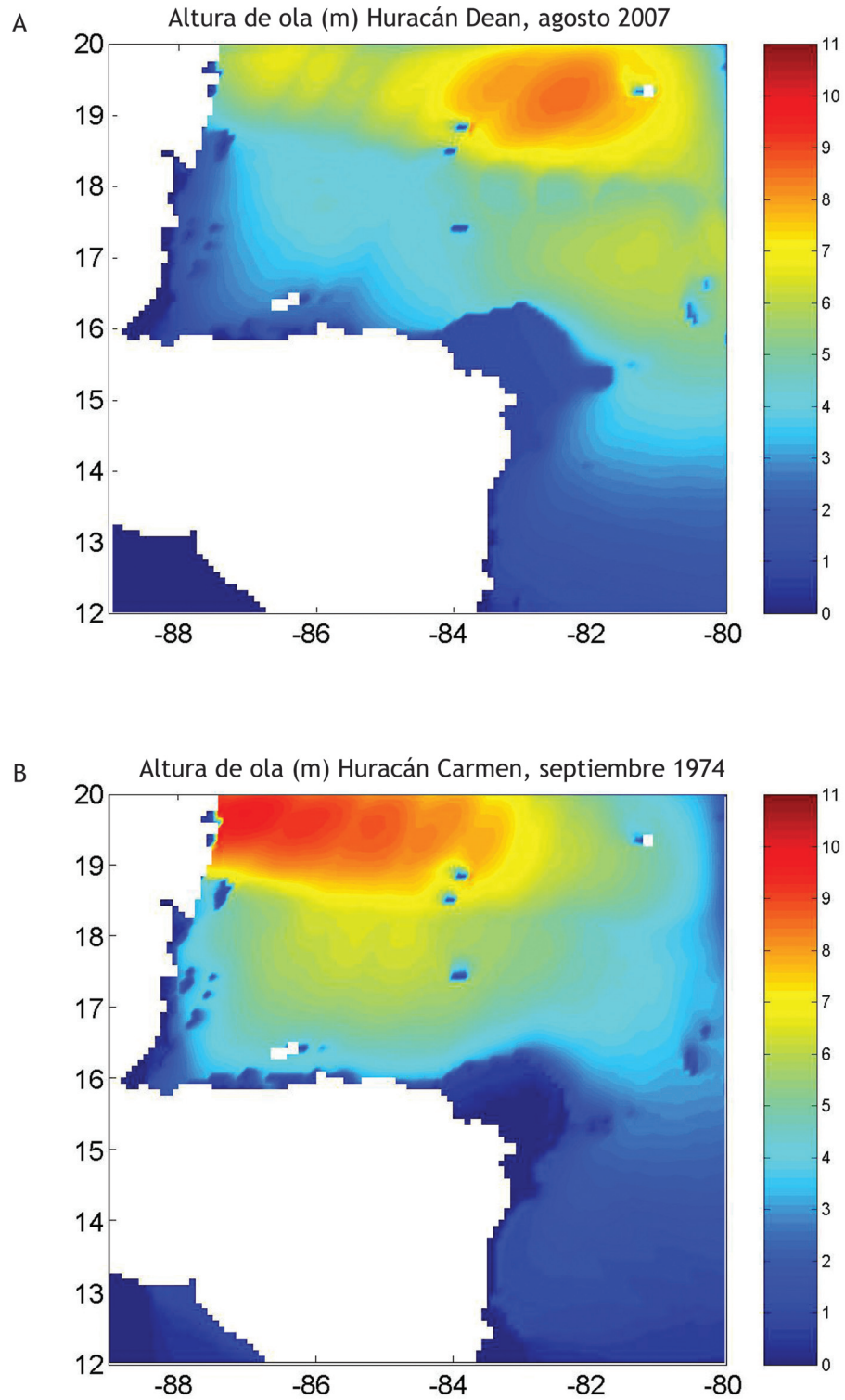


Figura 4. Distribución espacial acumulada de la altura (H) máxima de ola (m) para: A: Huracán Dean, y B: Huracán Carmen.

