

DEPÓSITOS SOMEROS DE ACUMULACIÓN DE CONCHAS AFECTADOS POR TORMENTAS EN EL PACÍFICO CENTRAL DE COSTA RICA, FORMACIÓN PUNTA CARBALLO, MIOCENO

SHALLOW-WATER SHELL DEPOSITS AFFECTED BY STORMS IN THE CENTRAL PACIFIC OF COSTA RICA, PUNTA CARBALLO FORMATION, MIOCENE

Teresita Aguilar^{1*} y Raquel Granados²

¹Centro de Investigación en Ciencias Geológicas, Apdo. 214-2060,
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica

²Department of Geology & Geophysics, Texas A&M University, Texas,
Estados Unidos

*Autor para contacto: anatere.aguilar@gmail.com

(Recibido: 29/04/2018; aceptado 17/07/2018)

ABSTRACT: Outcrops at Doña Ana beach (Punta Carballo Formation, Miocene) exhibit proximal tempestites that formed in a shallow platform environment (protected bay) which was episodically affected by strong storms. The preserved fauna in the first layer is mainly composed of bivalves of the *Atrina* genus and show evidence of exhumation and reworking. Six shell-rich beds, which overlay the first layer, are comprised of mollusks (bivalves, gastropods and nautiloids), crabs (carapace fragments and pincers), shark teeth, and carbonized wood fragments and range in thickness from centimeters to decimeters. These beds also exhibit characteristic storm-associated structures, such as cross stratification, hummocky cross stratification, positive gradation, orientation, imbrication, filling structures, erosion, and hiatus. **Keywords:** Paleotempestology, tempestites, shell-beds, storms, Miocene, Costa Rica.

RESUMEN: En los afloramientos de la playa Doña Ana – Formación Punta Carballo, Mioceno – se reconocen tempestitas proximales, depositadas en una plataforma somera (bahía protegida), afectada episódicamente por tormentas fuertes. Se preserva una comunidad constituida principalmente por bivalvos del género *Atrina*, con evidencias de exhumación y remoción, sobreyacida por al menos seis niveles de acumulación de conchas de espesor centimétrico a decimétrico, que contienen diferentes especies de moluscos (bivalvos, gasterópodos y nautiloideos), cangrejos (fragmentos de caparazón y tenazas), dientes de tiburón, así como restos de troncos y ramas carbonizados. Se observan estructuras típicas de tormentas como estratificación cruzada y HCS, gradación positiva, orientación, imbricación, estructuras de relleno, erosión e hiatus.

Palabras clave: Paleotempestología, tempestitas, capas de conchas, tormentas, Mioceno, Costa Rica.

INTRODUCCIÓN

Morton, Gelfenbaum, y Jaffe, (2007) señalan que los tsunamis, las tormentas y los huracanes son las amenazas más peligrosas para las poblaciones costeras y la infraestructura circundante. Según Pielke Jr, Rubiera, Landsea, Fernández y Klein (2003) no existe comunidad costera al norte de los 10 N que sea inmune al efecto de huracanes, mientras que las porciones al sur de los 10 N tienen una probabilidad menor o igual al 1% de ser azotadas por un huracán al año. Aunado a esto, más del 50 % de la población mundial vive en las áreas costeras y mucha gente las visita con frecuencia (Bird, 2008).

Por esta razón, la investigación de esta clase de eventos en el registro sedimentario, permite conocer la frecuencia y las zonas geográficas de afectación, así como servir como referencia para los modelos de evaluación de amenaza e iniciativas de mitigación del riesgo en regiones que podrían ser afectadas por tormentas en el futuro.

En sedimentos marinos someros (plataforma somera), las tormentas son los mecanismos más comunes que afectan la sedimentación, pero la variedad de factores involucrados hace que la interpretación detallada sea difícil. Cuando se forma un depósito de una tormenta, muchas veces es retrabajado físicamente por otras tormentas (carnibalismo) y biológicamente por los organismos oportunistas (bioturbación) (Wiberg, 2000). El retrabajo biológico, a diferencia del retrabajo físico, que es episódico, persiste, aunque su intensidad puede variar (p.e. estacionalmente), destruyendo toda evidencia de estratificación en un tiempo corto (años). Todos estos procesos provocan que los registros de tormentas en áreas costeras sean muy discontinuos y estén sujetos a una fuerte erosión, por lo que tienen muy bajo potencial de preservación. Además, pueden mezclarse con otros depósitos causados por diversos eventos, por lo que son difíciles de reconocer. Los depósitos formados por tormentas se conocen como tempestitas o tormentitas, las cuales probablemente se forman durante caídas del nivel del mar y se preservan mejor

durante los niveles de mar más bajos (*lowest sea level stand*).

Según Einsele (2000), las tempestitas son capas de arena, lutitas y lodolitas, parecidas a hojas (*sheet-like*), de extensión lateral considerable, formadas por olas de tormentas, que tienen un fuerte impacto en sedimentos sublitorales por agitar y remover arena y cantos, algas, troncos, detrito de conchas diverso y material de grano fino. Después de que la tormenta ha disminuido, el material en suspensión es redepositado, ya sea directamente en el sitio en que se produjo la erosión (sitio de retrabajo, tempestita) o es transportado en suspensión hacia aguas profundas y depositado como una turbidita. Además, el mismo autor indica que el tamaño del grano de las tempestitas es variable, desde arenas gruesas y gravas a lutitas y lodolitas, y que para su formación requieren ya sea aporte terrígeno o suficiente aporte biogénico.

Wendt y Aigner (1982) mencionan diversos criterios que permiten reconocer sedimentos que se originaron en un ambiente somero como las tempestitas, entre ellos: cambios rápidos en el espesor y en las facies, a veces combinados con erosión en la base o discontinuidades; estructuras de ojo de pájaro y “*teepee*”; orientación e imbricación de esqueletos de organismos en los niveles de condensación causada por corrientes y estratificación cruzada. Adicionalmente, Hamblin y Walker (1979) sugieren que estratificación cruzada tipo hummocky cross stratification (HCS), es característica de corrientes de alta densidad bajo la influencia de olas de tormenta por debajo de la base de las olas de buen tiempo. Williams (2011) indica que las capas de conchas generadas por tormentas tienen características morfológicas, sedimentológicas y biogénicas distintivas. En el caso de las conchas de bivalvos, las valvas se preservan predominantemente desarticuladas, retrabajadas y transportadas.

Por ser depósitos frecuentes y por ser de los procesos que más muertes causan, Liu (2004) acuña el término Paleotempestología, para incluir la perspectiva temporal, no únicamente a partir de documentos históricos sino también del registro geológico.

