

HURACANES EN BAJA CALIFORNIA, MÉXICO, Y SUS IMPLICACIONES EN LA SEDIMENTACIÓN EN EL GOLFO DE CALIFORNIA

Genaro Martínez-Gutiérrez¹ y Larry Mayer²

¹ Depto. de Geología Marina, UABCS

² Dept. of Geosciences, University of Arizona

RESUMEN

El aporte de sedimento de grano grueso de las costas de la península de Baja California al Golfo de California es acarreado por corrientes de inundación producidas por tormentas extremas. Las depresiones tropicales que se forman en la cuenca del Pacífico nororiental durante los meses de verano generan al menos un huracán por año, acercándose a la línea de costa de Baja California dentro de un radio 250 Km. Aunque las inundaciones producidas por huracanes son relativamente frecuentes, registros históricos revelan que los huracanes causan inundaciones catastróficas cada 50 años aproximadamente. Durante inundaciones extraordinarias, eventos episódicos de depositación ocurren sobre abanicos deltas y el sedimento de grano grueso es transportado a la costa oriental del Golfo de California. Posiblemente, no menos de 200 incrementos de depositación significativos han ocurrido durante el Holoceno. El sistema, que erosiona, transporta y suministra sedimentos al Golfo de California es variable por naturaleza, y su constancia es fuertemente afectada por la frecuencia de huracanes que afectan la península.

Palabras clave: huracanes, Golfo de California, sedimentación, detección de cambio, percepción remota.

ABSTRACT

Floods generated by extreme storms drive coarse-grained sediment supply from the Baja peninsula to the Gulf of California. Hurricanes formed from tropical depressions in the eastern North Pacific basin during the summer months, generate about one hurricane per year that approaches to within 250 km of the coastline of Baja California. Although hurricane floods are relatively frequent, historical records suggest that hurricanes cause catastrophic flooding perhaps every 50 years or so. During extreme flooding, depositional episodes on fan deltas occur and coarse-grained sediment is delivered to the Gulf of California. Possibly not less than 200 significant depositional increments have occurred throughout the Holocene. The system, which erodes, transports, and delivers sediment to the Gulf of California from Baja California, is episodic by nature, and its periodicity is strongly affected by the frequency of hurricanes that affect the peninsula.

Keywords: Hurricanes, Gulf of California, sedimentation, change detection, remote sensing.

INTRODUCCIÓN

El papel de las tormentas extremas en procesos fluviales en Baja California ha permanecido como un tópico inexplorado a pesar de su largo registro histórico de desastres e inundaciones. Baja California es una región de México que está sujeta a inundaciones extremas producidas por el escurrimiento extraordinario generado por huracanes. La historia de inundaciones en la península de Baja California está registrada en los comentarios escritos por los misioneros, así como también en los relatos recogidos por historiadores (Martínez-Gutiérrez, 2002). Los primeros acontecimientos históricos de inundaciones datan de la conquista española en México por Cortés (Taylor, 1971). Los españoles establecieron la primera Misión de Baja California en Loreto en 1697. Loreto fue también la primera capital provincial de la península y fue repetidamente dañada por inundaciones producidas por huracanes. De ella existen registros. En los primeros 25 años de establecida la Misión de Loreto, ya había sido seriamente inundada y dañada en dos ocasiones. Finalmente, las continuas inundaciones que afectaban Loreto propiciaron su aban-

dono como capital de las Californias en favor de La Paz. Sin embargo, grandes inundaciones también habían afectado a La Paz, al menos cinco veces antes de que fuera la nueva capital. La última inundación que dañó a La Paz, ocurrió en 1976, al paso del huracán Liza, matando a más de 1000 personas en la ciudad y en áreas circundantes (Smith, 1986). El mismo huracán Liza, que devastó La Paz, continuó su trayectoria hacia el norte, hacia el estado de California, E.U.A. en forma de tormenta tropical, la cual produjo inundaciones en el Valle de la Muerte. En el 2001, el huracán Juliette causó extensas inundaciones en la región de Los Cabos. Esta tormenta tiene el registro más alto de precipitación en la historia, pero solamente causó 2 muertes como resultado de las inundaciones.

El uso de la percepción remota en el estudio de la superficie de la Tierra es una herramienta poderosa para evaluar multi-temporalmente los eventos y procesos. Por ejemplo, en el caso de que existan cambios en la cubierta del terreno, éstos mostrarán un cambio en la reflectancia de los materiales, la cual será detectada en imágenes satelitales o aeroplanos. Esta técnica fue empleada en el presente trabajo a fin de evaluar el impacto de los huracanes sobre el paisa-

je y su papel en el aporte de sedimento al Golfo de California. Los objetivos de este artículo son: 1) describir las características de frecuencia de los huracanes que afectan Baja California, 2) resaltar en un contexto climatológico y geomorfológico la importancia de la precipitación derivada de huracanes; 3) resumir la evidencia de los efectos que traen los huracanes a los sistemas fluviales y el transporte de sedimento; y 4) discutir las implicaciones de estos datos para la sedimentación terrígena clástica en el Golfo de California.

