

# Detección de cambios en la morfología litoral de Punta Zacatal y parte occidental de Isla del Carmen, Campeche, mediante el análisis multitemporal de imágenes de satélite

A. Gerardo Palacio Aponte\*

Recibido: 20 de abril de 2001

Aprobado en versión final: 18 de septiembre de 2001

**Resumen.** Durante los últimos 25 años se han apreciado drásticos cambios geomorfológicos en Punta Zacatal y la parte occidental de Isla del Carmen, Campeche, como consecuencia de los procesos litorales actuales y del creciente desarrollo urbano e industrial.

Para detectar estos cambios se realizó el análisis, sobreposición y composición en color de tres imágenes de satélite Landsat MSS de 1974, 1986 y 1992. A cada color primario se le aplicó una banda de infrarrojo cercano (0.8-1.1  $\mu\text{m}$ ), asignando color para valores de alta reflectancia que muestran cambios en la distribución de tierras, y ausencia de color para los cuerpos de agua y tierras que no presentaron cambios. La relación color-no color para cada imagen permite detectar, a través de un compuesto de falso color, la ganancia (acreción), pérdida (erosión) o estabilidad del litoral en el área de estudio. Posteriormente se realizó una clasificación supervisada para obtener áreas y porcentajes, mismos que se corroboraron con fotointerpretación multitemporal y validaciones en campo con el *Georeference Positional System* (GPS).

**Palabras clave:** Cambios morfológicos litorales, bandas del infrarrojo cercano.

## Detection of changes in the littoral morphology at Punta Zacatal and the western portion of Isla del Carmen, Campeche, through satellite-imaging multi-temporal analysis

**Abstract.** During the last 25 years, significant geomorphological changes have been detected in the coastline of Punta Zacatal and the western region of Isla del Carmen, Campeche, as consequence of the current littoral dynamics and the influence of urban and industrial development.

In order to detect such changes, a color overlay and composition image analysis was carried out using three Landsat MSS satellite images dated 1974, 1986 and 1992. A near-infrared band (0.8-1.1  $\mu\text{m}$ ) was applied to each primary color, assigning color to high-reflectance values showing changes in land distribution, and absence of color to water bodies and land that remained unchanged. The color presence/absence relationship for each image allowed to detect coastal accretion, erosion and stable areas in a false-color composite. Afterwards a supervised classification was conducted to obtain areas and percentages, which were verified by means of multi-temporal photointerpretation and GPS fieldwork validation.

**Key words:** Coastline changes, near infrared bands.

### INTRODUCCIÓN

Entre las ventajas que ofrece el manejo digital de la información proporcionada por los satélites, se encuentra la visión sinóptica del territorio y la posibilidad de georreferenciar sus cambios en el tiempo. La

precisión en la ubicación de estos cambios dependerá del tipo de sensor, su resolución espacial y espectral y las posibilidades de corrección geométrica y de manejo de información que ofrecen los *softwares*.

En el caso de las zonas costeras bajas

\* Centro de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México (EPOMEX), A. P. 520, 24030, Campeche, México. E-mail: gpalaciomx@yahoo.com.mx

acumulativas del Golfo de México, en donde los cambios ecogeográficos son muy dinámicos a nivel estacional, la selección del sensor, las bandas del espectro electromagnético y las fechas a utilizar dependen del objetivo en cuestión. Así, se pueden detectar cambios súbitos para fechas específicas, o bien, cambios graduales que incluyen fechas a lo largo de amplios períodos de tiempo.

Este trabajo se enfocará a estos últimos, en él se considera a la morfología litoral como indicadora de cambios en el funcionamiento de un sistema costero cada vez más alterado en su equilibrio dinámico, como lo son el

litoral de Punta Zacatal e Isla del Carmen, Campeche (Figura 1). La detección de cambios y tendencias permite caracterizar la geodinámica costera predominante; sin embargo, la causa de esos cambios requiere de estudios precisos del balance sedimentario, los procesos costeros, los eventos meteorológicos extraordinarios y la afectación humana al ambiente, entre otros.

Tradicionalmente, la detección de cambios morfológicos costeros se ha realizado mediante la digitalización precisa de líneas de costa de diferentes fechas en fotografías aéreas de escala grande (>1:50 000).