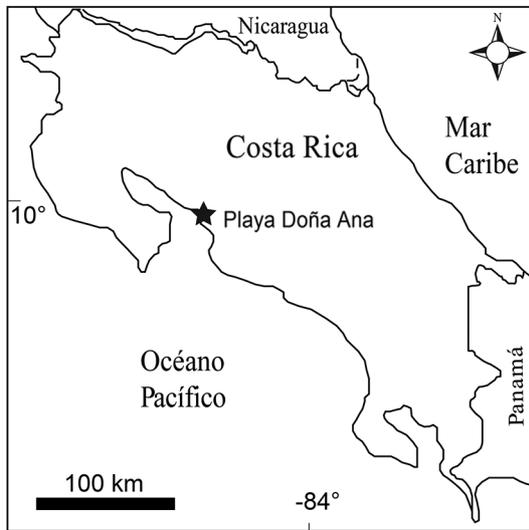


Fig. 1: El área de estudio, playa Doña Ana, ubicado en las coordenadas 9°57.410' N y 84°44.352' W.

CONTEXTO GEOLÓGICO

Durante el Neógeno, particularmente en el Mioceno, existieron diversas cuencas sedimentarias en el arco frontal de Costa Rica, las cuales representan complejas interacciones entre diferentes procesos como la tectónica (tanto subsidencia como levantamientos), los cambios de nivel del mar, la actividad volcánica y los eventos hidrometeorológicos. Las facies que conforman el relleno de estas cuencas se desarrollaron principalmente en ambientes de plataforma somera, litorales y continentales (Schmidt y Seyfried, 1991). En estos ambientes es frecuente encontrar depósitos de tormentas interrumpiendo la depositación normal. Un caso es la cuenca de Parrita, una bahía costera formada por movimientos transtensionales (strike-slip), donde se conservan varios niveles de tempestitas asociadas a la Formación Punta Judas del Mioceno Medio (Seyfried, Sprechmann y Aguilar, 1985; Schmidt y Seyfried, 1991; Seyfried, Krawinkel y Aguilar, 1994).

Además, la cuenca Tárcoles, en la cual se encuentra la Formación Punta Carballo, presenta

una secuencia de poca profundidad (plataforma somera), con estructuras que pueden ser asociadas a depósitos de tormentas, específicamente en la playa Doña Ana, ubicada en las coordenadas 9°57.410' N y 84°44.352' W (Fig. 1), donde aflora una secuencia heterolítica, formada principalmente por areniscas y conglomerados, de colores grises a verdes, una toba vítrea y varios niveles fosilíferos, en una matriz fina, formados por acumulación de conchas. Estas rocas fueron descritas detalladamente por Kuijpers (1979), como parte del Miembro Roca Carballo de la Formación Punta Carballo.

Kuijpers (1979) indica que las rocas son principalmente volcarenitas y volcaruditas de color gris a verde, y que se notan colores rojos y blancos localmente en la base. Destacan fragmentos de rocas andesíticas, plagioclasas, conchas y a veces troncos fosilizados. Además, menciona una toba vítrea y dos niveles de acumulación de fósiles. Entre las estructuras sedimentarias, menciona la presencia de laminación paralela, estratificación cruzada, laminación cruzada, a veces con pequeñas discordancias entre las láminas, ripples y estructura en arenque (*herringbone*). En algunas partes estas estructuras desaparecen por bioturbación, formando principalmente icnofósiles tipo *Thalassinoides* y *Ophiomorpha*. Kuijpers (1979) también destaca la presencia de dos horizontes con gran acumulación de fósiles – el inferior con un espesor de 25 cm y el superior de 50 cm – incluidas en un sedimento barroso. La mayoría de las conchas de esos niveles son parautóctonas y se encuentran bien preservadas. En algunos lugares hay conchas en posición vital. A veces se observan conchas (ostras) muy fragmentadas. También menciona lentes de conchas, principalmente en las partes de sedimento más grueso e indica que el contenido faunístico de los dos horizontes es diferente, la capa superior presenta un espectro faunístico marino y diverso, mientras que la inferior incluye muchas especies eurihalinas y de baja diversidad.

Denyer, Aguilar y Alvarado (2003) describen la facies Doña Ana, dentro del Miembro Roca

Carballo, consistiendo de areniscas de grano medio a grueso, con estratos de espesores decimétrico a métrico, color verde a gris verdoso claro, con abundantes restos de fósiles recristalizados, principalmente moluscos, foraminíferos, equinodermos, tenazas de cangrejos y placas de balanideos. Además, varios niveles de acumulación de conchas de espesor decimétrico, que evidencian corrientes fuertes.

METODOLOGÍA

En el presente trabajo se analizaron detalladamente las rocas que afloran en playa Doña Ana, mediante varias visitas al campo, enfocándose en los acantilados de la parte norte y central y en menor detalle los afloramientos ubicados al sur. Se buscaron estructuras que pudieran ayudar a esclarecer el origen de los depósitos, principalmente superficies de erosión y estructuras internas de los estratos o paquetes de estratos, como laminaciones, gradaciones e icnofósiles. Además, se hizo un reconocimiento rápido de los fósiles, tanto de la comunidad de *Atrina*, como de las acumulaciones de conchas, incluyendo su preservación, disposición en los estratos, rellenos, etc., con fines de determinar los mecanismos de depositación. Se hicieron algunos conteos y observaciones de la posición de las conchas en los estratos y de la abundancia relativa de las diferentes especies.

Se requirieron estudios más detallados para conocer las características de los diferentes eventos que afectaron el área.

LITOFACIES Y AMBIENTE DE DEPOSITACIÓN

Norte playa Doña Ana

En la parte inferior de la secuencia, en el extremo norte del acantilado de la playa Doña Ana, se observa un nivel de areniscas finas a muy finas, de unos dos metros y medio de espesor, que presenta grupos de organismos en posición vital, formando una comunidad. Algunos individuos se

