



Contribución antropogénica a cambios geomorfológicos en una laguna costera tropical

Anthropogenic contribution to geomorphological changes in a tropical coastal lagoon

Carrasco-Navas, J. C. ⁽¹⁾; Benavente, J. ⁽²⁾; Gómez-Enri, J. ⁽³⁾; Caviedes, V. ⁽⁴⁾

(1) Dpto. de Biología, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz, Pol. Río San Pedro s/n. 11510-Puerto Real, Cádiz, España. Correo-e: carrasconavasjc@gmail.com

(2) Dpto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Cádiz, Pol. Río San Pedro s/n. 11510-Puerto Real, Cádiz, España.

(3) Dpto. de Física Aplicada, Universidad de Cádiz, Pol. Río San Pedro s/n. 11510-Puerto Real, Cádiz, España.

(4) Instituto Tecnológico Superior de Tela, Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Colonia Venecia, 31301 Tela, Atlántida, Honduras.

Resumen

El objetivo principal de este trabajo ha sido analizar las tasas recientes de progradación y retroceso del delta interior en la laguna de Los Micos, ubicada en el Caribe de Honduras, y determinar los factores antropogénicos y meteorológicos que han contribuido a la acelerada formación deltaica y los potenciales efectos sobre el sistema físico natural. Para ello, se han generado polígonos a partir de imágenes de satélite de la misión Landsat tomadas en los años: 1984, 1999, 2010 y 2014. Se han calculado las áreas de los polígonos y se ha analizado su evolución temporal. Se ha observado una tasa de progradación del delta de $38,45 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, lo cual ha provocado una pérdida de superficie lagunar de $6,77 \text{ ha}\cdot\text{a}^{-1}$, como resultado del cambio de uso del suelo en la cuenca hidrográfica y los efectos de eventos meteorológicos severos como el Huracán Mitch.

Palabras clave: Delta lacustre; Infraestructura hidráulica; Palma aceitera; Honduras.

Abstract

The main objective of this work was to analyze the recent rates of progradation and regression of an interior delta in the Los Micos lagoon, located in the Honduras Caribbean. The analysis focused on the anthropogenic and meteorological factors that have contributed to the accelerated deltaic formation and the potential effects on the natural physical system. To do this, polygons have been generated from satellite images of the Landsat mission taken in the years: 1984, 1999, 2010 and 2014. The areas of the polygons have been calculated and their temporal evolution has been analyzed. A delta progradation rate of $38.45 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ has been observed, which has caused a loss of lagoon area of $6.77 \text{ ha}\cdot\text{a}^{-1}$, as a result of the change in land use in the watershed and the effects of severe weather events such as Hurricane Mitch.

Key words: Lacustrine delta; Hydraulic infrastructure; Oil palm; Honduras.



1. Introducción

Los procesos antropogénicos transformadores del paisaje se iniciaron durante el Neolítico hace unos 8000 años, sin embargo, sus impactos se hacen más evidentes durante y después de la Revolución Industrial (Ruddiman y Kutzbach, 1991). En este sentido, Price *et al.* (2011), hacen referencia a que es a partir de 1950, cuando se observan marcadores estratigráficos significativos de este periodo. El cambio en el uso del suelo y la introducción de prácticas agrícolas inadecuadas en las cuencas de aporte pueden provocar la colmatación de las lagunas costeras debido a la erosión y el transporte de sedimentos (Galván *et al.*, 1999).

En este contexto se encuentran las actuaciones realizadas en las cuencas fluviales, donde muchas de las obras hidráulicas (ej. modificación de cauces fluviales) no han tenido en cuenta que por los ríos circulan no solo caudales líquidos, sino también una importante carga sólida que tiene un papel fundamental tanto en la configuración de la propia cuenca como en las áreas costeras. En ríos en estado de equilibrio existe la tendencia a formar depósitos de sedimentos en ambos lados del cauce, donde el río deposita el exceso de carga sólida cuando la velocidad del agua pierde la capacidad de transporte al hacerse más ancho y menos profundo el cauce. Por otra parte, los cauces de los ríos canalizados son inestables, poseen una baja tasa de sedimentación lateral y son sensibles a la erosión de la base del talud, provocando el desprendimiento de bloques de suelo, aumentando la carga sólida fluvial (González del Tánago y García de Jabaloy, 1998). Esto implicaría que la artificialización de la cuenca mediante canalizaciones aumenta la cantidad de carga sólida que termina llegando a las desembocaduras.

El concepto de hidrosistema implica procesos que actúan en las tres dimensiones de la cuenca, en el que la componente longitudinal

(aguas arriba y abajo), lateral (márgenes del cauce) y vertical/superficial (subterráneo) transfieren energía, materia y biota. Por lo tanto, un hidrosistema (ej. sistema fluvio-lagunar) no solo depende de la interacción de los procesos hidrológicos y geomorfológicos, sino también biológicos y químicos, que actúan en un amplio rango de tiempo (Vannote *et al.*, 1980; Gutiérrez-Elorza, 2008), por ejemplo, cambios en los valores del cociente Carbono: Nitrógeno en los sedimentos (ej. manglar), puede ser una respuesta a los cambios geomorfológicos (ej. sedimentos recién depositados en etapas iniciales de colonización vegetal) y a la intervención antrópica de la cuenca (Castaño *et al.*, 2010).

Los ríos desembocan tanto en zonas marinas como en lagos y lagunas, formando deltas que representan una interfase altamente productiva y geomorfológicamente dinámica (Pethick, 1984; Cloern, 2001; Gutiérrez-Elorza, 2008). Los deltas destacan en una costa frente a la desembocadura de un río y se forman cuando el aporte de sedimentos supera la redistribución por procesos marinos, tales como oleaje, corrientes y mareas (Bird, 2000; Gutiérrez-Elorza, 2008). A diferencia de los procesos que modelan a los deltas marinos, especialmente aquellos que se forman en áreas con importante influencia mareal, de corrientes y del oleaje; en los ambientes lacustres, las mareas, las corrientes y la incidencia de las olas puede ser despreciable, por lo que el modelado de los deltas en estos ambientes, es realizado principalmente por la acción progradante de los cauces fluviales, construyendo deltas en forma de abanico o del tipo Gilbert (Gilbert, 1890). Los deltas lacustres han sido ampliamente estudiados en Norte, Centro y sur América, Europa y otras latitudes (PNUMA-OEA, 1997; Bergoeing y Protti, 2006; Galván *et al.*, 1999; Rojas y Le Roux, 2010; Suárez y Emparan, 1995; Ruíz y Carmona, 2004; Jipa *et al.*, 2011).