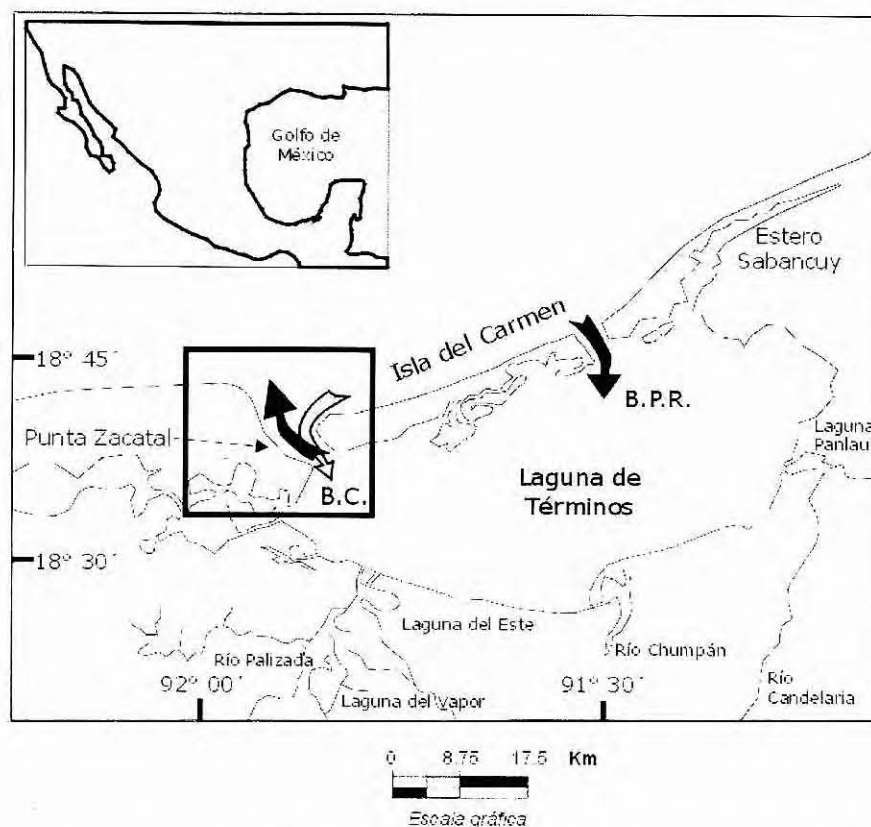
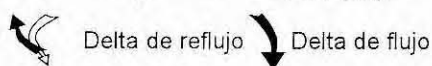


Figura 1. Localización del área en estudio y las bocas estuarinas del Carmen (B.C.) y Puerto Real (B. P. R.).



Para ambientes deposicionales fluvio-marinos similares a Campeche, Williams *et al.* (1991) realizaron en Louisiana, Estados Unidos, un monitoreo sistemático desde 1955, obtuvieron mapas de erosión y acreción anuales y de cambio promedio entre 1955 y 1978. Por otra parte, Dunbar *et al.* (1992) evaluaron la pérdida de tierras costeras en los ambientes deposicionales de Louisiana mediante el uso de fotos aéreas. Estos procedimientos son precisos y útiles, sobre todo cuando no se dispone de información de fechas anteriores a 1973, años en los cuales la información de imágenes de satélite no se encontraba disponible. Sin embargo, estas ventajas comparativas tienen algunos inconvenientes asociados a la adquisición y homogenización de la información disponible, condiciones que han sido parcialmente resueltas por las imágenes de satélite, al tener la posibilidad de manejarlas digitalmente, con mayores resoluciones espectrales y, por tanto, con mejores posibilidades para interpretar la información. Así lo demuestran algunos trabajos, entre los que destacan el de El-Ray *et al.* (1995), en donde mediante el uso de imágenes Landsat MSS se monitorea el incremento de la erosión en el frente deltaico del río Nilo, debido a la construcción de la presa Aswan en 1964.

En este artículo se expone la utilidad de los compuestos de color multitemporales con bandas del infrarrojo cercano, como herramienta para la detección rápida de cambios en la distribución relativa de aguas y tierras en zonas litorales. Esta herramienta sólo identifica los cambios, su causalidad es motivo de otro tipo de estudios.

## **ÁREA EN ESTUDIO**

El área en estudio comprende Punta Zacatal y la parte occidental de Isla del Carmen, Campeche, que se encuentran en el litoral sur del Golfo de México (Figura 1), hacia los 18° 40' de latitud norte y los 91° 50' de longitud oeste. Ambas forman parte de la boca

estuarina del Carmen (B.C.), la cual a su vez se integra al sector occidental del sistema lagunar-estuarino de Laguna de Términos. En esta área predominan los procesos deposicionales fluvio-marinos; sin embargo, en los últimos años se ha reconocido una mezcla de procesos en donde también ocurre un transporte muy significativo modulado por el viento, las mareas, las descargas de los ríos y las corrientes litorales. Igualmente, los flujos de aguas y materiales entre las aguas protegidas del litoral y las aguas costeras de la plataforma, a través de la B.C., condicionan la naturaleza e intensidad de los procesos costeros.