RESULTADOS

FRECUENCIA DE HURACANES

Los huracanes que afectan la península de Baja California se forman en aguas tropicales de la cuenca oriental del Pacífico Norte. La productividad de esta área para la iniciación y generación de depresiones tropicales, tormentas, y huracanes, es mayor que la de la cuenca occidental del Atlántico Norte, y es la segunda después del Océano Pacífico Occidental. La mayoría de los huracanes inician como perturbaciones tropicales entre las latitudes 10°N y 18°N y entre las longitudes 95°O y 110°O. Después de su formación inicial, las tormentas tropicales y huracanes se mueven con dirección oeste-noroeste hacia aguas abiertas del Océano Pacífico. Sin embargo, una porción de estas tormentas y huracanes siguen una trayectoria con dirección norte-noroeste hacia la península de Baja California y suroeste de los Estados Unidos (Figura 1). Varias de las tormentas que se generan en la cuenca oriental del Pacífico Norte con una trayectoria hacia el norte entran al Golfo de California trayendo consigo enormes cantidades de humedad. Algunos huracanes en su trayectoria hacia el norte pueden virar, ya sea hacia la península, al macizo continental, o al suroeste de los Estados Unidos. El ciclo de vida completo de un huracán puede ser de 1 a 10 días antes de que se disipe, aunque pueden existir excepciones.

Las condiciones atmosféricas influyen en la trayectoria de una tormenta propiciando que se dirija hacia al oeste o al norte. Ely (1997) construyó mapas de anomalías atmosféricas de 700 mb de presión asociados específicamente con tormentas tropicales y tormentas generadas por frentes fríos que produjeron inundaciones en el suroeste de los Estados Unidos. Sus resultados indican que ambas inundaciones producidas en verano e invierno estuvieron asociadas con la circulación meridional en las latitudes medias. Estas mismas condiciones atmosféricas pueden resultar en patrones de clima que intensifican el desvío de tormentas tropicales hacia la península de Baja California y al suroeste de los Estados Unidos. Por ejemplo, los patrones de circulación omega, que evolucionan a un sistema de baja presión en las latitudes medias u otros sistemas de baja presión en latitudes medias, sirven para conducir los ciclones tropicales hacia Baja California y al suroeste de los Estados Unidos (Smith, 1986; Webb y Betancourt, 1990). Por lo tanto, la frecuencia de huracanes que afectan Baja California será mayor cuando estas condiciones atmosféricas sean más comunes, favoreciendo una trayectoria de las tormentas hacia al norte. Estas características y condiciones se pueden inferir a partir del registro de huracanes.

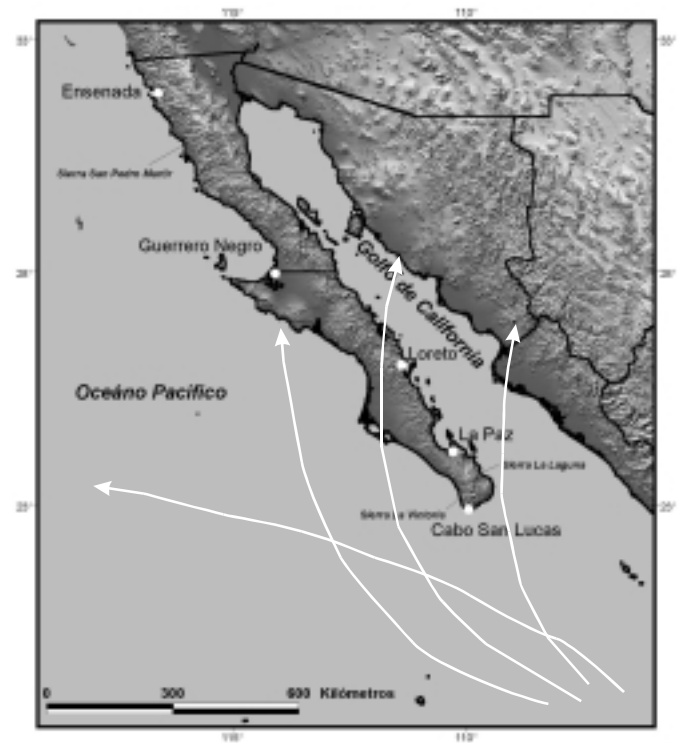


Figura 1. Sombreado del relieve mostrando la ubicación de lugares preferenciales referidos en el texto y direcciones de trayectorias de huracanes en la cuenca oriental del Pacífico Norte. La Laguna Salada está al este de Ensenada.

Un registro razonablemente completo de tormentas tropicales y huracanes generadas en la cuenca oriental del Pacífico Norte existe para el periodo de 1949-2001 (Figura 2). Estos datos indican que la frecuencia de tormentas es mas alta en los meses de julio, agosto, y septiembre. La mayor frecuencia de huracanes ocurre en septiembre, en todo el registro. Las tormentas tropicales están representadas por frecuencias mensuales similares. Septiembre es también el mes con la mayor probabilidad de que un huracán siga hacia el norte con dirección hacia la península de Baja California, principalmente entre septiembre 1 y 10 (Crutcher y Quayle, 1974). La frecuencia de huracanes en la cuenca oriental del Pacífico se resume en la Tabla 1. El número de huracanes esperado en un año cualesquiera puede tener una variación alta; esta característica se evidencia por las altas fluctuaciones que ocurren cada diez años, de ahí que el porcentaje de huracanes que se dirigen hacia la península pueda tener una estadística ascendente. Del registro disponible se encontró que entre 12 y 16 % de los huracanes formados en la cuenca oriental del Pacífico Norte afectan la península de Baja California; aquí se define "afecta" como aquella tormenta que se ubica a una distancia de 250 km de la península. El número más alto de huracanes que han afectado a Baja California en un periodo de 10 años fue de 15 y ocurrieron en el periodo de 1971-1980.