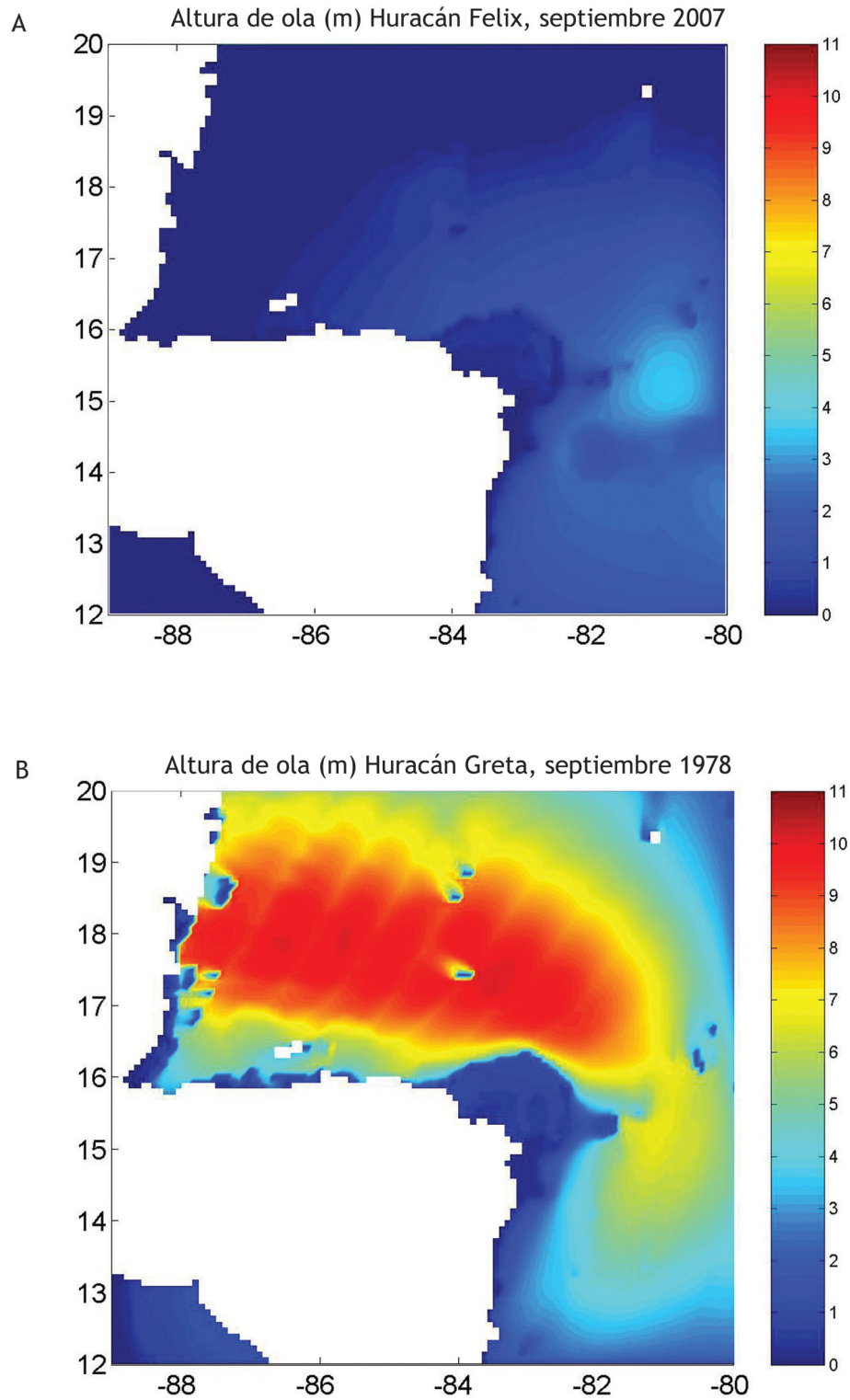


Figura 5. Distribución espacial acumulada de la altura (H) significativa máxima de ola (m) para: A: Huracán Félix, y B: Huracán Greta.

ambiental y la limpieza de los mismos se está desarrollando tan lentamente que otras especies de vida silvestre y ecosistemas están siendo dañados. El viceministro Araquistain informó que el Marena calcula que tendrán que pasar entre cinco y diez años para que las especies que habitaban los humedales retornen [31]. Otra información indica que: Félix tocó tierra en la Costa de Mosquito en Nicaragua, cerca de la frontera con Honduras, cerca de las 5:45 am, hora local. Pérdidas Humanas: al 6 de septiembre de 2007, la AP reportó que el conteo de fallecimientos ocasionados por el Huracán Félix era casi de 100 personas. Adicionalmente, un número de personas en la Costa Mosquito de Nicaragua se habían reportado como desaparecidas. Efectos Ambientales: enormes plumas de sedimentos en las desembocaduras de los ríos Coco, Ulam y Wawa en particular, son evidentes desde el día siguiente a la llegada de Félix y aún a medida que éste disminuía hasta convertirse en una depresión tropical atravesando Honduras y Nicaragua. El huracán impactó en una región de más de 33,000 kilómetros cuadrados, con una población de más de 300,000 habitantes, la mayoría indígenas misquitos y mayagnas, cuyo 80 por ciento vive en la extrema pobreza. El desastre ha paralizado prácticamente la actividad económica, productiva y social de toda la Región Autónoma del Atlántico Norte dañó bosques, reservas, manglares y casi todo el ecosistema [32].