Por otra parte, los sistemas deltaicos se han utilizado ampliamente para documentar los cambios de la costa impulsados por procesos naturales y por actividades humanas, dada su elevada sensibilidad a las variaciones tanto del nivel del mar como de aportes sedimentarios (Fan *et al.*, 2006; El Banna y Frihy, 2009; Sabatier *et al.*, 2009; Jabaloy-Sánchez *et al.*, 2010). Además, presentan un gran interés ya que es reconocido que los humedales fluvio-deltaicos no antropizados proveen de servicios ecosistémicos como puede ser la regulación hidrológica, que es aquella relacionada con la dinámica de entradas y salidas del agua y sedimentos (Kandus *et al.*, 2010; Pauly y Yáñez-Arancibia, 2013; Cowan *et al.*, 2013). Los efectos de la antropización de las cuencas incrementan la vulnerabilidad de estos sistemas a los riesgos costeros, tales como el aumento del nivel del mar, la intrusión salina y los huracanes, amenazando finalmente los sistemas socio-ecológicos que en ellos se desarrollan (Renaud *et al.*, 2016).

La problemática que afecta a las áreas litorales constituye una fuente inagotable de atención y preocupación para la administración pública (Barragán, 2014). En Honduras, la gestión de los espacios marinos y costeros aparece fragmentada en distintas políticas o estrategias nacionales sectoriales. También existe una profusa, compleja y sobrepuesta normativa relacionada más con la gestión de los recursos costero-marinos, desde una perspectiva sectorial que, con su manejo integrado, lo que dificulta la gestión de estos espacios y recursos (Caviedes *et al.*, 2014).

Los objetivos de este trabajo son: 1) analizar las tasas recientes y las tendencias de progradación del delta en la laguna de Los Micos, ubicada en el Caribe de Honduras; 2) identificar cómo la antropización y los fenómenos meteorológicos extremos han afectado al proceso de formación del delta lacustre; y 3) describir la sucesión vegetal sobre el nuevo terreno ganado por el delta.

2. Descripción del área de estudio

La actual geomorfología costera de Honduras es de origen Holoceno (Pineda-Portillo, 1997) y se encuentra en una etapa avanzada de sedimentación (Carrasco-Navas y Caviedes, 2014). La laguna de Los Micos está ubicada en la costa caribeña de Honduras entre las coordenadas geográficas 15°48'01,38''N y 87°38'24,06''W; 15°46'16,09''N y 87°30'20,30''W (Fig. 1).

La laguna tiene una superficie de 42,80 km² (año 2014), con una profundidad media de 2,1 m y salinidad de 9,31 ± 5,23 ‰ (Carrasco-Navas *et al.*, en preparación); se forma en el tramo marginal del río San Alejo, cuya red de cuenca tributaria es del tipo dendrítico, y tiene un área de 398 km², de los cuales 126 km² corresponden a la planicie aluvial (Carrasco-Navas y Caviedes, 2014). Los suelos en la cuenca alta y media son del tipo Latosoles y de la clase agrológica IV y VII, los cuales requieren medidas de conservación extremas; a pesar de ello, el 40 % de estas zonas han sido deforestadas en las últimas décadas, debido a prácticas agrícolas como la roza y la quema para el establecimiento del cultivo de maíz, frijoles y ganadería, provocando un escenario de alta erodabilidad. Mientras que, la planicie aluvial se caracteriza por suelos de textura fina mal drenados (Castellanos, 1993).

En la laguna fluyen de forma permanente diez corrientes de agua, que aportan un caudal líquido de aproximadamente 12 m³·s⁻¹ y una carga de sólidos suspendidos totales de aproximadamente 30 mg·L⁻¹ (Aspra, 2005). Del caudal total aportado por la cuenca a la laguna, el río San Alejo aporta el 87%.

Las zonas del litoral lagunar más antiguas están dominadas por manglar tipo ribereño (aproximadamente 22 m de altura) compuesto por *Rizophora mangle* y *Laguncularia racemosa* (Rivera-Monroy *et al.*, 2013; Bhomia *et al.*, 2016); mientras que, en las zonas de reciente formación, como es el caso del delta del río San Alejo, dominan especies pioneras.

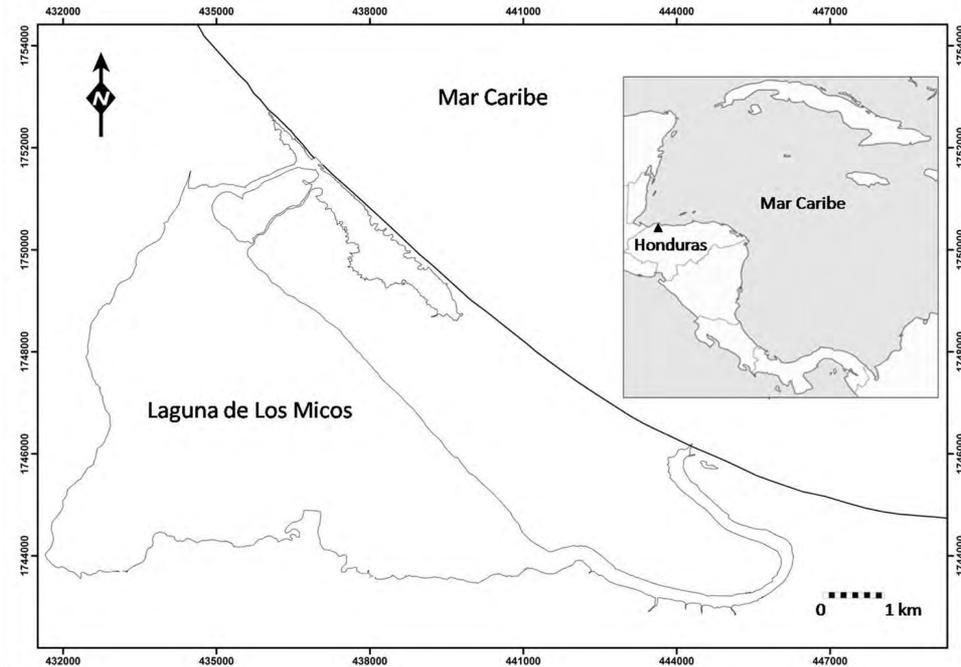


Figura 1: Mapa de ubicación de la Laguna de Los Micos.

Figure 1: Location map of the Los Micos Lagoon.

Las condiciones oceanográficas en el litoral marino adyacente (mar Caribe), se caracterizan por ser un sistema micromareal-mixto predominantemente diurno, con rango máximo de 0,28 m. La altura de ola significativa que supera las 12 horas al año es de 3,39 m, con alturas media de 0,62 y 0,91 m durante las épocas seca y lluviosa respectivamente (Rodríguez, 2006), los vientos predominantes del noreste rara vez superan los 14 km h^{-1} (<https://es.windfinder.com>).

En la zona de estudio los meses más lluviosos son octubre y noviembre ($313,7 \pm 8,9 \text{ mm}$) y los más secos son mayo y junio ($87,5 \pm 18,9 \text{ mm}$), siendo la precipitación acumulada $2.957 \pm 482 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (IHCIT, 2012). La laguna de Los Micos se encuentra estacionalmente separada del mar por una barra de arena. Durante los meses más secos el caudal de los ríos que desembocan en la laguna disminuye y los procesos dinámicos del litoral marino (ej. oleaje, aporte de sedimentos) dominan sobre los pro-

cesos fluvio-lagunares (caudal de descarga), formando de nuevo en dirección de este a oeste una barra de arena que separa la laguna del mar (Carrasco-Navas y Flores, 2008). Mientras que, durante la época lluviosa los caudales de los ríos que fluyen a la laguna aumentan, elevando el nivel de la laguna hasta sobrepasar y erosionar la barra de arena que la separa del mar, restableciéndose así la comunicación con el mar. La dinámica descrita ha sido ampliamente explicada en sistemas similares en Sudáfrica por Perissinotto *et al.* (2002).