CONTEXTO CLIMATOLÓGICO DE HURACANES

Una manera de evaluar la importancia de la precipitación relacionada a huracanes en el proceso de transporte de sedimentos es registrar la cantidad de precipitación en un contexto climatológico y fisiográfico. De aquí cabe la pregunta: ¿qué cantidad total de preci-

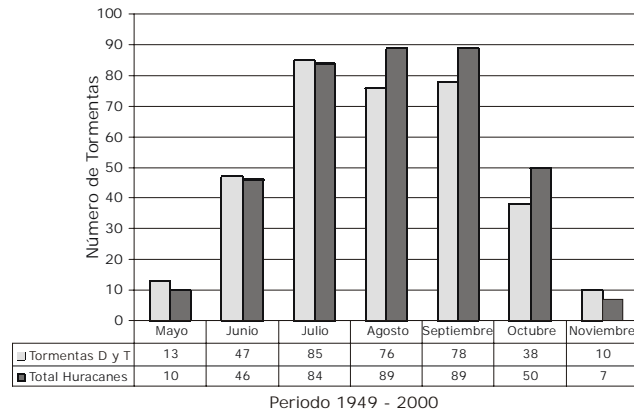


Figura 2. Histogramas de frecuencias mostrando el número de tormentas tropicales y huracanes que ocurrieron en meses seleccionados para el periodo 1949-2001. Los datos provienen de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2001). D: depresión tropical, T: tormenta tropical.

Tabla 1. Resumen de ocurrencia de huracanes para la cuenca oriental del Pacífico Norte mostrando la frecuencia de huracanes en intervalos por décadas. Para determinar que tan importantes son estos huracanes, en términos de impacto en Baja California, se trazo la trayectoria de los huracanes y se determino cuales y cuantos presentaban una trayectoria dentro de un radio de 250 km de la costa.

Año	1949-1950	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000
1		2	2	12	8	10
2		3	2	8	12	15
3		2	4	7	12	11
4		4	1	11	13	10
5		2	1	9	13	7
6		7	7	9	9	5
7		9	7	4	10	9
8		5	6	14	7	9
9	2	5	4	6	9	
0	6	5	4	7	16	
Total	8	52	38	87	109	76
250 km	9	10	10	15	13	13
Porcentaje	17	26	17	12	12	17

pitación es vertida en Baja California producto de tormentas extremas tales como huracanes, como una proporción de la cantidad total de precipitación?. Consideremos el registro en Loreto como ejemplo: La precipitación media anual en Loreto es de aproximadamente 140 mm (Markham, 1972). Entre 1949 y 1960, tres huracanes trajeron lluvia a Loreto en cantidades de 264, 184, y 174 mm. Cada una de estas tormentas individualmente trajeron lluvia que sobrepasó la precipitación media anual. Markham (1972) informa un ejemplo de precipitación extrema producida por un huracán al norte de Cabo San Lucas, la cual trajo 1015 mm de lluvia en un solo evento. Markham (1972) además sugiere que más del 30% de la precipitación (total) que se presenta en la parte sur de Baja California es vertida como lluvia "intensa". Sin embargo, la precipitación producida por huracanes, especialmente cuando el huracán está en mar profundo a distancias que exceden 250 km, puede ser espacialmente errática. Consideremos el huracán Linda, por ejemplo: El ciclón tropical Linda, formado en septiembre 9 de 1997, rápidamente creció a huracán el 10 de septiembre, a 800 km al sur del extremo de Baja California. En septiembre 12 Linda había alcanzado su pico, con vientos que alcanzaron 300 km/h; las estimaciones sugieren que Linda fue el huracán mas fuerte registrado en la cuenca oriental del Pacífico Norte. Las predicciones habían inicialmente sugerido que Linda podría llegar al sur de California, E.U.A.;

sin embargo, el 13 de septiembre, Linda comenzó a moverse al noroeste en respuesta al crecimiento de una cresta de alta presión que se dirigía hacia el Norte. Para el 16 de septiembre, Linda se había degradado a depresión tropical y el 17 de septiembre, la tormenta se había disipado. Aunque Linda no tocó tierra, su tamaño nos da una idea del potencial para inundaciones extraordinarias. La precipitación en el sur de la península que estuvo asociada con Linda y sus tormentas secundarias se muestra en la Figura 3. Los histogramas indican el volumen relativo de precipitación durante cinco días que duró el huracán en su aproximación y partida. Estos patrones espaciales de precipitación están fuertemente modulados por la topografía, así como las ocurrencias resultantes de inundaciones extraordinarias. La elevación es otro factor que también afecta a la distribución de la precipitación media anual. La precipitación media anual varía de aproximadamente 50 mm en el área del Delta del Colorado a 400 mm en regiones elevadas de la Sierra de San Pedro Martir y la Sierra La Victoria. Los valores mas típicos para la precipitación media anual son de 200 mm para áreas elevadas y 100 mm cerca de las costas (Markham, 1972). La región noroeste de Baja California cerca de Ensenada, es fuertemente afectada por sistemas invernales del Pacífico, donde las montañas de la Sierra de San Pedro Martir resultan ser una sombra de lluvia hacia el este, en el Delta del Rio Colorado. La región sur de la península, sin embargo, es mas afectada por sistemas tropicales. La topografía en Baja California intensifica la precipitación en las áreas montañosas, causando inundaciones en las cuencas adyacentes. Por ejemplo, una inundación en una cuenca de Los Cabos resulta de una intensa precipitación en la Sierra de La Laguna.