Sobre el Huracán Greta se encontró muy poco. En Belice produjo fuertes daños materiales, donde aproximadamente 600 personas quedaron sin suministro de luz, ni agua potable [33]. Presentó lluvias fuertes sobre ciertas regiones de Centro América. Greta tuvo condiciones de una tormenta intensa [42].

El Huracán Joan fue uno de los más intensos que han pasado por esta región, lo cual se refleja en la gran altura de ola que generó a lo largo de su trayectoria [15,35,41]. Ambos ingresaron prácticamente por el mismo sitio sobre las costas de Nicaragua, pero sus impactos fueron diferentes tanto en el océano como en tierra [21,22,43].

Es meritorio mencionar la función amortiguadora de la energía de las olas de las islas y cayos frente a las costas caribeñas de Nicaragua (figura 6), que muestra esta simulación, y que es válida para cualquier ciclón tropical que se aproxime a esta zona.

Los reportes encontrados sobre el impacto de estos huracanes es el siguiente. *El 28 de julio el Huracán César entró a tierra firme nicaragüense, a tempranas horas de la madrugada, en la zona de Kukra-Hill entre Laguna de Perlas y Bluefields, ocasionando inundaciones en El Rama, Nueva Guinea y Región Central del país; con vientos de 130 a 150 Km/h que originaron olas de entre 2 y 3 metros de altura... La Cruz Roja Nicaragüense informó que el recuento oficial de los daños causados por el Huracán Cesar, en todo el territorio fue de 9 muertos, 39 desaparecidos, 100 mil damnificados y destrucción de más de 2,500 viviendas [37].*

*El Huracán Joan se debilitó rápidamente pero volvió a ganar fuerza mientras viajaba hacia el oeste.[] Joan llegó a su pico de intensidad justo antes de tomar tierra cerca de Bluefields, Nicaragua, el 22 de octubre como un huracán categoría 4 [38]. El Huracán Joan mató 148 personas en Nicaragua y 68 en otras naciones afectadas. [] Los daños del huracán en Nicaragua ascendieron a la mitad de los \$2.000 millones (1988 USD) totales. Joan también trajo fuertes lluvias y deslizamientos de tierra a los países a lo largo del extremo sur del Caribe [] [39]. Otra dice que: Por varias millas a la izquierda, y otras tantas a la derecha del puerto, se observan en las orillas, decenas de embarcaciones fondeadas, con los viejos mástiles solitarios ondeando algún harapo descolorido y con el novelesco aire siniestro de los barcos fantasmas. Se le pregunta al viejo Myers de dónde salieron tantos barcos y por qué están varados. "Hay muchas razones", explica: "Todo comenzó en 1988, cuando el Huracán Joan arrasó el puerto. Decenas de barcos y lanchas fueron hundidas, y otras, terminaron encalladas en tierra firme, de donde no salieron jamás. El huracán destruyó y hundió todo lo que estaba en el puerto. Ahí no quedó nada más que destrucción. Muchos dueños de barcos lo que hicieron fue tratar de recuperar piezas y ocuparlas o venderlas, por eso usted ve que muchos barcos están desarmados", señala Myers. "Algunos no quisieron salir de sus barcos y los agarró el huracán, ahí murieron", cuenta el viejo Myers, con el timón en las manos y la vista sobre el horizonte (39). En el informe del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de Costa Rica [40], se menciona lo siguiente: *En los últimos años los huracanes Joan en 1988, César en 1996 y Mitch en 1998 han causado severos daños en Costa Rica, especialmente el Huracán César, el cual causó pérdidas de vidas humanas y grandes daños a la infraestructura nacional.**