Según el Servicio Meteorológico Nacional de Honduras (<http://www.smn.gob.hn>), entre los años 1950 y 2017, el país fue azotado por 32 huracanes, teniendo todos en su trayectoria el área de estudio. En octubre de 1998, la zona de estudio fue azotada por el huracán Mitch de categoría 5, siendo este uno de los huracanes más fuertes que ha pasado por Honduras durante el siglo XX (Bell *et al.*, 1999; Smith *et al.*, 2002).

2.1. Evolución Antrópica Histórica

Los grandes cambios antropogénicos y consecuentemente morfológicos en la planicie aluvial y en la laguna de Los Micos, se iniciaron en la década de los años 1960s, debido al reemplazo de humedales (bosque inundable) por el monocultivo de palma de aceite (*Elaeis guineensis*) (Carrasco-Navas y Flores, 2012). En la actualidad las plantaciones de palma aceitera sobrepasan las 8.000 ha (Carrasco-Navas y Caviedes, 2014).

Asociado a las plantaciones de palma de aceite se construyó una densa red de avenamiento, y se canalizaron ocho kilómetros del tramo marginal del río San Alejo (Carrasco-Navas y Flores, 2008; Pascal *et al.*, 2013) (Fig. 2). Con la canalización del río se eliminaron los meandros, por lo que la capacidad de retención de sedimentos del cauce fluvial se encuentra en un nivel crítico (Pascal *et al.*, 2013); por otra parte, la canalización también ha limitado la conexión sedimentológica del río con su planicie de inundación, propiciando que gran parte de la carga de sedimentos solo pueda depositarse en la interfase río-laguna, acelerando la progradación de un delta sobre la laguna de Los Micos (Carrasco-Navas, 2014).

Se estima que, debido a la continua expansión del monocultivo de palma de aceite, al crecimiento urbano y turístico en zonas de la cuenca de la laguna de Los Micos, se incrementará en el corto y medio plazo la carga de sedimentos que llegan a la laguna, agudizando los actuales problemas de azolvamiento y eutrofización (Pascal *et al.*, 2013).

3. Metodología

3.1. Análisis de imágenes Landsat

Para determinar la tasa de avance y/o retroceso del delta de la laguna de los Micos, se utilizó un sistema de información geo-

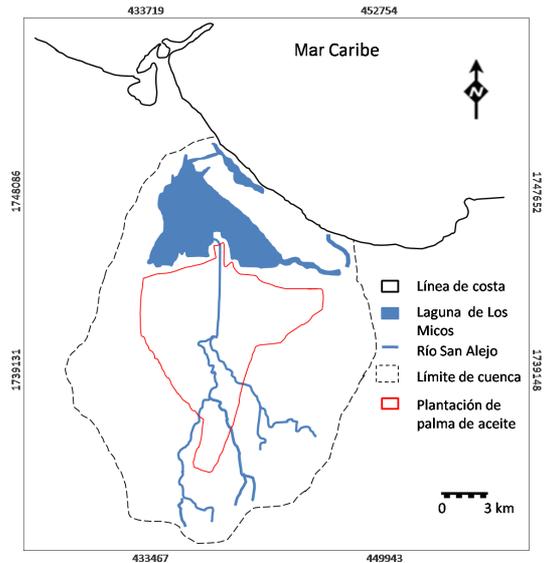


Figura 2: Cuenca hidrográfica del río San Alejo.

Figure 2: San Alejo river watershed.

gráfica (ArcGis®). Los datos utilizados fueron, el mapa cartográfico a escala 1: 50.000 (Tela 1604 WGS84) obtenido en el Instituto Geográfico Nacional y cuatro imágenes Landsat de la zona de estudio de cuatro fechas diferentes: 03/04/1984, 02/03/1999, 03/03/2010 y 03/02/2014, con una resolución espacial de 30 m, obtenidas de forma gratuita de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<http://glovis.usgs.gov>). Las imágenes se georeferenciaron con el Sistema Geodésico Mundial 1984 (Elipsoide WGS-84), que se trata de un estándar en geodesia, cartografía, y navegación, con un error de cálculo menor a 2 cm, ya que se basa en el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Para la georreferenciación se establecieron puntos de control sobre referencias conocidas. El enlace y reasignaciones de la proyección elegida sobre el mapa cartográfico e imágenes satelitales se realizó mediante una transformación polinómica de segundo orden, acorde a Saalfeld (1985) y Tobler (1994).

3.2. Cálculo de la variación espacio temporal del frente deltaico

Para determinar la tasa de avance y/o retroceso del delta lagunar, se utilizó el mapa cartográfico 1604 WGS84 como georeferencia y líneas de base recta en el litoral lagunar para determinar una línea base del delta usando la imagen 1984. Posteriormente, utilizando el programa ArGis, se generaron polígonos de las áreas ganadas por el delta sobre imágenes Landsat correspondientes a las fechas ya mencionadas, abarcando un periodo de 30 años.

A cada polígono se le calculó el área. Los cambios de superficie del delta, se calcularon por la diferencia entre las áreas de los polígonos correspondientes a los cuatro periodos estudiados. Las tasas de ganancia o pérdida de área deltaica, se estimaron dividiendo el área del polígono correspondiente a cada periodo estudiado, entre el número de años transcurridos.

Las pérdidas de superficie lagunar se estimó a partir de una línea de base recta, trazada en la base del delta conforme a la línea del litoral adyacente, y, restando a la superficie lagunar el área ganada por el delta durante los distintos periodos (Tabla 1). Mientras que el avance lineal del delta se estimó calculando la distancia (m) de la posición de la línea base del delta

respecto a la posición de la línea de costa en los años 1984, 1999, 2010 y 2014.

3.3. Pronóstico de la posición de la línea de costa

La tendencia de la posición de la línea de costa del delta para los años 2024, 2034 y 2044, se estimó a partir de la línea de base recta trazada en la base del delta; asumiendo que, las tasas de avance y retroceso calculadas durante el periodo 1984-2014 se mantendrán en el periodo a pronosticar. Las tasas se calcularon para los años 2024, 2034 y 2044, abarcando un periodo de 30 años, similar al periodo estudiado.

Para ello, se utilizó la Función Pronóstico de la hoja de cálculo de Microsoft Excel. Esta función toma un rango de valores existentes y los utiliza para realizar el cálculo de un valor futuro, utilizando para ello una regresión lineal, en nuestro caso al 95% de confianza. Esta función utiliza la siguiente sintaxis:

- Pronóstico (x ; conocido_ y ; conocido_ x).
- x = El año para el cual se realizará el pronóstico, es decir, este valor x tendrá un valor y pronosticado por la función.
- Conocido y = rango histórico de las tasas de progradación o de retroceso.
- Conocido x = años para los que se conocen las tasas de progradación o de retroceso.