EFFECTOS DE HURACANES

Los efectos de inundaciones por huracanes pueden ser evaluados a través de la observación directa, detección de cambio basada en percepción remota, o por medio de una modelación validada. Martínez-Gutiérrez (2002) empleó modelos hidrológicos con parámetros espaciales junto con tratamiento de imágenes Landsat basadas en una clasificación de la cubierta del terreno para estimar la descarga. Las estimaciones son el resultado de la precipitación producida por huracanes en pequeñas cuencas situadas en los alrededores de La Paz y San José del Cabo. De ahí que, la importancia de los huracanes en el cambio del paisaje y en el transporte de sedimentos puede ser determinada a través de la detección de cambio basada en datos de imágenes Landsat (Mayer, 1998). El cambio de paisaje acumulativo producido por mas de 20 años, puede ser cuantificado usando métodos de detección de cambio a través del empleo de percepción remota (Martínez-Gutiérrez, 2002). El huracán Nora desarrollado el 16 de septiembre de 1997, trajo consigo fuertes vientos que produjeron olas de 3 metros de altura en la línea de costa Mexicana. El huracán hizo contacto en tierra al norte de Baja California el 25 de septiembre, dirigiéndose posteriormente hacia Arizona. En su camino, el huracán pasó por Laguna Salada, una cuenca endorreica localizada al sur de la frontera de Baja California y Estados Unidos de Norteamérica. Una comparación de imágenes de satélite, basada en técnicas de detección de cambio, antes y después del evento en la región exhibe el resultado de inundaciones inducidas por huracanes.