encuentran removidos y la mayoría están preservados como moldes internos, con las valvas conjugadas, mientras unos pocos conservan partes de la concha. Estos organismos corresponden principalmente con bivalvos que pertenecen a los géneros *Atrina* sp., *Clementia* sp., *Tivela* sp., *Chione* sp., *Pitar* sp., *Cardium* sp., fragmentos de Ostras (*Crasostrea?* sp.) (Fig. 2a–d) y de gasterópodos. Además, se observa un nivel de concreciones decimétricas con posibles restos de vertebrados (Fig. 2e–f). Los sedimentos presentan oxidación y exhiben una coloración café rojiza. Los individuos del género *Atrina* son los más abundantes y se pueden encontrar en grupos (Fig. 2g), en posición vital, con algunos ejemplares exhumados y removidos, preservados en su mayoría como moldes internos (Fig. 2a). Los bivalvos de la familia Pinnidae (a la que pertenece *Atrina*), viven enterrados en sedimentos finos (lodosos), en bahías tranquilas, con el extremo puntiagudo hacia abajo, anclándose con el *bisus* y con el extremo posterior de la concha sobresaliendo a la superficie. Estos organismos tienen conchas parcialmente nacaradas (aragoníticas), por lo que se disuelven fácilmente durante la diagénesis temprana (Keen, 1971) (Fig. 2a), lo que favorece la preservación como moldes internos. Sobreyaciendo los niveles anteriormente descritos, aflora un espesor de aproximadamente 4 metros de areniscas muy limpias, medias a gruesas, con estratificación cruzada y laminación paralela, apenas visible en algunas partes debido al fuerte retrabajo biológico. Las areniscas contienen algunos restos de *Atrina* sp. y muchas valvas de bivalvos, en posición estable (Fig. 2h). Hacia arriba afloran unas areniscas muy volcánicas hasta tobas (de cinco a seis metros de espesor) fuertemente bioturbadas y con bandas tipo *liesegang* (Fig. 3a).

En el extremo norte de la secuencia, se encuentra la comunidad de *Atrina* sp., que habitaba en un ambiente de bahía tranquila. En condiciones de tiempo normal, la bahía estaba protegida del oleaje fuerte, sin embargo, bajo condiciones especiales, podrían ser afectadas por tormentas y huracanes. Esto coincide con lo indicado por Kuijpers (1979) para el Miembro roca Carballo, según él depositado en un golfo o bahía ancha, afectado por corrientes de marea y protegido del

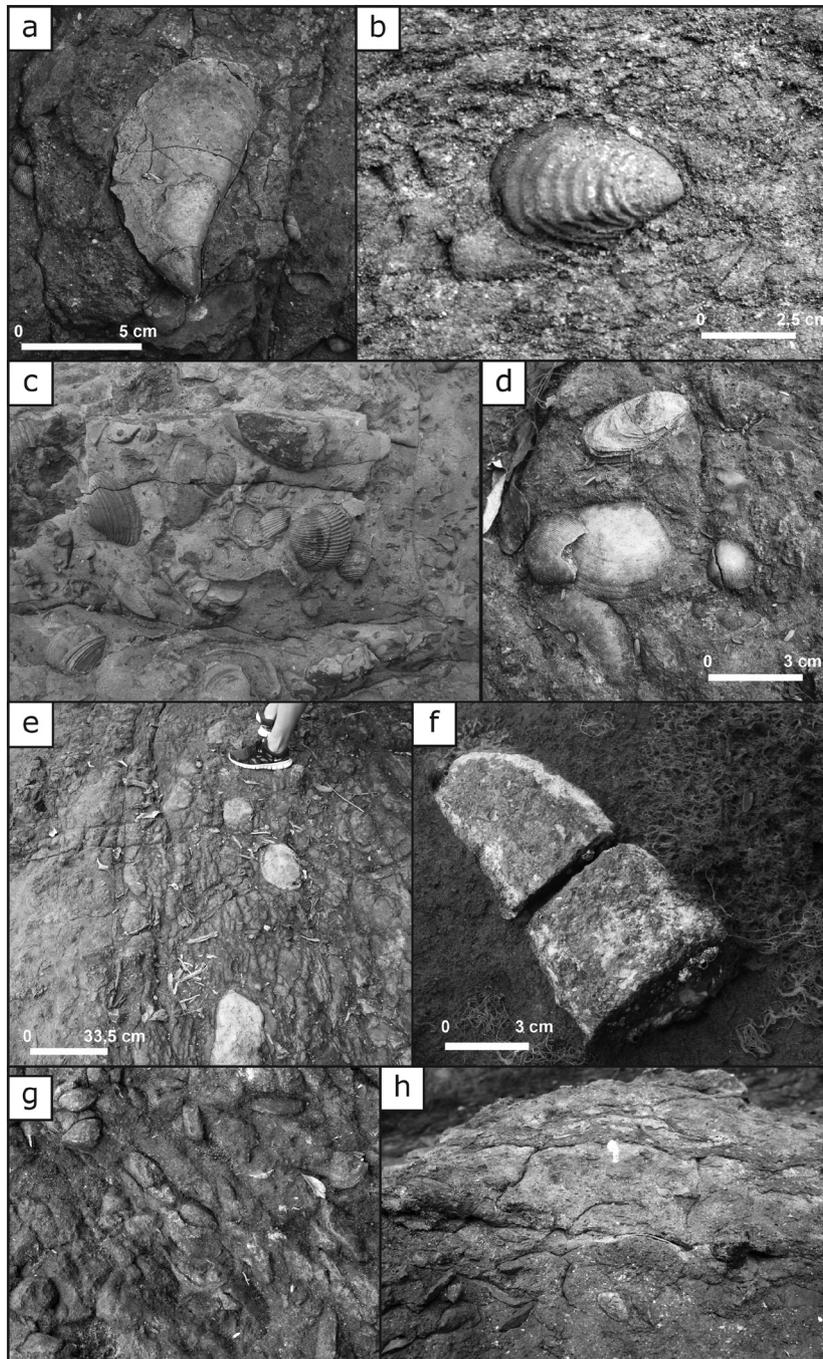


Fig. 2: Fotos del afloramiento norte de la playa Doña Ana. a: *Atrina* sp., moldes internos. b: *Clementia dariena*, valvas conjugadas. c: Retrabajo de bivalvos muy cerca de su lugar de vida (parautóctono): *Atrina* sp., *Chione* sp., *Cardita* sp., *Pitar* sp. d: *Crassostrea* sp. e: Nivel de concreciones. f: Restos de vertebrados? g: Comunidad de *Atrina* sp. con grupos de individuos en posición vital. h: Primer nivel de acumulación de conchas y valvas en posición estable.