Tabla 1. Progradación del delta en la laguna de Los Micos.

Table 1. Delta progradation in the Los Micos lagoon.

Año	Área del delta interior (ha)	Periodo	Tasa de progradación ($\text{ha}\cdot\text{a}^{-1}$)	Progradación en superficie (ha)	Tasa de progradación ($\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$)	Progradación del frente deltaico (m)
1984	306	1984-1999	9,00	135	46,67	699,97
1999	441	1999-2010	5,18	57	28,45	312,88
2010	498	2010-2014	2,75	11	35,11	140,44
2014	509	1984-2014	6,77	203	38,45	1153,29

3.4. Sucesión la comunidad vegetal en el área ganada por el delta

El estudio de la colonización y sucesión de las comunidades vegetales en las áreas ganadas por el delta a la laguna de Los Micos se realizó: 1) Conforme a los polígonos digitalizados, se identificaron áreas en el terreno equivalentes a los periodos estudiados, 2) de acuerdo a los cambios en la comunidad vegetal observados en las imagen de Google Earth (año 2014), se identificaron un total de siete sitios de verificación en el terreno (Fig. 4), 3) en cada sitio de verificación se trazó un transecto, que de acuerdo a las características de la comunidad tuvo las siguientes dimensiones: 30 x 4 m en áreas con bosque de manglar continuo y de 100 x 4 m en zonas fragmentadas y/o con vegetación abierta. En cada transecto se identificaron las especies de la comunidad vegetal. Todas las identificaciones se realizaron *in situ*, no se recolectaron especímenes.

4. Resultados

4.1. Evolución del delta en el periodo 1984-2014

4.1.1. Laguna de Los Micos

En 1984 el delta formado por el río San Alejo sobre la laguna tenía un área aproximada de 306 ha. A partir de entonces y hasta 2014, ha ocurrido una progradación de 203 ha, con una tasa de $6,77 \text{ ha}\cdot\text{a}^{-1}$, siendo el área del delta (enero de 2014) de 509 ha (Tabla 1). Por lo tanto, la pérdida de superficie lagunar durante el periodo de estudio es de aproximadamente el 4,61%.

El periodo de mayor progradación del delta ocurrió entre 1984 y 1999; durante este periodo la tasa de avance lineal del delta fue de $46,67 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, siendo el avance del frente deltaico de 699,97 m, obteniendo una ganancia media de terreno sobre la laguna de $9 \text{ ha}\cdot\text{a}^{-1}$, superando en un 33% la ganancia media de

superficie deltaica estimada para todo el periodo. La superficie total ganada durante este periodo fue de 135 ha, estimándose que la línea de costa avanzó el 67% del total estimado para el periodo analizado. Lo descrito supone que la mayor pérdida de superficie de la laguna se produjo, posiblemente, tras el efecto combinado de la actividad humana (canalización del tramo bajo del río San Alejo y cambio de usos del terreno) y el paso del huracán Mitch (Tabla 1).

4.2. Tendencias futuras del delta

La función de pronóstico muestra, que de mantenerse la tendencia de progradación estimada para el periodo 1984-2014 ($38,45 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$), para los años 2024, 2034 y 2044 la línea de costa del delta tendrá un avance aproximado de 565, 1.177 y 1.838 m, respectivamente. De ser así, para el año 2044 la línea de costa del delta estará ubicada a tan solo 1.200 m del litoral opuesto (Fig. 3).

En cualquier caso, hay que tener en cuenta que durante el periodo utilizado para la estimación de la tendencia se produjeron cambios importantes en la cuenca, así como la llegada de un huracán de muy elevado periodo de recurrencia. La cuestión es que dichos cambios en la cuenca se están manteniendo y en un periodo como el que se busca el pronóstico sería susceptible de recibir algún huracán de esas características.

4.3. Sucesión de la comunidad vegetal en el área ganada por el delta

El acelerado avance del delta sobre la laguna de Los Micos favorece los rápidos procesos de sucesión primaria. El terreno recién formado (a partir de 1984) en las zonas distales, es colonizado en aproximadamente tres años, por una comunidad vegetal compuesta por especies pioneras (fase inicial de la sucesión). Estas zonas están asociadas a las desemboca-

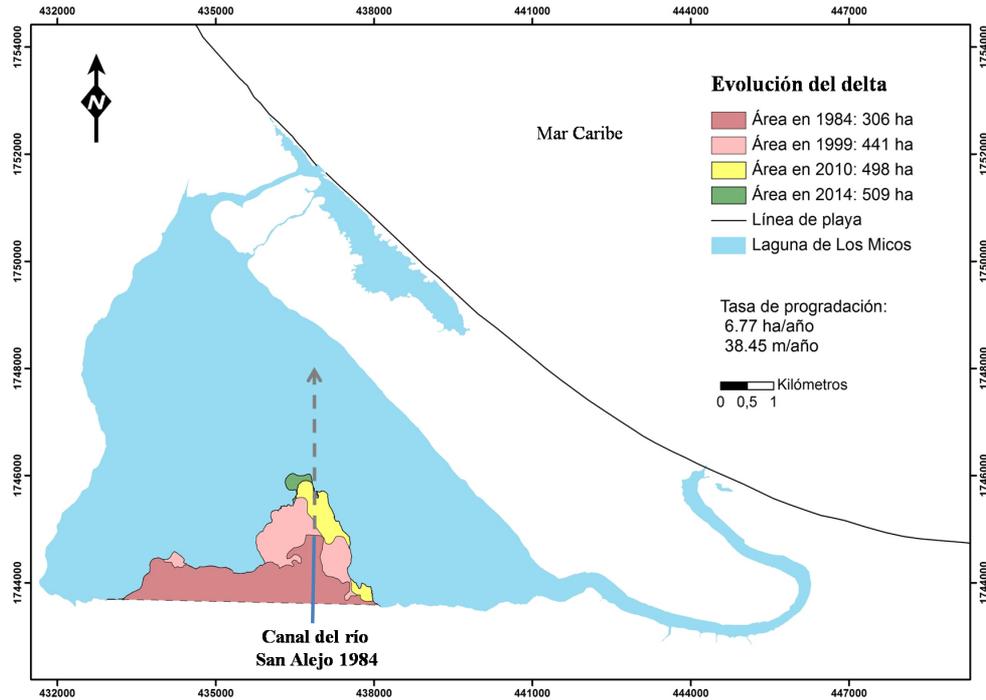


Figura 3: Mapa de evolución del delta de la laguna de Los Micos entre 1984 y 2014: a) área del delta en 1984, b) área del delta en 1999, c) área del delta en 2010, d) área del delta en 2014.
Figure 3: Evolution map of Los Micos lagoon delta between 1984 and 2014: a) delta area in 1984, b) delta area in 1999, c) delta area in 2010, c) delta area in 2014.