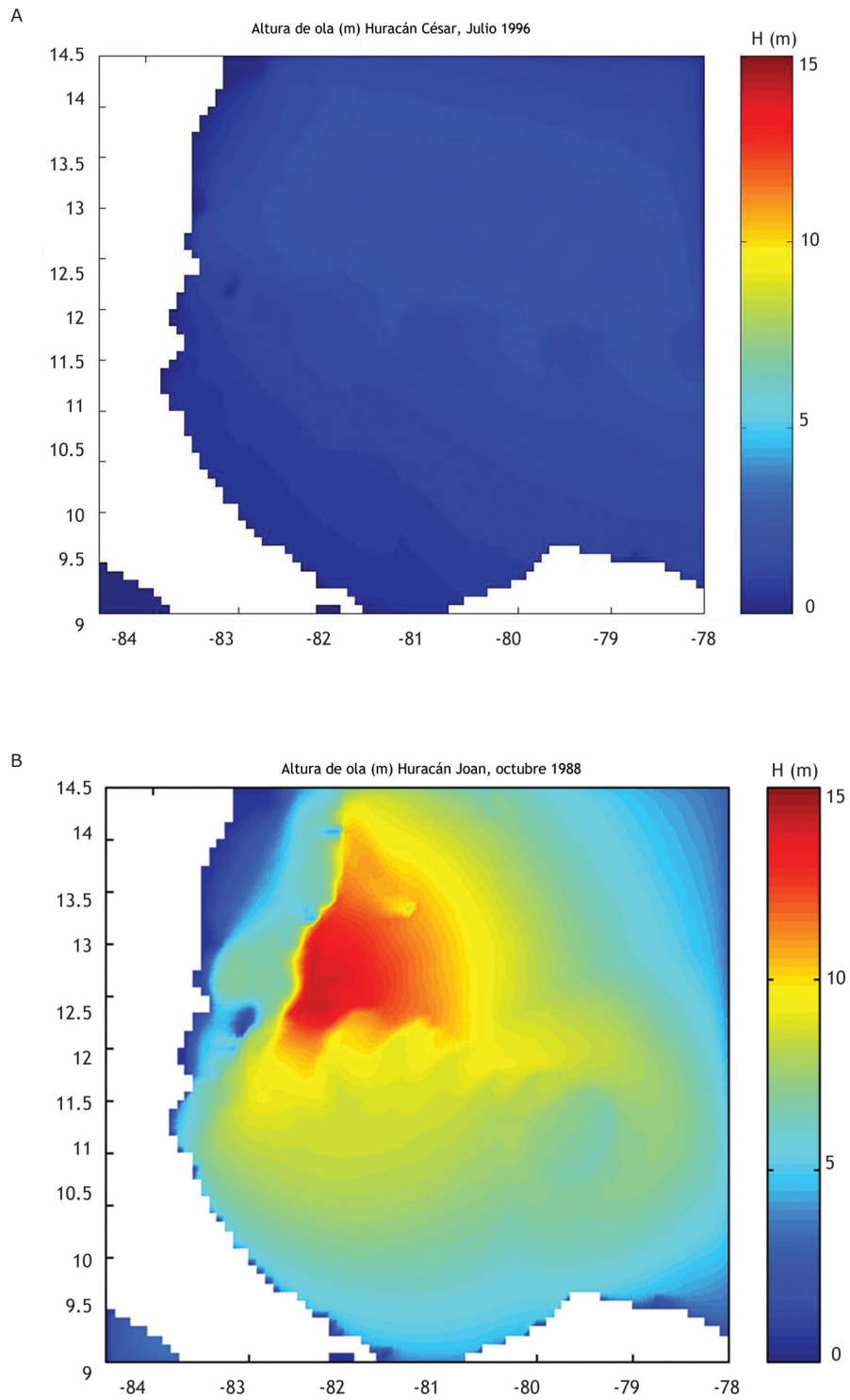


Figura 6. Distribución espacial acumulada de la altura (H) significativa máxima de ola (m) para: A: Huracán César, y B: Huracán Joan.

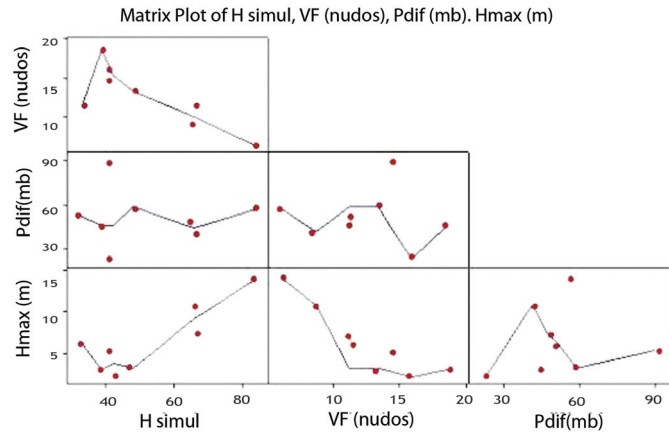


Figura 7. Matriz gráfica con las relaciones de dispersión de los diferentes parámetros de los huracanes estudiados y mostrados en la tabla 1.