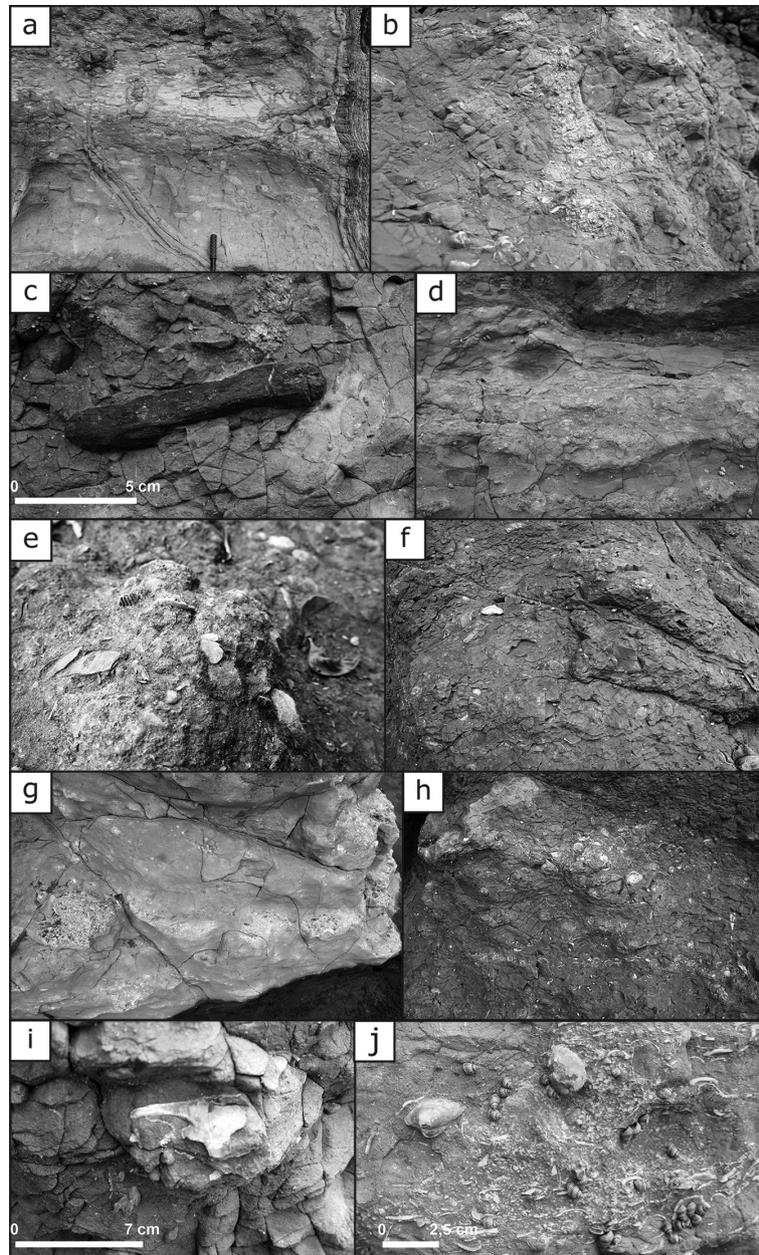


Fig. 3: Fotos del afloramiento norte (a) y fotos del afloramiento central (b)-(j) de la playa Doña Ana. a: Sedimento fuertemente bioturbado y con estructuras tipo “liesegang”. b: Lentes de acumulación de conchas fragmentadas. c: Restos de madera fosilizada. d: Nivel de acumulación de conchas con base erosiva. e: Nivel de acumulación de conchas en posición inestable (canto), por transporte en condiciones de energía fuerte. f: Sedimento fino de aspecto *cizallado*. g: Sedimento fino de aspecto moteado por retrabajo biológico. h: Nivel de acumulación de conchas en el cual predominan valvas desarticuladas pequeñas en posición estable (concavidad hacia abajo). i: Tenaza de cangrejo. j: Nivel de acumulación de conchas con bivalvos con valvas conjugadas (*Tivela* sp., *Chione* sp.).

oleaje. Esta comunidad fue afectada por al menos un evento turbulento, posiblemente una tormenta fuerte, que generó remoción y transporte de los individuos que la conformaban, redepositándolos rápidamente junto con individuos de otras comunidades y restos de materia orgánica vegetal. Este depósito fue colonizado e intensamente retrabajado por organismos oportunistas que causaron fuerte bioturbación, como lo evidencian la alta densidad de estructuras (Fig. 3a). Se interpretan como tempestitas o tormentitas, ya que evidencian perturbaciones violentas de los sedimentos preexistentes, removiendo y transportando los organismos de la comunidad y redepositándolos cerca de su lugar de vida, siempre en un ambiente somero (Ager, 1974).

Parte central playa Doña Ana

Lateralmente, en el acantilado principal y arriba de la secuencia anterior afloran areniscas finas y volcánicas, que presentan al menos 6 niveles de acumulación de conchas, unos decimétricos y los otros centimétricos. Además, lentes de acumulación de conchas y rellenos de cavidades tipo bolsón (Fig. 3b). En estos niveles, los restos fósiles están retrabajados y removidos en o muy cerca de su lugar de vida. En algunos niveles los organismos son de tamaño y forma muy semejantes, y conservan las conchas, en muchos casos conjugadas y recristalizadas. A veces presentan una base erosional y las conchas en contacto unas a otras (soporte bioclástico). Además, se encuentran abundantes restos de plantas (Fig. 3c).

El primer nivel de acumulación de unos 50 cm de espesor, inicia con una base erosiva que contiene valvas completas (Fig. 3d), a veces conjugadas, así como fragmentos de bivalvos de los géneros *Atrina* sp., *Tellina* sp., *Pitar?* sp., *Cardiidae*, *Veneridae*, *Ostreidae* y fragmentos de gasterópodos *Oliva* sp. y *Cancellaria?* sp. (Fig. 2c). En su mayoría preservan las conchas, excepto en *Atrina* sp., que son moldes internos. En algunos casos se observan los bivalvos en posición de canto o inestable para condiciones normales (Fig. 3e).

Los niveles superiores (Fig. 3d) corresponden con areniscas finas a muy finas, a veces presentan un aspecto cizallado (Fig. 3f), color gris verdoso claro, con un aspecto moteado por bioturbación (Fig. 3g). Las concentraciones de conchas miden pocos centímetros hasta decímetros, y contienen diferentes tipos de moluscos, principalmente bivalvos, gasterópodos y nautiloideos. Estos niveles también contienen restos de cangrejos, especialmente fragmentos de caparazones y tenazas, así como algunos troncos y ramas carbonizadas (Fig. 3h-i, c). Muchos de los bivalvos presentan las valvas conjugadas (Fig. 3j) y tanto los bivalvos como los gasterópodos se encuentran recristalizados y rellenos parcialmente o totalmente de cristales de calcita (Fig. 4a). La mayoría de los ejemplares son de tamaño semejante, evidenciando un proceso de selección por transporte (Fig. 4b). Las especies de moluscos que se pueden reconocer son los bivalvos *Cardita* sp., *Anadara* sp., *Chione* sp. y los gasterópodos *Turritella* sp., *Naticidae* sp., *Bursa?* sp. (Fig. 4c). Se observó un nivel de turrítelas (Fig. 4d). Algunos niveles inician con un evento erosivo (Fig. 4e). Existen algunos niveles con predominio de gasterópodos (Fig. 4f), aunque en la mayoría predominan los bivalvos (Fig. 3j, 4b), que a veces incluso se preservan conchas dentro de otras conchas, por efectos de un transporte en condiciones de alta energía (Fig. 5a).