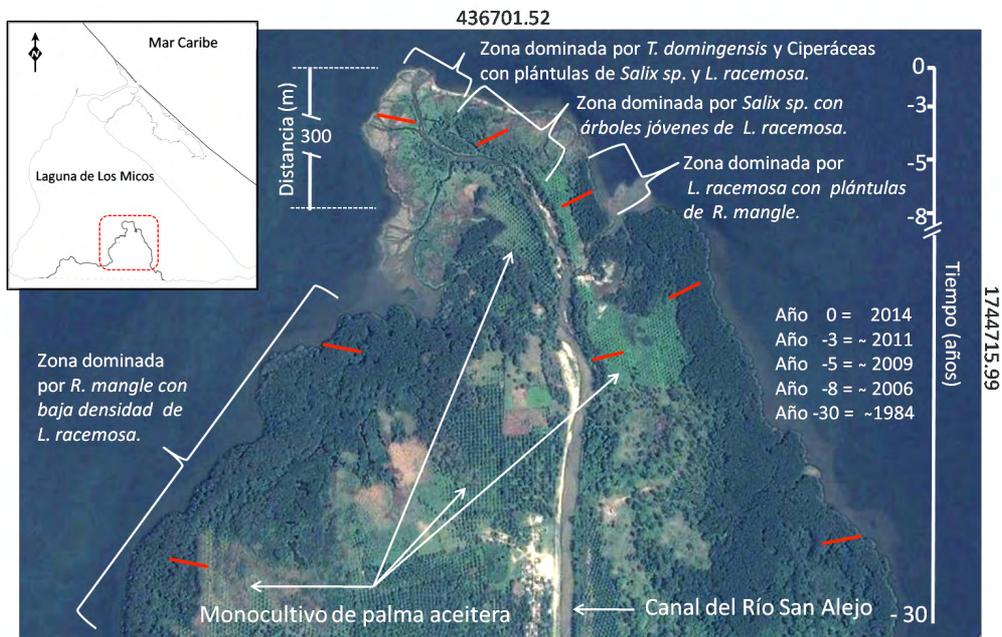


Figura 4: Dinámica de sucesión de la comunidad vegetal.
Figure 4: Vegetable community succession dynamic.

duras fluviales y áreas deprimidas en la nueva línea de costa. La comunidad vegetal emergente está dominada por *Typha domingensis*, ciperáceas y en menor densidad por plántulas de *Salix sp.* y *L. racemosa*. Sobre zonas del delta formadas aproximadamente entre los tres y cinco años, se observa una comunidad vegetal dominada por densos rodales de *Salix sp.* con árboles jóvenes de *L. racemosa* (fase media de la sucesión).

Las zonas emergidas aproximadamente entre los 5 y 8 años, se encuentran dominadas por *L. racemosa* con plántulas de *R. mangle*. Sobre suelos más antiguos (> 8 años) el manglar paulatinamente va ganando la estructura característica del bosque maduro (inicio de la fase de maduración) descrita por Rivera-Monroy *et al.* (2013); durante esta fase la comunidad es dominada por *R. mangle* con una altura media que oscila entre los 20 y 25 m, y con baja densidad de *L. racemosa* (fase de maduración). En las zonas más antiguas del delta, la dinámica sucesional es interrumpida por la tala del manglar para el establecimiento de palma aceitera (Fig. 4).

5. Discusión

De forma natural las lagunas costeras presentan una alta velocidad de cambio, evolucionando a sistemas colmatados entre los 1000 y 5000 años, por lo que desde un punto de vista geológico se consideran sistemas efímeros (Schubel *et al.*, 1971). Los deltas en las zonas marinas están en continua evolución, ya sea en avance o retroceso (Corrales *et al.*, 1977); en cambio, los deltas en sistemas lacustres se caracterizan por el avance continuo. La evolución observada en el delta de la laguna de Los Micos es típica de ambientes deposicionales dominados por la acción de los ríos, caracterizada por la continua progradación en forma de abanico (Gilbert, 1890).

El avance del delta en la laguna de los Micos, al igual que otros deltas lagunares, es mu-

cho mayor a lo que generalmente ocurre en deltas marinos, lo cual se debe a la ausencia significativa de erosión generada por agentes oceanográficos, como pueden ser las corrientes de deriva, el oleaje y el viento. Aunque en la laguna de Los Micos no se han realizado estudios de corrientes de deriva ni del oleaje interno, el efecto de estos agentes en la forma y en la dinámica del delta es asumiblemente escasa. Esto se evidencia por la forma de abanico bastante simétrica del delta, así como, por la ausencia de barras o flechas en el frente deltaico, con orientaciones distintas a la del cauce del río San Alejo (Fig. 3). Tampoco se observa la aparición de flechas o formas cuspidadas en otras zonas del interior de la laguna, típicas de aquellas que presentan corrientes de cierta entidad (Bird, 1968).

El permanente aporte de material desde la cuenca a través de los ríos, se ve favorecido por el clima lluvioso y el deterioro de la cuenca del río San Alejo, lo que viene a incrementar el avance del delta. Debido a que la comunicación entre la laguna y el mar es sincrónica a las épocas seca (fase cerrada) y lluviosa (fase abierta) (Carrasco-Navas, 2014), los procesos de colmatación lagunar podrían ser diferenciados. Durante la época lluviosa la colmatación podría estar dominada por materiales de mayor tamaño (ej. arena y materia orgánica particulada) que se depositan cerca de la desembocadura del río San Alejo; mientras, una fracción de materiales finos es exportada al mar a través de la boca estuarina. Por otra parte, durante la época seca el caudal de los ríos aportantes disminuye acarreado una carga menor, por lo que los aportes de material al fondo lagunar estarían controlados por partículas coloidales desde la columna de agua.

Las comunidades vegetales en las áreas ganadas por el delta del río San Alejo, pueden ser un indicador del acelerado proceso de progradación del delta. Debido a que la comunidad vegetal en las nuevas áreas es distinta a la

del bosque de manglar, que es la comunidad característica del litoral lagunar, la comunidad observada es característica de riveras o llanuras de inundación (ej. *Salix sp.*) (González del Tánago y García de Jabaloy, 1998). Además, se pudo observar que el bosque de mangle domina en la desembocadura de los otros nueve ríos que vierten a la laguna.

La comunidad vegetal emergente puede tener un papel importante en el proceso de acreción del delta, debido a que puede actuar como una fuente de retención de sedimento y de aporte de la materia orgánica, lo que favorece la formación de coloides y a la sedimentación de materiales finos. Procesos similares de colonización-colmatación se describen en el delta del Ebro por Ollero Ojeda (1993).

La desconexión sedimentológica del río con su llanura de inundación y con ello la reducción del área de distribución de la carga de sedimentos, ha favorecido el transporte unidireccional de una fracción significativa de la carga sólida hasta la interfase río-laguna. Ruíz y Carmona (2004) señalan que la canalización paulatina del marjal que bordea la Albufera de Valencia (España), iniciada durante el siglo XVIII, ha favorecido una alta tasa de progradación del delta del Barranc de Torrent sobre dicha albufera, funcionando como una vía significativa en el transporte de sedimentos al delta, sobre todo durante tormentas extremas.