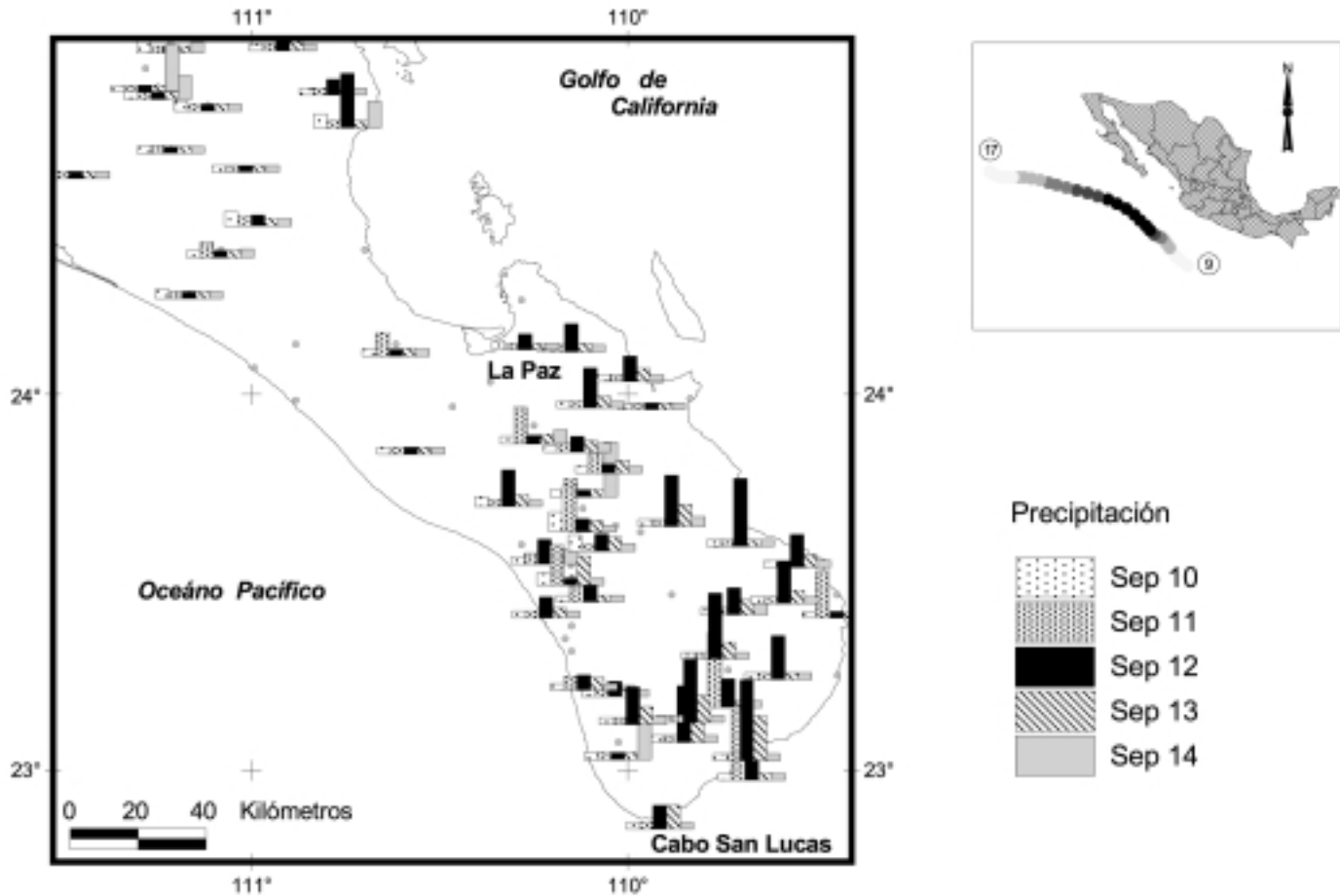


Figura 3. Histogramas de precipitación de estaciones pluviométricas en el sur de Baja California durante el tiempo de afectación del huracán Linda, 1997. Cada barra del histograma representa 24 horas de precipitación para cada estación, iniciando el 10 de septiembre, 1997. Observe que algunas cantidades de precipitación son bajas para un periodo de 5 días y están asociadas con áreas con relieve bajo. En el recuadro se muestra la trayectoria del huracán Linda.

Uno de los métodos empleados para la detección de cambio está basado en la comparación de valores de brillantez de una sola banda en diferente tiempo (año, mes, o día) de adquisición (Weismiller *et al.*, 1977). En nuestro análisis, las dos escenas utilizadas fueron adquiridas en diferentes periodos del año, en este caso agosto y diciembre, por lo tanto hubo diferencias inherentes en la brillantez de las dos imágenes, esto debido a una diferencia en la iluminación solar. Estas diferencias pueden ser parcialmente corregidas realizando una igualación de histogramas en las imágenes. Este método trabaja bien en áreas con poco relieve, tales como planicies aluviales; sin embargo, el método no corrige las diferencias de sombras en áreas montañosas o con relieve abrupto. En este trabajo se aplicó una igualación de histogramas para cada una de las escenas (antes y después del evento) de un área al sur de Laguna Salada, donde se comparó la banda 3 de cada imagen. Para el sensor Landsat TM, la banda 3 corresponde a la longitud de onda del rojo visible, mostrando la vegetación como áreas oscuras, a pesar de que la región está caracterizada por ser árida a hiper-árida carente de vegetación. Se generó una imagen en falso color asignando a la banda 3 de la imagen después del huracán (de diciembre) un color verde y a la banda 3 de la imagen antes del evento (agosto) se asignó un color rojo. Esta combinación resultó en una imagen de color con tres colores principales rojo, verde y amarillo (Figura 4).

El color rojo indica que el área fue mas brillante antes del huracán (agosto) y el verde indica que la brillantez era mayor después del evento (diciembre). Por otro lado, el color amarillo indica poco cambio en la brillantez de los píxeles. Si uno se enfoca en las corrientes trenzadas o los canales de los abanicos, se puede observar que estas superficies están dominadas por un color verde, que indica que la superficie de reflectancia en los cauces y abanicos es mayor después del huracán. El transporte de sedimento fresco sobre las superficies del terreno causa una mayor reflectancia. Por lo tanto, los mayores eventos de transporte y depositación de sedimento están relacionados con tormentas extremas, tales como huracanes.

Quando estos huracanes entran a tierra cerca de ciudades o poblaciones causan inundaciones donde los resultados son siempre devastadores. El huracán Liza, en 1976, no tocó tierra en Baja California y no dejó enormes cantidades de agua, pero sí generó una inundación relámpago en las montañas cercanas a La Paz, rompiendo el bordo de contención, dirigiéndose a la ciudad (Figura 5). El huracán Isis (1998) y el huracán Juliette (2001), dejaron completamente incomunicados a muchos poblados de la región de Los Cabos, después del rompimiento de los caminos y carreteras (Figura 6). La cantidad de sedimento transportado y depositado durante estas inundaciones de huracanes es muy significativa. Por ejemplo,