DISCUSIÓN

No hay duda que las diferencias en las características de los parámetros ambientales e internos de algunos pares de huracanes determinaron la energía que ellos intercambiaron con el océano, como es el caso de César y Joan. También las pequeñas (o grandes) diferencias en las trayectorias de algunos huracanes puedan determinar la energía del oleaje que ellos generaron sobre las costas de Centroamérica, y los impactos que pudieron generar, como es el caso de Félix y Greta. Sin embargo, en un estudio adicional que relaciona la energía del oleaje con los parámetros de los huracanes, es claro

que las alturas máximas tienen relación con la velocidad de avance de estos fenómenos, más que con cualquier otra cosa. La tabla 1 muestra las características principales de los huracanes durante el tramo simulada en este estudio.

Aunque desde el cuadro anterior se pueden identificar algunas relaciones entre estas variables, la siguiente figura muestra claramente estas relaciones.

Aunque se ha listado la máxima categoría alcanzada por el huracán en la tabla 1 para referencia, el mejor parámetro indicativo de la intensidad de un huracán es la diferencia de la presión

Tabla 1. Algunas características relevantes de los huracanes estudiados.

Índice	Nombre	Cat.	Hsimul	VF(nudos)	Pdif(mb)	Hmax(m)
1	Fifí	4	66	8,690	41,42	10,94
2	Iris	4	39	18,640	46,07	3,13
3	Dean	5	42	14,520	90,21	5,45
4	Carmen	4	33	11,363	51,64	6,23
5	Félix	5	48	13,380	58,62	3,19
6	Gretta	4	66	11,190	47,04	7,39
7	Joan	4	84	6,160	57,00	14,10
8	César	1	42	15,910	22,44	2,13

Cat.: categoría máxima alcanzada, Hsimul: número de horas de simulación de oleaje, VF: promedio de la velocidad de avance, Pdif: promedio de la diferencia de presión atmosférica ambiental y en la presión atmosférica en el ojo, Hmax: altura máxima alcanzada a lo largo de su trayectoria.

atmosférica ambiental y la presión en el ojo (Pdif). El promedio de esta variable a lo largo de la trayectoria simulada, se muestra en la tabla 1.

De la información de la tabla 1 y de la figura 7, no se encontró una correlación significativa entre la intensidad de un huracán y la altura máxima de ola. Existe una correlación entre Hsimul, Hmax y VF. Sin embargo, es claro que el número de horas de simulación (Hsimul) está relacionado con la velocidad de avance (VF) del huracán. Al hacer una regresión lineal múltiple, usando Hmax como variable dependiente, se determinó por medio de la selección de predictores "stepwise" ("forward" y "backward"), que la única variable retenida en el modelo fue VF como variable independiente. Las otras variables, Hsimul y Pdif, contienen información redundante para Hmax. El modelo es robusto, pues tiene para la pendiente una razón de Student $t = -5.6$ (valor absoluto > 2) y un valor $p < 0.01$, además de que el modelo mostró una razón de Fisher $F = 31.54$ (> 4). Además, tiene un coeficiente R Múltiple 0.917, es decir, se logra explicar el 91.7% de la relación entre estas variables [42]. La relación de los impactos que los huracanes produjeron en el mar o en la costa con las variables que lo caracterizan, no es fácil. Esto porque la información que se encuentra de ellos es periodística. La información también depende de la época (de los huracanes más recientes se encuentra más información), y posiblemente de los lugares donde el huracán alcanzó la costa, de si había o no poblados, puertos, etc. En el caso de los huracanes Fifi e Iris, es claro que hay más información de Iris, por ser el más reciente. Pero de lo poco que se rescata, se evidencia la mayor destrucción del Huracán Fifi. Esto es coherente con las mayores alturas de ola simuladas, lo cual tiene relación con su menor velocidad de avance. En el caso de los huracanes Dean y Carmen, también son coherentes los mayores impactos que produjo Carmen con su mayor altura de ola conforme se aproximó a la costa, la cual también tiene relación con su menor velocidad de avance. En el caso de Félix y Greta, fue imposible comparar sus impactos, pues sobre el Huracán Greta se encontró muy poco en la literatura. Sin embargo se menciona en fuertes aguaceros y que fue muy intensa [33, 34]. Pero el Huracán Greta tuvo que haber causado mayor impacto costero que Félix, según las simulaciones de oleaje que presenta este estudio. En el caso de los huracanes César y Joan, Alvarado y Alfaro [21] indican que Joan ocasionó 28 muertes y daños por \$420 millones, y Cesar produjo la muerte de 26 personas y daños por \$105 millones. De los informes de impactos en

la costa, es claro que el Huracán Joan fue uno de los huracanes más destructivos en Centroamérica [35, 39]. Esto también tuvo relación con su poca velocidad de avance del Huracán Joan, lo que causó gran energía del oleaje, como demuestra este estudio, y los reportes de impactos costeros encontrados en la literatura [15, 41].