Las areniscas y lutitas aflorantes en la parte central de los acantilados de playa Doña Ana, con sus diversos niveles y lentes de acumulación de conchas, constituyen depósitos autóctonos o paraúctonos, causados por el retrabajo sucesivo y selección *in situ*, causado por eventos turbulentos, que removieron incluso los depósitos de tormentas anteriores, generando un “canibalismo” debido a la ocurrencia de eventos que perturban el fondo marino periódicamente (Fürsich, 1982) (Fig. 6a). Evidencia de estos procesos de retrabajo se encuentra en las discontinuidades y superficies de erosión observables entre los depósitos (Fig. 4e), así como la existencia de diversos niveles de acumulación de conchas y las estructuras relacionadas a sepultamiento rápido y en condiciones de energía fuerte.

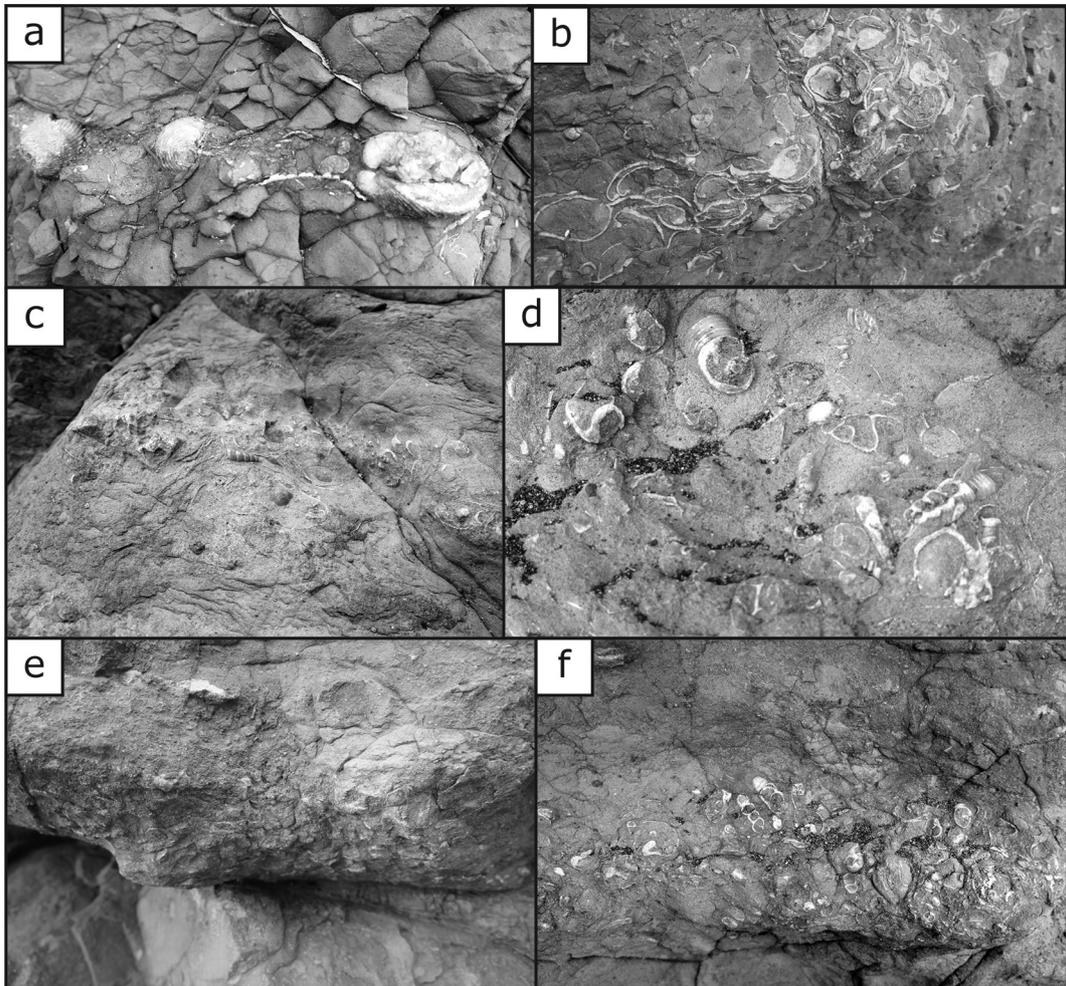


Fig. 4: Fotos del afloramiento central de la playa Doña Ana. a: Bivalvos mostrando valvas conjugadas con relleno de calcita (ojo de pájaro). b: Nivel de acumulación de conchas, selección por tamaño. c–d: Niveles de acumulación con bivalvos y gasterópodos. e: Nivel de acumulación de conchas con base erosiva. f: Nivel de acumulación de conchas con predominio de gasterópodos de tamaño muy uniforme.

Sur playa Doña Ana

Al lado sur de la playa, afloran aproximadamente unos 6 metros de espesor de areniscas, con paquetes de conglomerados y areniscas, conformando depósitos repetitivos de gradación normal, las cuales muchas veces inician con una base erosiva y con pequeñas discontinuidades (Fig. 5b–d).

En las areniscas se observan laminaciones paralelas, curvas (festoneadas) (Fig. 5b, d) e inclinadas a veces de bajo ángulo (HCS) (Fig. 5b, d–e). En la parte inferior abundan los icnofósiles, principalmente *Thalassinoides* isp., *Ophiomorpha* isp., mientras que en la parte superior se puede observar trazas de escape (Fig. 5b, f). En los conglomerados se encontró el molde de un diente de tiburón (Fig. 5g).