La tasa de progradación estimada para el periodo de estudio en el delta de la laguna de Los Micos ($38,45 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$), es mucho mayor a la registrada para otros deltas lacustres en la región Mesoamericana. Por ejemplo, la tasa de progradación para el delta del Río Frío en el lago Nicaragua o Cocibolca (Nicaragua), se ha estimado en $1 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ (PNUMA-OEA, 1997; Bergoing y Protti, 2006).

Un factor clave que podría determinar las diferencias entre las tasas de progradación del delta del Río Frío con nuestra zona de es-

tudio, es que parte de la cuenca del Río Frío se encuentra en un área protegida (Sáenz-Sánchez *et al.*, 2006) y que este río conserva los meandros que pueden actuar como trampas naturales de sedimentos. En contraste a lo observado en la laguna de Los Micos, en el lago Nicaragua las acciones de conservación han contribuido a mantener una carga sedimentaria baja.

Más al norte, Galván *et al.* (1999) estudiaron para un periodo de 34 años (1962-1996), la influencia del transporte fluvial de sedimentos sobre la evolución de la laguna costera de Sontecomapan (Golfo de México). Estimaron una tasa de pérdida de superficie lagunar de aproximadamente $2,25 \text{ ha}\cdot\text{a}^{-1}$ debido al avance de un delta. Esto es un 66 % menor a la tasa de progradación observada en la laguna de Los Micos ($6,77 \text{ ha}\cdot\text{a}^{-1}$). Los avances de los deltas interiores en la Albufera de Valencia y en la laguna de Sontecomapan están asociados a la erosión causada por cambios de uso del suelo, principalmente por la agricultura. Es de destacar que, a diferencia de lo ocurrido en la laguna de Los Micos, los ríos que fluyen a la laguna Sontecomapan no están canalizados, y en el caso de la albufera de Valencia, está libre del efecto de huracanes, lo que permite explicar mejor las tasas de progradación.

En septiembre de 1974 la zona de estudio fue azotada por el huracán Fifi (CEPAL, 1974) con características similares a las del Mitch (oct. 1998) (Smith *et al.*, 2002; Elvir y Kawas, 2012). Este evento de alta energía junto a la ya existente canalización del río San Alejo iniciada en 1965, sugiere que, la tasa de progradación del delta de la laguna de Los Micos entre 1965 y 1984 es cercana a la estimada para el periodo estudiado ($6,77 \text{ ha}\cdot\text{a}^{-1}$). De ahí podría inferirse que el área del delta previo a la canalización del río San Alejo era de aproximadamente 170 ha. Por lo tanto, la progradación del delta sobre la superficie de la laguna durante el periodo de mayor antropización (1965-2014) se estima en 339 ha, equivalente al 7,7% de

la superficie lagunar para un periodo total de aproximadamente 50 años. Entre 1984 y 2014, el frente deltaico tuvo un avance de 1153,29 m, siendo la tasa media de progradación de $38,45 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ (Tabla 1).

El mayor avance del delta lagunar, se observa en el periodo 1984-1999, por lo que podría estar relacionado con una significativa carga de material transportado desde la cuenca durante el paso del huracán Mitch. Durante este evento, la precipitación sobrepasó los 990 mm en cuatro días (Elvir y Kawas, 2012; www.weather.unisys.com), superando en más de tres veces la precipitación promedio para la zona de estudio y durante el mes de octubre (IHCIT, 2012).

La rápida evolución del delta en la laguna de Los Micos, descrita a partir de los datos obtenidos con las imágenes, se hace evidente también a partir de estudios sobre el contenido de carbono orgánico (CO) en sedimentos en distintas partes del litoral lagunar. Rivera-Monroy *et al.* (2013), observaron diferencias significativas en los valores promedio del cociente C (orgánico): N (por masa) en los sedimentos del delta en comparación con sedimentos de otras zonas del litoral lagunar. Estos autores, encontraron que el valor promedio del cociente C: N es menor en sitios localizados en el delta (C: N= $13,6 \pm 0,79$), donde el bosque de manglar es joven y monoespecífico (*L. racemosa*); mientras, que este cociente es mayor en otras áreas del litoral lagunar donde el suelo es maduro, la estructura forestal es variable (ej. *R. mangle* y *L. racemosa*) y la productividad es más alta (C: N= $29 \pm 0,87$). Estos datos concuerdan con lo señalado por Bhomia *et al.* (2016), quienes indican que, en los sedimentos del delta de la laguna de Los Micos, hay aproximadamente cuatro veces menos concentración de CO en comparación con otros sitios muestreados en el litoral lagunar. Ambos autores muestran que en el sedimento del delta el 76,5% del CO se encuentra entre los 0 y 100 cm de profundidad y que solamente el 23,5% está por

debajo de los 100 cm, mientras, que en otros sitios del litoral lagunar (donde el suelo es más antiguo) la concentración media de CO se distribuye en un 45,5% entre 0 a 100 cm, y el 54,7 % por debajo de los 100 cm.

La variación espacial del CO entre los sedimentos, el litoral lagunar y el delta, evidencia la naturaleza reciente del delta. En el litoral el almacenamiento de CO es mayor, reflejando la permanencia y grado de desarrollo del bosque de manglar desde el punto de vista de formación de suelo. Mientras que, en los sedimentos del delta, la concentración de CO es mucho más baja (Rivera-Monroy *et al.*, 2013); esto se debe a que la cantidad de aportes de sedimentos es tan grande que no da tiempo al desarrollo de coberturas maduras desde el punto de vista biogeoquímico (Wirth *et al.*, 2009), predominando el contenido de material inorgánico. Aunque, en ambos estudios no se muestrearon sedimentos bajo plantaciones de palma aceitera, no se debe descartar que el remplazo del manglar por el monocultivo de palma de aceite es un factor que puede reducir significativamente el almacenamiento de CO en los sedimentos.

La tendencia de progradación observada en el delta en la laguna de Los Micos, así como las tendencias al aumento de antropización de la cuenca (Pascal *et al.*, 2013), presenta un escenario de potencial segmentación de la laguna en dos cuerpos de agua. Estos cambios morfológicos suelen modificar los ciclos biogeoquímicos, afectando negativamente la salud de los sistemas lagunares (Cloern, 2001).

6. Conclusiones

La antropización de la cuenca del río San Alejo, es un factor determinante en el acelerado proceso de progradación del delta. La ocurrencia de huracanes, con fuertes precipitaciones sobre los suelos degradados y naturalmente vulnerables a la erosión, incrementa

aún más la tasa de progradación del delta sobre la laguna de Los Micos.

Las obras de control hidráulico en la llanura de inundación y en el tramo marginal del río, provocan la desconexión parcial del río de su llanura de inundación, incrementando la sedimentación en la interfase río-laguna. Como resultado se ha formado un delta lacustre, que constituye una unidad geomorfológica antropogénica reciente en progradación continua y acelerada; tanto así, que la comunidad vegetal que domina en el frente deltaico no son los manglares, que es la comunidad característica de las lagunas costeras tropicales.