El informe técnico de CAPRA [43] indica que entre los diez mayores desastres naturales ocurridos en el Caribe durante el siglo XX, la mitad de esos eventos corresponden a huracanes y tormentas tropicales. Por otro lado, Ortiz, *et al.* [44] señala que *los impactos que han generado en Centroamérica estos fenómenos, no necesariamente tiene relación con la categoría del huracán, pues algunas tormentas tropicales han causado mayor destrucción en algunas regiones* [45]. Caso de estos podrían ser los Huracanes César y Joan. Joan fue mucho más intenso, y aunque se reportaron grandes daños en la costa, las pérdidas que causó César fueron enormes, eso sí, más bien tierra adentro [43]. Esto también, concluyeron Alvarado y Alfaro [21], quienes además agregan que el impacto depende de la posición del huracán respecto al istmo centroamericano y de su velocidad de avance en la cuenca del Mar Caribe [3, 22, 46]. Pero también, el impacto que puede generar un ciclón, depende en gran medida de la información que se da a la población y de la falta de planes de contingencia. Además, Alfaro, *et al.* [22], señalan que el número de personas viviendo en condición de pobreza ha aumentado, lo que podría estar relacionado con un mayor número de personas viviendo en una condición vulnerable ante el impacto de algún evento de tipo hidrometeorológico que puede ocasionar un desastre. Por ejemplo, Pielke, *et al.* [47], argumenta que la devastación del Huracán Mitch (en 1998) en la región, en vez de ser un acontecimiento extraordinario, el daño es relacionado a la dimensión humana, rápido aumento de la población, expansión de la pobreza, acceso a tierras inadecuadas, deforestación y falta de planificación urbana. En resumen, son varios los elementos a considerar sobre el posible impacto de un huracán, que tiene que ver no solo con las características de mismo, su trayectoria, el medio por el cual transita, sino que también hay una relación con la vulnerabilidad, aumento de la población costera, y con la información oportuna que se envía a través de las oficinas gubernamentales ante la presencia de estos eventos oceánicos meteorológicos. Los escenarios futuros del cambio climático hablan de huracanes más intensos más bien que un aumento del número de ellos [3,

48, 49]. Específicamente sobre Centroamérica, Pielke *et al.* [47], encuentra que si las condiciones climáticas persisten, y tomando en cuenta la variabilidad decadal mostrada de huracanes en la región, podría haber gran actividad de huracanes en las próximas dos décadas.

AGRADECIMIENTOS

A la Vicerrectoría de Investigación por su apoyo a través de los proyectos No. 805-A6-103, 808-A7-166, 805-A7-002-UCR y IAI-CRN2-050. Al Dr. Eric Alfaro por la elaboración del análisis estadístico "stepwise" y revisión preliminar de este artículo. A la Licda. Flora Solano por su ayuda en la recuperación de los datos del impacto del Huracán Greta.

RERERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] World Meteorological Organization (WMO). Global guide to tropical Cyclone Forecasting. Report No. TCP-31, Geneva, Switzerland; 1993.
- [2] Emanuel KA. The maximum intensity of hurricanes. *J Atmos Sci* 1988;45:1143-55.
- [3] Alfaro E. Escenarios climáticos para temporadas con alto y bajo número de huracanes en el Atlántico. *Revista de Climatología* 2007;7:1-13.
- [4] Merrill RT. Chapter 2: Tropical cyclone structure. In GJ Holland (ed.), *Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting*, WMO/TD-No. 560, Report No. TCP-31. 1993. [En línea]. 2010 Julio 20. Disponible en: URL: http://cawcr.gov.au/bmrc/pubs/tc-guide/globa_guide_intro.htm.
- [5] Lizano OG y Fernández W. Algunas características de las tormentas tropicales y de los huracanes que atravesaron o se formaron en el Caribe adyacente a Costa Rica durante el período 1886-1988. *Top Meteorol Oceanog* 1996;3(1):3-10.
- [6] Shapiro LJ. The Asymmetric Boundary Layer Flow Under a Translating Hurricane. *J of Atmos Sci* 1983;40:1984-98.
- [7] Shapiro LJ. The three-dimensional structure of synoptic-scale disturbances over the tropical Atlantic. *Mon Wea Rev* 1986;114:1876-91.
- [8] Lizano OG. Un modelo de viento ajustado a un modelo de generación de olas para el pronóstico de oleaje durante huracanes. *Geofísica* 1990;33:75-103.
- [9] Willoughby HE. Forecasting Hurricane Intensity and Impacts. *Science* 2007;315:1233-32.
- [10] Tropical Cyclone Forecasters Reference Guide [En línea]. 1995; Disponible en: URL: <http://www.nrlmry.navy.mil/~chu/index.html>.
- [11] Isberry RL. Tropical cyclone motion. Chapter 4, *A Global view of tropical cyclones*, Office of Naval Research. Arlington, VA. 1987;91-131.
- [12] Marchok T, Rogers R and Tuleya R. Validation Schemes for Tropical Cyclone Quantitative Precipitation Forecasts: Evaluation of Operational Models for U.S. Landfalling Cases. *Weather and forecasting* 2007;22(4):726-46.
- [13] Lonfat M, Marks Jr FD and Chen SS. 2004: Precipitation distribution in tropical cyclones using the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Microwave Imager: A global perspective. *Mon Wea Rev* 132;1645-60.
- [14] Young IR., Burchell G.P. Hurricane generated waves as observed by satellite. *Ocean Engng* 1996;25(8): 761-76.
- [15] Lizano OG y Moya RJ. Simulación de oleaje durante el Huracán Joan (1988) a su paso por el Mar Caribe de Costa Rica. *Geofísica* 1990;33:105-26.
- [16] Lizano OG. Un método gráfico para el pronóstico de oleaje durante huracanes en el Caribe adyacente a Costa Rica. *Top Meteor Oceanog* 1996;3(1):11-17.
- [17] Lizano OG, Ocampo-Torres FJ, Alvarado LF, Vega R y Puig JM. Evaluación de modelos numéricos de Tercera Generación para el pro-