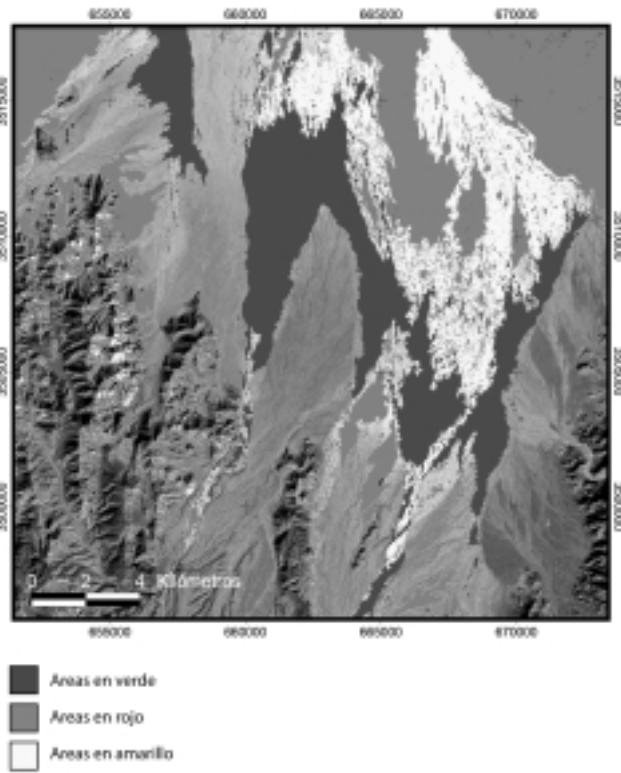


Figura 4. Imagen de cambio de una región al sur de Laguna Salada, Baja California, basada en imágenes Landsat TM. Los cambios entre estas dos imágenes son atribuidos al huracán Nora, 1997 y a las diferencias en iluminación solar entre agosto y diciembre. Las áreas en verde [gris claro], color que domina sobre los abanicos aluviales que están hacia el norte, son el resultado del transporte de sedimento y depositación sobre la superficie del abanico. Las áreas en negro, color que predomina sobre los arroyos muestran que no hubo cambios entre las dos imágenes. El patrón en forma de "leopardo" [gris claro-oscuro] sobre las montañas es causado por diferencia de iluminación estacional entre las dos imágenes. La imagen es de aproximadamente 2.1 km de ancho. Ver texto para discusión.

cauces más anchos que profundos son rellenados de agua más rápidamente, asemejándose más al Río Mississippi que a un cauce arenoso de Baja California (Figura 7). Áreas que drenan sobre rocas graníticas generan arena, la cual, durante inundaciones, producen depósitos muy potentes (Figura 8). El huracán Isis desarrollo abanico deltas en solo un día (Figura 9).

IMPLICACIONES PARA LA SEDIMENTACIÓN EN EL GOLFO DE CALIFORNIA

La sedimentación en el norte del Golfo de California estuvo dominada por el Río Colorado; éste trajo enormes cantidades de sedimento hacia el sur como una fuente puntual de aporte longitudinal. Por otro lado, la península de Baja California aporta relativamente poco sedimento al Golfo, debido a su angosta franja de tierra, cuya área de drenaje hacia el Golfo es muy pequeña. Regionalmente, la topografía está caracterizada por cuencas pequeñas que drenan hacia el este y que están asociadas con el Escarpe Principal del Golfo. Al oeste del parteaguas principal, que separa las corrientes que fluyen al este u oeste, están las cuencas más grandes que drenan al Océano Pacífico. Aunque el Golfo de California es claramente una



Figura 5. Porción de un fotomosaico ortorectificado de La Paz, Baja California Sur, mostrando la trayectoria de la inundación catastrófica después del huracán Liza, 1976. La inundación causó un número considerable de pérdidas de vida.



Figura 6. Cortes de la carpeta asfáltica de la carretera Federal No. 1 y 19, ocurrieron después del paso de los huracanes Isis (1998) y Juliette (2001). La fotografía muestra el arroyo de San Dionisio que corta la carretera cada año por las corrientes de lodo.

cuenca "hambrienta" de sedimento, la sedimentación clástica ocurre en una franja angosta a lo largo de la costa. El sistema de aporte terrígeno clástico hacia el Golfo es conducido por las avenidas extraordinarias que solamente toman lugar durante las tormentas, las cuales tienen una dimensión suficiente para generar grandes cantidades de escurrimiento. No existe en la península otro tipo de transporte de tal magnitud entre el lapso de la generación de tormentas, de ahí que no se observe un transporte significativo de sedimento hacia el Golfo. Estimaciones de descarga modeladas de una cuenca de 21 km² mostraron que la cuenca produjo una descarga de ~348 m³/s durante un periodo de 24 horas y ~89 mm de precipitación (Martínez-Gutiérrez, 2002). Estudios sobre transporte de sedimento en corrientes efímeras de cauces aluviales han sido desarrollados