Las actuales prácticas agrícolas y la tendencia hacia el avance de la frontera agrícola, turística y urbana en el ámbito geográfico de la laguna, sugieren que la tasa de progradación deltaica se acelerará, por lo que se corre el riesgo de que la laguna de Los Micos se fragmente en dos cuerpos de agua en el medio plazo. Si bien, la evolución natural de un lagoon costero es la tendencia a la segmentación y la colmatación a largo plazo, los procesos antrópicos antes mencionados están acelerando bruscamente este proceso, como se ha observado en otras partes del mundo.

Con el fin de ralentizar el proceso de avance del delta y la colmatación de la laguna, se propone realizar al menos las siguientes acciones: i) incrementar la masa forestal en la cuenca alta y media; ii) construir diques que actúen como trampa de sedimentos en la cuenca baja; y iii) construir diques en forma de espina de pescado en el tramo del delta, con el fin de redistribuir la carga sólida y reducir la velocidad de descarga del río. Estas acciones deben complementarse con la reforestación de la planicie deltaica, mediante la propagación con esquejes de especies locales (ej. *Pterocarpus officinalis*, *Pachira aquatica*). Esto generaría cobertura forestal de forma rápida (~ 3-4 años) y las condiciones microclimáticas, ecológicas y geomorfológicas

necesarias para el establecimiento de otras especies típicas de la comunidad vegetal autóctona. Mientras, en el litoral deltaico se debería favorecer al establecimiento natural del manglar mediante técnicas silvícolas.

Las acciones propuestas deberían formar parte de un Plan de Gestión Integrada para el ámbito geográfico del hidrosistema lagunar Los Micos, el cual debería contar con el liderazgo coordinado de las instituciones locales y el respaldo de la administración pública a nivel central.

Agradecimientos

Agradecemos al Russell E. Train Education for Nature Programme, por otorgar una beca para la realización de este estudio que es parte de una tesis del Máster Universitario en Oceanografía de la Universidad de Cádiz.

Bibliografía

- Aspra, B. (2005). *Plan de manejo del sistema lagunar costero Los Micos-Quemada*. Ed. OIRSA, Honduras, 32 pp.
- Barragán, J.M. (2014). *Política, gestión y litoral. Nueva visión de la gestión integrada de áreas litorales*. Ed. Tébar Flores, S.L. Madrid, 685 pp.
- Bell, G.; Halpert, M.S.; Ropelewski, C.F.; Kousky, V.E.; Douglas, A.V.; Schnell, R.C.; Gelman, M. (1999). Climate assessment for 1998. *B. Am. Meteorological Society*, 80, 1-48. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-80.5s.1>
- Bergoeing, J.P.; Protti, R. (2006). Geomorfología Paleo-Lacustre del Sur del Lago de Nicaragua. *Revista Geográfica*, 139, 27-38.
- Bird, E. (2000). *Coastal Geomorphology*. An Introduction. Ed. John Wiley and Sons, New York, 322 pp.
- Bird, E (1968) Coastal lagoon dynamics. In: *Geomorphology*. Encyclopedia of Earth Science. Springer, Berlin, Heidelberg, 1200 pp. https://doi.org/10.1007/3-540-31060-6_55
- Bhomia, R.; Kauffman, J.; McFadden, T. (2016). Ecosystem carbon stocks of mangrove forests along the Pacific and Caribbean coasts of Honduras. *Wetlands Ecology and Management*, 24(2), 187-201. <https://doi.org/10.1007/s11273-016-9483-1>

- Carrasco-Navas, J.C. (en preparación). *Ecología microbiana y biogeoquímica de una laguna costera tropical en la vertiente Caribe de Honduras*. Tesis doctoral, Universidad de Cádiz, Cádiz.
- Carrasco-Navas, J.C.; Caviedes, V. (2014). *Diagnóstico de los Ecosistemas Marino-Costeros y de Agua Dulce de Honduras: Basado en Análisis de Viabilidad, Amenazas y Situación*. Ed. ICF-USAID, Tegucigalpa, 106 pp.
- Carrasco-Navas, J. C.; Flores, R. (2008). *Inventario de Humedales de la República de Honduras*. Ed. SERNA, Tegucigalpa, 153 pp.
- Carrasco-Navas, J.C.; Flores, R. (2012). La Palma Africana especie exótica e invasora en los humedales costeros marinos de la vertiente Caribe de Honduras. *I Cong. Gestión Integrada de Áreas Litorales, Esp.*, Cádiz.
- Carrasco-Navas, J.C. (2014). *Caracterización y evolución reciente del delta de los ríos Ulúa y Chamelecón, en la costa Caribe de Honduras*. Tesis Máster, Universidad de Cádiz, Cádiz, 60 pp.
- Castaño, A.; Urrego, L.; Bernal, G. (2010). Dinámica del manglar en el complejo lagunar de Cispatá (Caribe colombiano) en los últimos 900 años. *Revista de Biología Tropical*, 58(4), 1347-1366. <https://doi.org/10.15517/rbt.v58i4.5417>
- Castellanos, V. (1993). *Estudio de los suelos de Bahía de Tela*. Ed. PNUD Mecanograf. Tegucigalpa, 16 pp.
- Caviedes, V.; Arenas-Granados, P.; Carrasco-Navas, J.C (2014). Una contribución a la política pública para el manejo costero integrado de Honduras: Análisis diagnóstico. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 14 (4), 645-662. <https://doi.org/10.5894/rgci461>
- CEPAL, N. (1974). *Informe sobre los daños y repercusiones del huracán Fifi en la economía hondureña*. Ed. CEPAL, Tegucigalpa, 83 pp.
- Cloern, J.E. (2001). Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series*, 210, 223-253. <https://doi.org/10.3354/meps210223>
- Corrales, I.; Sanuy, J.; Sánchez de la Torre, L.; Vera Torres, J.A.; Rosell, J.; Vilas, L. (1977). *Estratigrafía*. Ed. Rueda. Madrid, 718 pp.
- Cowan, J.H.; Yáñez-Arancibia, A.; Sánchez-Gil, P.; Deegan, L. (2013). *Estuarine Ecology*. Ed. Wiley-Blackwell, New York, 568 pp. <https://doi.org/10.1002/9781118412787>
- El Banna, M.; Frihy, O. (2009). Human-induced changes in the geomorphology of the northeastern coast of the Nile delta, Egypt. *Geomorphology*, 107, 72-78. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.06.025>
- Elvir, O.; Kawas, N. (2012). Ruta de la gestión para la reducción del riesgo de desastres en Honduras. *Revista Ciencia y Tecnología*, (9), 4-15. <https://doi.org/10.5377/rct.v0i9.705>
- Fan, H.; Huang, H.; Zeng, T. (2006). Impacts of anthropogenic activity on the Recent Evolution of the Huanghe (Yellow) River Delta. *Journal of Coastal Research*, 22, 919-929. <https://doi.org/10.2112/04-0150.1>
- Galván, F.M.; Arias, H.M.; Cávez, J.M.; Zavala, F.G. (1999). Influencia del transporte fluvial de sedimentos sobre la evolución de una laguna costera. *Hidrobiológica*, 9(2), 145-158. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57890207>
- Gilbert, G.K. (1890). *Lake Bonneville*. Ed. US Geology. Survey Monographic, 1, 438 pp.
- González Del Tánago, M.; García De Jabaloy, D. (1998). *Restauración de ríos y riberas*. Ed. Madrid: mundi-prensa, 319 pp.
- Gutiérrez-Elorza, M. (2008). *Geomorfología*. Ed. Pearson Education, Madrid, 920 pp.
- IHCIT (Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra). (2012). *Atlas climático y de gestión de riesgo de Honduras*. Ed. Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Tegucigalpa, 146 pp. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2007.6642>
- Jabaloy-Sánchez, A.; Lobo, F.J.; Azor, A.; Bárcenas, P.; Fernández-Salas, L.M.; del Río, V.D.; Pérez-Peña, J.V. (2010). Human-driven coastline changes in the Adra River deltaic system, southeast Spain. *Geomorphology*, 119(1-2), 9-22. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.02.004>
- Jipa, D.C.; Stoica, M.; Andreescu, I.; Floroiu, A.; Maximov, G. (2011). Zanclean Gilbert-type fan deltas in the Turnu Severin area (Dacian Basin, Romania). A critical analysis. *Geo-Eco-Marina*, (17), 123. <https://doi.org/10.5281/zenodo.56925>
- Kandus, P.; Morandeira, N.; Schivo, F. (2010). *Bienes y servicios ecosistémicos de los humedales del Delta del Paraná*. Ed. Wetlands International: Fundación Humedales, Buenos Aires, 32 pp.
- Ollero Ojeda, A. (1993). Los elementos geomorfológicos del cauce en el Ebro de meandros libres y su colonización vegetal. *Geographica*, 30, 295-308. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.1993301825
- Pascal, N.; Laurent, J.M.; Erazo, B.; Burgos, E.; Carrasco-Navas, J.; Seibt, A.; Caviedes, V.; Alegría, A. (2013). *Valoración de los servicios ecosistémicos del Parque Nacional Jeannette*