- nóstico del oleaje en Centroamérica y México. *Top Meteor Oceanog* 2001;8 (1):40-9.
- [18] Lizano OG. Simulación de oleaje de huracán usando modelos de viento paramétricos en un modelo de olas de Tercera Generación. *Boletín Científico CIOH* 2006;24:36-47.
- [19] Lugo-Fernández A, Hernández-Avila ML and Roberts HH. Wave-energy distribution and hurricane effects on Margarita Reef, southwestern Puerto Rico. *Coral Reefs* 1994;13: 21-32.
- [20] Lizano OG, Mercado A y Hernández ML. Impacto de olas generadas por un huracán sobre arrecifes coralinos. Inferencias basadas en modelos numéricos. *Geofísica* 1993;91-110.
- [21] Alvarado LF y Alfaro EJ. Frecuencia de los ciclones tropicales que afectaron a Costa Rica durante el siglo XX. *Top Meteor Oceanog* 2003;10(1):1-11.
- [22] Alfaro E, Quesada A y Solano F. Análisis del impacto en Costa Rica de los ciclones tropicales ocurridos en el Mar Caribe desde 1968 al 2007. *Revista Diálogos* 2010;11(2):22-38.
- [23] Landsea CW, Glenn DA, Redemeyer W, Chenoweth M, Ellis R, Gamache J, Hufstetler L, Mock C, Perez R, Prieto R, Sánchez-Sesma J, Thomas D and Woolcock L. Reanalysis of the 1911–20 Atlantic Hurricane Database. *J. of Climate* 2007;21:2138-68.
- [24] Lizano OG. Efectos del tamaño de la rejilla y el número de frecuencias en un modelo espectral de pronóstico de olas. *Top Meteorolog Oceanograf* 1997;4(1): 39-50.
- [25] Ris RC. Communications on hydraulic and geotechnical engineering. Report No. 97-4. Faculty of Civil Engineering. Delf University of Technology; 1997.
- [26] Knauss JA. Introduction to Physical Oceanography. Nueva York, Prentice-Hall; 1978.
- [27] Wikipedia. Hurricane Carmen. [En línea]. 2005 Ago 12. [Citado 2010 Ene 19]. Disponible en: URL: <http://www.super70s.com/Super70s/Tech/Nature/Disasters/Hurricanes/74-Carmen.asp>.
- [28] Wikipedia. Temporada de huracanes en el Atlántico de 2001. [En línea]. 2010 Jul 02. [Citado 2010 Ago 03]. Disponible en: URL: http://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_Atl%C3%A1ntico_de_2001#Hurac.C3.A1n_Iris.
- [29] Wikipedia. Temporada de huracanes en el Atlántico de 2007. [En línea]. 2010 Jul 19. [Citado 2010 Ago 03]. Disponible en: URL: http://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_Atl%C3%A1ntico_de_2007#Hurac.C3.A1n_Dean.
- [30] Wikipedia. Huracán Carmen. [En línea]. 2010 Sep 29. [Citado 2010 Ago 03]. Disponible en: URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Hurricane_Carmen.
- [31] Información – Huracanes en el Caribe – Felix. Huracán Félix y los Cayos Mismitos. [En línea]. 2010 Feb 10. [Citado 2010 Ago 03]. Disponible en: URL: <http://vianica.com/sp/proyectos/1/>.
- [32] SERVIR. Huracán Felix, Reporte 1: Evaluación rápida de los impactos del Huracán Félix en Nicaragua y Honduras.. [En línea]. [Citado 2010 Ago 03]. Disponible en: URL: http://www.servir.net/hurac%C3%A1n_felix.
- [33] Hurricane Greta Aimed at Nicaragua. *Lorgansport Pharos-Tribune* 1978 Sep 17; 12.
- [34] Lawrence MB. Hurricane Season of 1978. *Mon Wea Rev* 1978;107:487-88.
- [35] INETER. Huracán Joan (1988). [En línea]. [Citado 2010 Ago 03]. Disponible en: URL: http://www.ineter.gob.ni/Direcciones/meteorologia/Desastres/Huracanes/huracan_joan.htm.
- [36] Wikipedia. Temporada de huracanes en el Atlántico de 1988. [En línea]. 2010 Sep 11. [Citado 2010 Ago 03]. Disponible en ; URL: http://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_Atl%C3%A1ntico_de_1988#Hurac.C3.A1n_Joan.