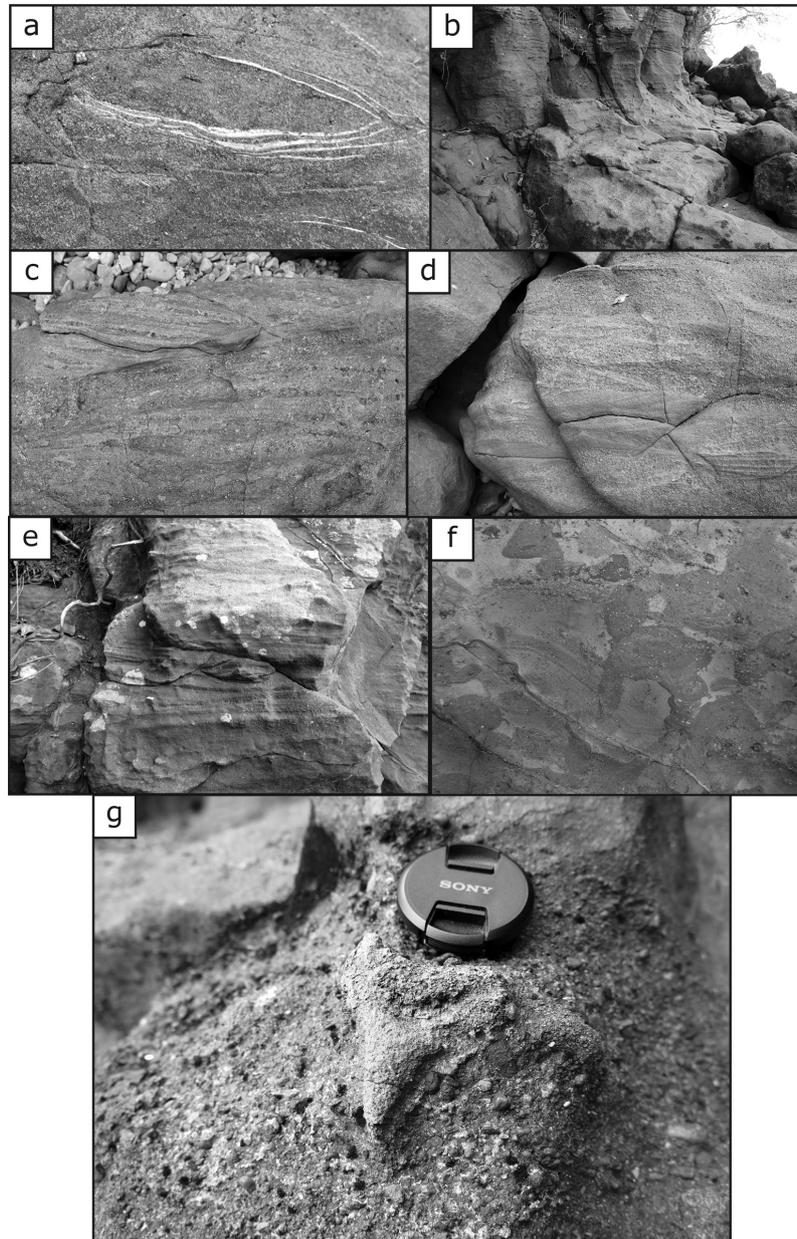


Fig. 5: Fotos del afloramiento central (a) y fotos del afloramiento sur (b)-(g) de la playa Doña Ana. a: Preservación de conchas de bivalvos una dentro de la otra, debido al transporte en condiciones de alta energía. b: Afloramiento lado Sur de playa Doña Ana, con bioturbación y estratificación cruzada. c: Niveles con gradación positiva e hiatos/discontinuidades. d: Niveles con gradación positiva, estratificación cruzada e hiatos. e: Areniscas con estratificación cruzada (HCS). f: Traza de escape en arenisca. g: Conglomerado con molde de diente de tiburón.

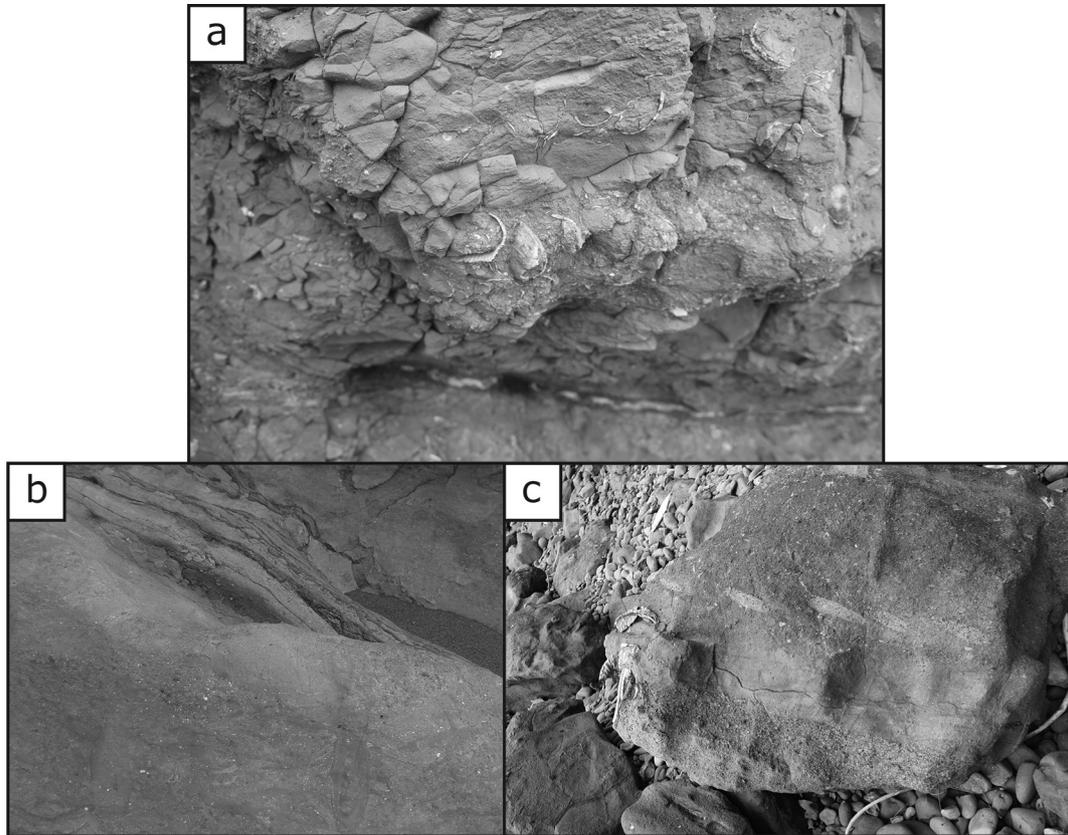


Fig. 6: Fotos del afloramiento central (a), norte (b) y sur (c) de la playa Doña Ana. a: Niveles de acumulación de conchas, donde se aprecia el retrabajo de los niveles inferiores. b: Traza de escape en sedimentos volcaniclásticos. c: Gradación positiva y clastos imbricados.

Estos depósitos se interpretan como tempestitas que retrabajan y afectan depósitos de desembocadura, generando varios paquetes de conglomerados y areniscas con gradación normal, con laminación paralela e inclinada y estratificación cruzada tipo HCS, típica de estos depósitos.