- Kawas – Integrando los beneficios de la naturaleza en la gestión de áreas protegidas y en el desarrollo de Honduras*. Ed. PNUMA, Tegucigalpa, 147 pp.
- Pauly, D.; Yáñez-Arancibia, A. (2013). *Estuarine Ecology*. Ed. Wiley-Blackwell, New York, 560 pp. <https://doi.org/10.1002/9781118412787>
- Peña, J. (2010). Human-driven coastline changes in the Adra River deltaic system, southeast Spain. *Geomorphology*, 119, 9-22. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.02.004>
- Perissinotto, R.; Nozais, C.; Kibirige, I. (2002). Spatio-temporal dynamics of phytoplankton and microphytobenthos in a South African temporarily-open estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 55(1), 47-58. <https://doi.org/10.1006/ecss.2001.0885>
- Pethick, J. (1984). *An introduction to coastal geomorphology*. Ed. University of Hull, Yorkshire, 272 pp.
- Pineda-Portillo, N. (1997). *Geografía de Honduras*. Ed. Guaymuras, Tegucigalpa, 334 pp.
- PNUMA-OEA. (1997). *Estudio de diagnóstico de la cuenca del río San Juan y lineamientos del plan de acción*. Ed. OEA, Washington, D.C. 450 pp.
- Price, S.J.; Ford, J.R.; Cooper, A.H.; Neal, C. (2011). Humans as major geological and geomorphological agents in the Anthropocene: the significance of artificial ground in Great Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1938), 1056-1084. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0296>
- Renaud, F.G.; Szabo, S.; Matthews, Z. (2016). Sustainable deltas: livelihoods, ecosystem services, and policy implications. *Sustainability Science*, 11, 519-523. <https://doi.org/10.1007/s11625-016-0380-6>
- Rivera-Monroy, V.; Castañeda-Moya, E.; Carrasco-Navas, J.; Caviades, V. (2013). *Análisis de Carbono total en Manglares del Parque Nacional Jeannette Kawas, Honduras*. Ed. PNUMA, Tegucigalpa, 30 pp.
- Rodríguez, O. (2006). Algunas características de las mareas en la costa Pacífica y Caribe de Centroamérica. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 24 (1), 51-64.
- Rojas, E.; Le Roux, J.P. (2010). Sedimentary processes on a Gilbert-type delta in Lake Llanquihue, southern Chile. *Andean Geology*, 32(1), 19-32. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=173918582002>
- Ruddiman, W.; Kutzbach, J.E. (1991). Plateau uplift and climate change. *Scientific American*, 264, 66-74. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0391-66>
- Ruiz, J.M.; Carmona, P. (2004). Flujos y sedimentos de inundación (octubre del 2000) en el entorno de la Albufera de Valencia. *Actas de la VIII Reunión Nacional de Geomorfología, Toledo*, 59-67.
- Saalfeld, A. (1985). A fast rubber-sheeting transformation using simplicial coordinates. *American Cartographer*, 12, 169-173. <https://doi.org/10.1559/152304085783915072>
- Sabatier, F.; Samat, O.; Ullmann, A.; Suanez, S. (2009). Connecting large-scale coastal behaviour with coastal management of the Rhône delta. *Geomorphology*, 107, 79-89. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.026>
- Sáenz-Sánchez, I.; Protti-Quesada, M.; Cabrera-Peña, J. (2006). Composición de especies y diversidad de peces en un cuerpo de agua temporal en el Refugio Nacional de Vida Silvestre Caño Negro, Costa Rica. *Revista de biología tropical*, 54(2), 639-645. <https://doi.org/10.15517/rbt.v54i2.14112>
- Schubel, J.R.; Hayes, M.; Pritchard, D. (1971). *The estuarine environment; estuaries and estuarine sedimentation*: in Schubel, JR., Short Course Lecture Notes, Amer. Geological Institute, Washington, D. C.
- Smith, M.E.; Phillips, J.V.; Spahr, N.E. (2002). *Huracán Mitch, caudal de creciente en tramos de ríos seleccionados en Honduras* (No. 2001-4266S). US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Suárez, M.; Emparan, C. (1995). The stratigraphy, geochronology and paleogeography of a Miocene fresh-water interarc basin, southern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 8(1), 17-31. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(94\)00038-4](https://doi.org/10.1016/0895-9811(94)00038-4)
- Tobler, W. (1994). Bidimensional regression. *Geographical Analysis*, 26, 187-212. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1994.tb00320.x>
- Vannote, R.; Minshall, G.; Cummings, K.; Seddel, J.; Cushing, C. (1980). The river continuum concept. *Can. J. Fisheries and Aquatic Sciences*, 37, 130-137. <https://doi.org/10.1139/f80-017>
- Wirth, C.; Messier, C.; Bergeron, Y.; Frank, D.; Fankhänel, A. (2009). Old-growth forest definitions: a pragmatic view. *Old-Growth Forests*. Ed. Springer. Berlin, 375 pp. https://doi.org/10.1007/978-3-540-92706-8_2

Recibido el 20 de mayo de 2018
Aceptado el 8 de marzo de 2019