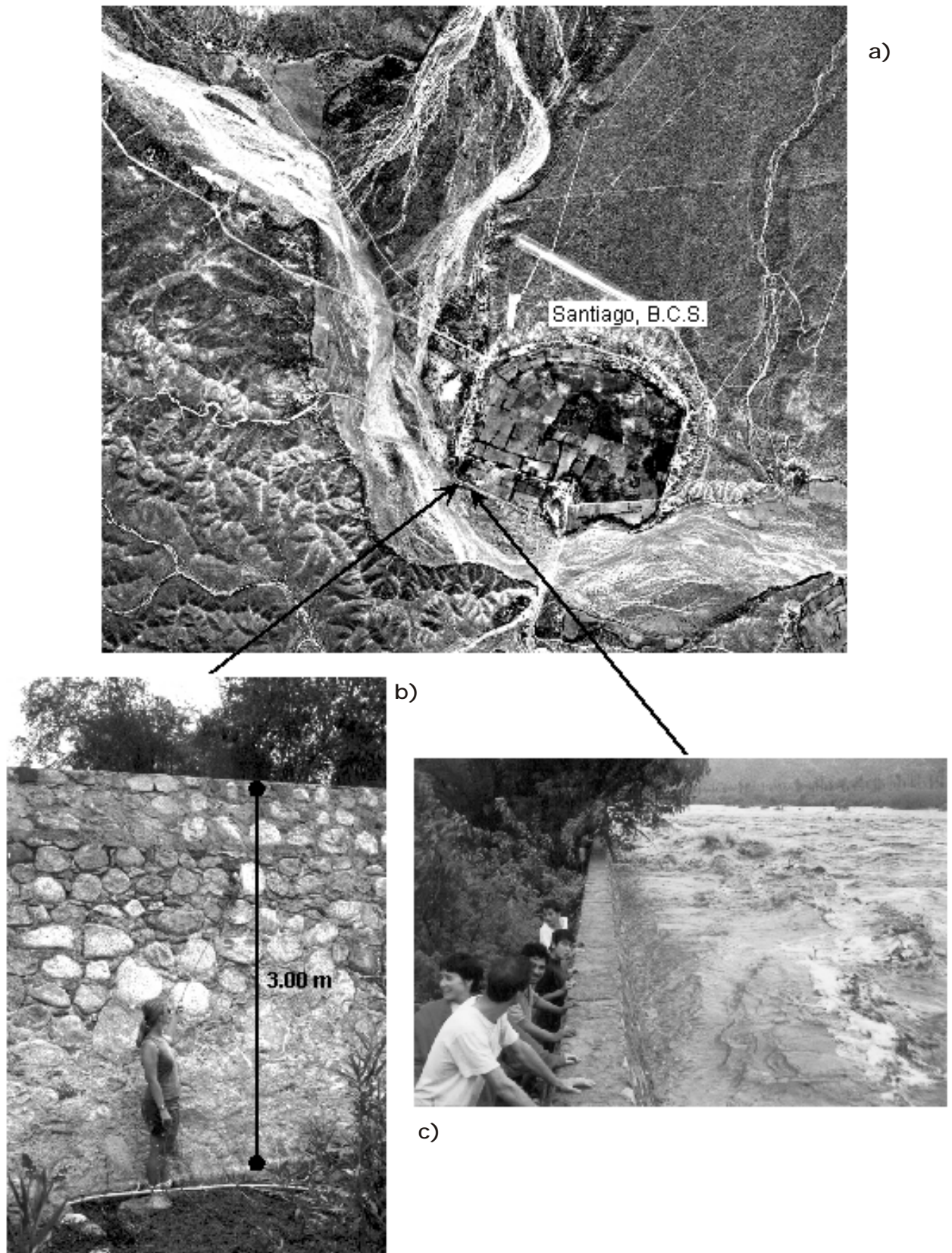


Figura 7. Inundación producida por el huracán Fausto, cerca de Santiago, Baja California Sur. A] Fotografía aérea mostrando el arroyo que fue inundado. El material de fondo está dominado por arena gruesa. B] Una pared de contención construida para proteger el poblado de Santiago de inundaciones. C] Residentes del poblado confiando en el muro de contención para prevenir inundaciones del huracán Fausto.



Figura 8. Residentes "minan" una camioneta de un depósito de arena después de la estación de tormentas sobre el Arroyo Guaymitas cerca de San José del Cabo.

después de lluvias extremas (Gerson, 1977; Nordin, 1963). Estos estudios indican que la concentración de sedimento durante una inundación puede alcanzar de $\sim 300,000$ a $\sim 640,000$ ppm de arena y limo. Usando estos parámetros, una estimación del total de carga de sedimento fue calculada para una lluvia producida por el huracán Henriette, en 1995. El huracán produjo ~ 162 mm de precipitación en 24 horas y se calculó una descarga de ~ 132 m³/s para la cuenca modelada. Los resultados indicaron que una descarga de ~ 132 m³/s produciría un total de carga de ~ 63 m³ de sedimento y una descarga de ~ 348 m³/s una carga total de sedimento de ~ 4833 m³ para 21 km² de cuenca. Comparando estas estimaciones con cuencas de mayores dimensiones, por ejemplo, la cuenca de Río Puerco, Nuevo México, que tiene una extensión de $\sim 16,000$ km², ésta puede llegar a producir una concentración de 680,000 ppm o $\sim 28,630$ m³ de sedimento (Nordin, 1963).

La recurrencia general de huracanes provee una señal de la frecuencia de sedimento aportado al Golfo. Aproximadamente 10 huracanes por década afectan a la península de Baja California (Tabla 1). Inundaciones pueden ocurrir más frecuentemente debido a que pueden ser generadas por tormentas de invierno o por corrientes convectivas durante el monzón de verano. Del registro histórico, sin embargo, un intervalo de recurrencia muy aproximado de huracanes grandes que deriven en inundaciones en una región dada es de 30-50 años. Usando un número más conservador, se sugiere que el tiempo básico para el aporte de sedimento clástico sea del orden de 50 años, de tal manera que solamente 20 de tales eventos se esperarían por cada mil años. Suponiendo un clima estacionario para los últimos 10,000 años, se propone que 200 eventos significativos ocurrieron durante todo el Holoceno, que aportaron sedimento al Golfo. Esta estimación está probablemente en el límite inferior y es muy incierta, pero todavía provee algunas ideas acerca de las condiciones climáticas que dieron lugar al crecimiento de deltas abanicos a lo largo del Golfo de California.