DISCUSIÓN

Los afloramientos de los acantilados de playa Doña Ana presentan comunidades faunísticas que van cambiando a través del tiempo. La comunidad de la parte inferior (comunidad de *Atrina* sp.), es exhumada y removida por efectos de una tormenta y los individuos que la conformaban son transportados y redepositados en estratos superiores. Sucesivas tormentas retrabajan, acarrear y depositan niveles

de conchas de organismos, pero las especies son muy diferentes a las de la comunidad original o nativa. No solo cambia la diversidad de los individuos, sino también su modo de vida y las comunidades de procedencia, aunque las condiciones ambientales sean semejantes y los sedimentos sean iguales. Esto se debe a eventos turbulentos, que tienen efectos muy complejos en las comunidades de organismos e implican sucesiones sedimentológicas y ecológicas dentro de una unidad de depositación (Seilacher, 1982). Presentan estructuras de erosión que reflejan el inicio de la perturbación así como depósitos que evidencian la culminación y el debilitamiento de la perturbación. Redistribuyen el sedimento orgánico e inorgánico a lo largo de un gradiente vertical y horizontal (Seilacher, 1982).

Además, cambian la situación ecológica para los organismos bentónicos, alterando la

consistencia y el contenido de alimento del sustrato, por un periodo de tiempo relevante, incluso después del evento, ya que transportan materiales diversos que desestabilizan las condiciones del sustrato y mucha materia orgánica que atrae a organismos oportunistas. Las consecuencias ecológicas de los eventos catastróficos están relacionadas con los procesos de erosión que perturban y remueven la fauna epibentónica y endobentónica superficial o somera en áreas extensas. Los restos son transportados a otros ambientes (por ejemplo, la playa) o incorporados en los depósitos de eventitas (tempestitas) sobreyacentes. Estas áreas son recolonizadas desde regiones aledañas que no fueron afectadas, por lo que la comunidad posterior al evento generalmente difiere en contenido de especies, porque se incorporan restos de comunidades vecinas o provenientes de otros ambientes afectados por las tormentas (Seilacher, 1982).

Además, aunque los sustratos no difieran (i.e. areniscas finas), las comunidades tienden a ser diferentes. Existen también diferencias en las estrategias tróficas de los organismos que conforman el depósito, pasando de comunidades de organismos principalmente filtradores a la prevalencia de comedores de detrito (Seilacher, 1977). Esto lo destaca muy bien Kuijpers (1979) al describir: "No obstante su similitud en cuanto a modo de depositación, el contenido fósil de la capa inferior difiere del de la superior: o sea la capa superior se caracteriza por un espectro faunístico marino, mientras que la capa inferior incluye muchos moluscos tipo "*deposit feeders*" (comedores de depósito) eurihalinos. Otra diferencia es que la capa inferior se caracteriza por la presencia de solo muy pocas especies de fósiles, mientras que se encuentran una amplia variedad en el horizonte superior".

Las tormentas también afectaron el sepultamiento de las comunidades autóctonas de bivalvos endobentónicos (*Atrina*), que son sepultados en posición vital, por pocos centímetros de arenas, en ambientes marinos someros, sin previa erosión y transporte, como lo señala Seilacher (1982). Los organismos móviles intentaron escapar, aunque dependiendo del espesor de la capa de sedimento, muchas veces no lo lograron. La acción de escapar algunas veces queda preservada como trazas de escape (Figs. 5f y 6b). La mayoría de

los restos esqueléticos que se encuentran en estos depósitos de eventitas son retrabajados, a veces por distancias muy cortas por lo que son depósitos parautoctonos. Sin embargo, representan la epifauna y endofauna del sustrato circundante. El espectro faunístico puede estar más completo que en el fondo lodoso nativo, donde las conchas aragoníticas tienden a ser selectivamente disueltas durante la diagénesis temprana. El retrabajo repetido o "canibalismo" que ocurre en las capas de tormentas puede cambiar el espectro faunístico, por disolución diferencial de las conchas de composición diferente.

Las concentraciones de conchas preservan elementos que en otras circunstancias sería muy difícil que se conservaran, de igual manera presentan faunas de sustrato blando, firme y a veces duro en el mismo depósito. Los restos de las comunidades nativas, más las formas alóctonas, son incorporados al depósito final. La diagénesis temprana también puede aumentar el potencial de fosilización, mediante rellenos y concreciones, como se observa en las conchas de bivalvos y gasterópodos que se presentan rellenos por cristales de calcita y en los icnofósiles (perforaciones) que conforman el núcleo de algunas concreciones (Fig. 4a). Según Bloos (1982), estas concentraciones de conchas se pueden formar por tormentas extraordinariamente fuertes en ambientes marinos someros. Los fósiles que se encuentran en las capas de conchas debidas a tormentas, tienen poco transporte, aunque han sido retrabajados y removidos. El sedimento que las rodea o rellena es litológicamente idéntico a las capas subyacentes que fueron erosionadas. El sepultamiento rápido de las conchas por la tormenta, las protege de una mayor destrucción, contribuyendo así a una preservación diferencial (Hagdorn y Mundlos, 1982). Es por eso que se pueden preservar conchas de nácar (aragonito, que es muy inestable), como es el caso de los Nautiloideos y de algunas ostras y estructuras finas en otros moluscos y cangrejos.

Los depósitos de tempestitas producidos por tormentas se reconocen también por las estructuras sedimentarias y la fábrica, que son un reflejo de la selección hidráulica y el barrido durante la fase de alta energía de la tormenta y la depositación extremadamente rápida durante la fase de

debilitamiento de la misma. Durante la máxima fuerza de la tormenta la profundidad a la que las olas pueden perturbar la superficie del fondo marino, aumenta considerablemente, pudiendo llegar hasta los 200 m. Esto se debe al aumento en la longitud de las olas y a la turbulencia que generan, por lo que en la base de las capas de tormentas quedan estructuras y marcas de erosión (Fig. 5d). Posteriormente el depósito presenta gradación positiva y en la base muchas veces se encuentran clastos de las unidades inferiores (*lag*) o fósiles exhumados con una orientación preferencial, que indican el retrabajo mecánico que afectó esas capas (Fig. 6c). Las conchas generalmente se orientan paralelas a la estratificación (75 %) y con la convexidad hacia arriba (2:1) (Fig. 6a), contrario a lo que ocurre en la fase de alta energía, donde predomina la posición inestable. En algunos casos las conchas grandes y aplastadas o los intraclastos son orientados verticalmente o son imbricados (Fig. 6c). La capa de conchas representa el material removido y seleccionado en el lugar o cerca del lugar de vida, más que transportado por largas distancias.