- [37] INETER. Huracán César (1996). [En línea]. [Citado 2010 Ago 03]. Disponible en: URL: http://www.ineter.gob.ni/Direcciones/meteorologia/Desastres/Huracanes/huracan_cesar.htm.
- [38] Wikipedia. Hurricane Joan-Miriam. [En línea]. 2010 Sep 18. [Citado 2010 Ago 03]. Disponible en: URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Hurricane_Joan_%281988%29.
- [39] Silva JA y León S. Huracán Joan dejó un aire siniestro de barcos fantasmas. La Prensa 2003 Jun 08; Nacionales (col. 1).
- [40] Instituto Meteorológico Nacional (IMN). HURACANES. LOS HURACANES Y SUS EFECTOS EN COSTA RICA. [En línea]. [Citado 2010 Ago 03]. Disponible en: URL: <http://www.imn.ac.cr/educacion/huracanes/huracan06.html>.
- [41] Ortiz JC, López F, Díaz E y Bacca LF. Estudio del Oleaje Generado por el Huracán Joan en la Costa Caribe Colombiana en 1988, Incluyendo a la Isla San Andrés. Revista Colombiana de Física 2008;40(2):444-6.
- [42] Blank L. Statistical Procedures for Engineerings, Managements, and Science. Nueva York, Mc-Graw-Hill; 1980.
- [43] Evaluación de Riesgos Naturales (ERN), América Latina. Tomo II Análisis Probabilista de Amenazas y Riesgos Naturales, Revisión de Eventos Históricos Importantes. Informe Técnico ERN-CAPRA-T2-1. 69 pag. Anexos. 2009. Disponible en: URL: http://www.ecapra.org/capra_wiki/es_wiki/index.php?title=P%C3%A1gina_Principal.
- [44] Ortiz JC. Los huracanes y su importancia en el estudio de riesgos costeros. In: Alcántara J, Correa ID, Isla FI, Alvarado M, Klein AHF, Cabrera A y Barlow R (eds.). Métodos en teledetección aplicada a la prevención de riesgos naturales en el litoral. Programa Iberoamericano de Ciencia y tecnología para el Desarrollo Cyted; 2009. p29-38.
- [45] Chinchilla G. Comentario meteorológico de Octubre de 2008. Boletín Meteorológico. XXXIII, Octubre 2008 [Citado el 22 de enero de 2010]. Instituto Meteorológico Nacional. San José, Costa Rica: 2-13. Disponible en: URL: http://www.imn.ac.cr/boletin_meteo/historial/2008/BMET102008.pdf.
- [46] Taylor M. and Alfaro E. Climate of Central America and the Caribbean. In: Encyclopedia of World Climatology. John E. Oliver (ed.), Netherlands; Springer; 2005. p. 183-189.
- [47] Pielke RA, Rubiera J, Landsea C, Fernández ML and Klein R. Hurricane Vulnerability in Latin America and The Caribbean: Normalized Damage and Loss Potentials. Natural Hazards Review 2003;4(3):101-114.
- [48] Pielke RA, Landsea CW, Mayfield M, Laver J and Pasch R. Hurricanes and Global Warming. Bull Amer Meteor Soc 2005;86:1571-1575.
- [49] Knutson TR, Tuleya RE and Kurihara Y. Simulated Increase of Hurricane Intensities in a CO2-Warmed Climate. Science 1998;279:1018-1020.