Figura 9. Vista hacia el norte en Costa Azul, un poblado pequeño aproximadamente a 2 km al sur de San José del Cabo. A) Condiciones de la costa durante junio de 1998, B) Mismo sitio seguido de una inundación relámpago producida por el huracán Isis, un abanico delta "instantáneo" fue desarrollado. La alta energía de la costa rápidamente erosiona este prominente depósito de arena.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los huracanes, fenómenos hidrometeorológicos que afectan a la península de Baja California anualmente, contribuyen en los procesos de modelación del paisaje y aporte de sedimento al Golfo de California. La trayectoria de los huracanes generados en el Pacífico Oriental es principalmente oeste-noroeste, virando ocasionalmente al norte-noreste hacia la península y suroeste de los Estados Unidos. El cambio de trayectoria es atribuido principalmente a sistemas de circulación omega que evolucionan a sistemas de baja presión generados en latitudes medias, que contribuyen para conducir a los huracanes hacia el macizo continental y la península. La cantidad de precipitación vertida por los huracanes en la península es un factor determinante para que exista transporte de sedimento hacia el Golfo de California y modelación del paisaje. Registros de precipitación mayores de 100 mm han producido efectos "significativos". Aun cuando los huracanes se encuentran a 250 km de la costa, han aportado grandes cantidades de agua, como el caso del huracán Linda (1997), que produjo una precipitación de >300 mm en algunas localidades. Las secuelas de los huracanes, producto de intensa precipitación y escurrimientos extraordinarios, se identifican desde la avulsión hasta el ensanchamiento de cauces, y en muchas ocasiones inundaciones en los poblados cercanos a la costa y al margen de

los arroyos, las cuales pueden ser detectadas empleando imágenes satelitales temporales, donde la diferencia de reflectancia de los materiales es empleada para identificar los cambios producidos. La sustracción de bandas es un procedimiento rápido y confiable para la identificación de los efectos producidos por precipitación extraordinaria.

Los escurrimientos extraordinarios generados por las tormentas monzónicas y tropicales en la península de Baja California han contribuido en la sedimentación del Golfo de California. El aporte y volumen de material dependerá de las características hidrológicas de la cuenca donde ocurra la precipitación; por ejemplo, cuencas con rocas muy intemperizadas aportarán mayor cantidad de sedimento. Las estimaciones realizadas muestran que una subcuenca de ~21 km² puede suministrar 4833 m³ de sedimento. De ahí que cuencas de mayores dimensiones como la cuenca de San José del Cabo, podrían aportar mayor volumen de sedimento al Golfo de California.

AGRADECIMIENTOS

G. Martínez Gutiérrez agradece al Ing. Vicente Aguilar por proporcionar el registro climatológico del estado de Baja California Sur. L. Mayer agradece el apoyo brindado por parte del Servicio Geológico de los Estados Unidos, Centro de Datos EROS Data por su apoyo de este proyecto piloto el cual fue iniciado durante su estancia científica en EROS en 1998. Este artículo es un resultado de los Principios de la iniciativa de la Aplicación de Tecnología del Espacio (FaSt). El apoyo a la investigación fue otorgado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, bajo USGS del acuerdo No. 99CRAG0009 y el fondo NSF EAR-9802790. Los autores agradecen las revisiones y sugerencias hechas por M. en C. Manuel Cruz Castillo y un revisor anónimo, las que ayudaron a mejorar sustancialmente el manuscrito. El apoyo para el trabajo de campo en Baja California durante el verano de 1998 fue proporcionado a través de la NASA en apoyo para evaluar los efectos del Huracán Nora.

REFERENCIAS

- Crutcher, H.L., and Quayle, R.G., 1974. Mariners worldwide climatic guide to tropical storms at sea: Naval Weather Service Environmental Detachment, Asheville, NC, 426 pp.
- Ely, L.L., 1997. Response of extreme floods in the southwestern United States to climatic variations in the late Holocene: *Geomorphology*, v. 19, p. 175-201.
- Gerson, R., 1977. Sediment transport for desert watersheds in erodible materials: *Earth Surface Processes*, v. 2, p. 343-361.
- Markham, C., 1972. Baja California's climate: *Weatherwise Magazine*, Volume April, p. 64-76.
- Martínez-Gutiérrez, G., 2002. Assessment of landscape change associated with tropical cyclone phenomena in Baja California Sur, Mexico, using satellite remote sensing [Dissertation thesis-Ph.D.]: Oxford, OH, Miami University, 146 pp.

- Mayer, L., 1998. Satellite remote sensing of flood related landscape change resulting from hurricanes in Baja California and the southwestern United States, *en* Hassan, M., Slaymaker, O., Berkowicz, S., y Church, M., eds., *Drainage Basin Dynamics and Morphology*: Jerusalem, International Association of Hydrological Sciences, (en prensa).
- NOAA, 2001. Hurricane database, National Oceanic and Atmospheric Administration, [<http://hurricane.csc.noaa.gov/hurricanes/>].
- Nordin, C.F.J., 1963. A preliminary study of sediment transport parameters Rio Puerco near Bernardo, New Mexico, United States Geological Survey, 21 pp.
- Smith, W., 1986. The effects of eastern North Pacific tropical cyclones on the southwestern United States, National Oceanic and Atmospheric Administration, Technical Memorandum National Weather Service WR-197, 229 pp.
- Taylor, A.S., 1971. A historical summary of Baja California from its discovery in 1532 to 1867: Socio-Technical Books, Pasadena, Ca., 200 pp.
- Webb, R.H., and Betancourt, J.L., 1990. Climatic variability and flood frequency of the Santa Cruz river, Pima County, Arizona: Tucson, AZ, United States Geological Survey, Open-File Report 90-553, 69 pp.
- Weismiller, R.A., Kristoof, S.J., Scholz, D.K., Anuta, P.E., and Momen, S.A., 1977. Change detection in coastal zone environments: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 43, p. 1533-1539.

Recepción del manuscrito: 18 marzo, 2004

Recepción del manuscrito corregido: 13 septiembre, 2004

Aceptación del manuscrito: 25 septiembre, 2004