CONCLUSIONES

Los sedimentos aflorantes en Doña Ana se depositaron en una plataforma somera, en un ambiente de bahía protegida, que fue afectada episódicamente por tormentas fuertes, constituyendo depósitos de tempestitas proximales, que retrabajaron y redepositaron los sedimentos preexistentes, afectando las comunidades faunísticas que habitaban la región, como se observa en la parte norte y central, o los depósitos asociados a una desembocadura como se pueden ver en la parte sur.

Los criterios más importantes que permiten reconocer que estos sedimentos se originaron en un ambiente somero como tempestitas son, cambios rápidos en el espesor y en las facies, combinados con erosión en la base e hiatos o discontinuidades; estructuras de ojo de pájaro; orientación e imbricación de esqueletos de organismos en los niveles de condensación causada por corrientes; estratificación cruzada y estratificación cruzada tipo hummocky (HCS), característica de corrientes de alta densidad bajo la influencia de olas de tormenta por debajo de la base de las olas de buen tiempo.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer a Valentín Chesnel por sus valiosos aportes y sugerencias. Esta investigación se realizó en el marco del proyecto 830-B0-242 de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ager, D. V. (1974). Storm deposits in the Jurassic of the Moroccan High Atlas. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 15(2), 83-93.
- Aguirre, J. y Sánchez-Almazo, I. M. (2004). The Messinian post-evaporitic deposits of the Gafares area (Almería-Níjar basin, SE Spain). A new view of the "Lago-Mare" facies. *Sedimentary Geology*, 168(1), 71-95.
- Alvarado, L. y Alfaro, E. (2003). Frecuencia de los ciclones tropicales que afectaron a Costa Rica

- durante el siglo XX. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 10(1), 1-11.
- Bird, E. C. F. (2008). *Coastal geomorphology: an introduction* (2nd ed). Chichester, England: John Wiley y Sons.
- Bloos, G. (1982) Shell Beds in the Lower Lias of South Germany – Facies and origin. In A. Seilacher y G. Einsele (eds), *Cyclic and event stratification* (pp. 223-239). Berlin: Springer.
- Denyer, P., Aguilar, T. y Alvarado, G. E. (2003). Geología y estratigrafía de la hoja Barranca, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 29, 105-126.
- Einsele, G. (2000). Coastal and shallow sea sediments (including carbonates). Berlin: Springer.
- Fernández, M. (2002). Daños, efectos y amenaza de tsunamis en América Central. *Revista Geológica de América Central*, 26, 71-83.
- Fürsich, F. T. (1982). Rhythmic bedding and shell bed formation in the Upper Jurassic of East Greenland. In A. Seilacher y G. Einsele (Eds.), *Cyclic and event stratification*, (pp. 208-222). Berlin: Springer.
- Hagdorn, H., y Mundlos, R. (1982). Allochthonous coquinas in the Upper Muschelkalk— Caused by storm events? In A. Seilacher y G. Einsele (eds), *Cyclic and event stratification* (pp. 199-199). Berlin: Springer.
- Hamblin, A. P., y Walker, R. G. (1979). Storm-dominated shallow marine deposits: the Fernie – Kootenay (Jurassic) transition, southern Rocky Mountains. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16(9), 1673-1690.
- Keen, A. M. (1971). *Sea shells of tropical west America: Marine mollusks from Baja California to Peru*. California: Stanford University Press.
- Kreisa, R. D. y Bambach, R. K. (1982). The role of storm processes in generating shell beds in Paleozoic shelf environments. In A. Seilacher y G. Einsele (Eds.), *Cyclic and event stratification* (pp. 200-207). Berlin: Springer.
- Kuijpers, E. (1979). Análisis sedimentológico de la Formación Punta Carballo (Mioceno), Costa Rica. *Inst. Geogr. Nac., Informe Semest. Julio—diciembre*, 77-94.
- Liu, K. B. (2007). Paleoclimate Reconstruction. Paleotempestology. In S. A. Elias (Ed.), *Encyclopedia of Quaternary Science* (pp. 1974-1985). Oxford: Elsevier.
- Morton, R. A., Gelfenbaum, G., y Jaffe, B. E. (2007). Physical criteria for distinguishing sandy tsunami and storm deposits using modern examples. *Sedimentary Geology*, 200(3), 184-207.
- Pettijohn, F. J. y Potter, P. E., 1964: *Atlas and Glossary of Primary Sedimentary Structures*. Berlin: Springer-Verlag.

- Pielke Jr, R. A., Rubiera, J., Landsea, C., Fernández, M. L., y Klein, R. (2003). Hurricane vulnerability in Latin America and the Caribbean: Normalized damage and loss potentials. *Natural Hazards Review*, 4(3), 101-114.
- Schmidt, H., y Seyfried, H. (1991). Depositional sequences and sequence boundaries in fore-arc coastal embayments: case histories from Central America. En D. I. M. Macdonal (ed.), *Sedimentation, Tectonics and Eustasy: Sea-Level Changes at Active Margins* (pp. 241-258). Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Seilacher, A. (1977). Evolution of trace fossil communities. *Developments in Palaeontology and Stratigraphy*, 5, 359-376.
- Seilacher, A. (1982). General remarks about event deposits. In A. Seilacher y G. Einsele (Eds.), *Cyclic and event stratification* (pp. 161-174). Berlin: Springer.
- Seyfried, H., Krawinkel, H. y Aguilar, T. (1994). Significance of stratigraphic bounding surfaces in a shallow marine, sand-swamped forearc basin: a case study from the Punta Judas Formation (Miocene, Costa Rica). *Profil*, 7, 293-323.
- Seyfried, H., Sprechmann, P. y Aguilar, T. (1985). Sedimentología y paleoecología de un estuario del litoral Pacífico del Istmo Centroamericano primordial (Mioceno Medio, Costa Rica). *Revista Geológica de America Central*, 3, 1-68.
- Tucker, M. E. (1991). *Sedimentary petrology, an introduction to the origin of sedimentary rocks*. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Walker, R. G. 1984: *Facies models*. Toronto, Ont: Geological Association of Canada Publications, Business and Economic Service.
- Wendt, J. y Aigner, T. (1982). Condensed Griotte facies and cephalopod accumulations in the Upper Devonian of the eastern Anti-Atlas, Morocco. In *Cyclic and event stratification* (pp. 326-332). Berlin: Springer.
- Wiberg, P. (2000). A Perfect Storm: formation and potential for preservation of storm beds on the continental shelf. *Oceanography*, 13(3), 93-99.
- Williams, H. F. (2011). Shell bed tempestites in the Chenier Plain of Louisiana: late Holocene example and modern analogue. *Journal of Quaternary Science*, 26(2), 199-206.