La característica distintiva de la B.C. es el delta de reflujo (Figura 1) de mareas que se deposita hacia la plataforma continental, constituyendo un ambiente sedimentario de terrígenos, materia orgánica y sedimentos marinos finos mezclados (Yáñez y Sánchez, 1983).

Lo contrario ocurre en la boca de Puerto Real (B.P.R.) en donde el flujo de transporte neto hacia la laguna es predominantemente marino (Bravo y Yáñez, 1979), lo que origina un delta interno visible a través de una serie de bajos dispuestos en forma casi triangular.

## **MATERIALES Y MÉTODO**

Para detectar los cambios geomorfológicos en la conformación de la línea de costa del área en estudio, se plantea el análisis multitemporal de imágenes de satélite *Landsat Multispectral Scanner* (MSS) de 1974, 1986 y 1992 (Proyecto NALC- *North American Landscape Characterization*), a través de una composición en color. A cada color primario (rojo, verde, azul) se le asigna una banda del infrarrojo cercano (entre 0.8  $\mu\text{m}$  - 1.1  $\mu\text{m}$ ) con distinta fecha. Así, mediante el uso de reglas básicas de la teoría del color se obtienen distintas combinaciones, mismas que tienen distintos significados geomorfológicos.

Se utilizan bandas del infrarrojo cercano porque dentro del espectro electromagnético marcan claros contrastes entre tierra (niveles de reflectancia altos) y agua (niveles de reflectancia bajos), lo cual permite delimitar la línea de costa y asociar esta dualidad de opciones al cañón de color asignado, detectando incluso rasgos o elementos no identificables a simple vista en compuestos típicos de falso color.

Las tierras ganadas o con cambios alternos de ganancia o pérdida se mostrarán con color, y el agua y las tierras que no presentan cambios, sin color. De esta forma, existe una relación color-no color para cada fecha y, por tanto, para cada situación de pérdida o ganancia de tierras litorales. Al existir tres colores primarios representativos de tres situaciones temporales en una sola imagen, las posibilidades de combinación a desplegar en pantalla se multiplican, obteniendo finalmente, además de los colores primarios originales, los colores secundarios producto de las probables combinaciones de color y las situaciones geomorfológicas vigentes.

Dependiendo entonces de la banda y fecha asignada a cada cañón, se obtienen diferentes colores con significados específicos como: ganancia de tierras por acreción, pérdida de terrenos por erosión y terrenos estables o compensados entre los períodos de tiempo establecidos a partir de las fechas de las imágenes originales (Cuadro 1).

Dado que el principio de correlación y sobreposición propuesto se basa en colores puros y combinados, resultado de un contraste bien definido entre fechas, si no existen cambios, los tonos blancos (tierra) y negros (agua) se mantienen, aparecen sólo colores primarios aditivos y sustractivos para los píxeles con cambios.

Con base en lo anterior, se elaboró un cuadro de correlaciones (Cuadro 1), a partir del

cual resultan ocho posibles combinaciones para tres fechas y tres colores primarios, según el método original de Lewis, A. *et al.* (1996). Como se observa en dicho cuadro, la aparición o no de cambios en tierra (blanco) por fecha, es la que determina el color obtenido y, por tanto, la pérdida o ganancia de tierras por período. Igualmente y asociado al resultado de la combinación de colores, hay períodos alternos de ganancia y pérdida, o lo contrario.

Para la sobreposición de imágenes se parte del hecho de que los cortes de las tres fechas corresponden pixel a pixel (remuestreados a 60 m) dentro de cierto rango tolerable de error ( $\pm 15$  m.), verificado por la localización de los puntos de control cartográfico, de fotografías aéreas (escala 1:75 000) y de campo con GPS.

De igual forma, para evitar al máximo las imprecisiones, se extrajo una subimagen de 652 columnas por 429 renglones, se buscó mejorar la corrección geométrica con al menos 4 puntos de control precisos en coordenadas UTM (Zona 15). Al seguir este proceso no se detectaron errores sistemáticos repetibles generalizados o por regiones, lo que demostró una alta confiabilidad y precisión en el proceso.

Una vez identificadas las clases, se realizó digitalmente una clasificación supervisada, en la que se utilizó el algoritmo de máxima verosimilitud (*maximum likelihood*), debido a que éste ajusta la clasificación a la disposición original de los niveles digitales.

En porcentaje, se alcanzó una eficiencia en la clasificación del 89.0%, debido a variaciones en la reflectancia de los suelos con alto contenido de materia orgánica o a los medios acuáticos con alta turbidez inorgánica. Ambas situaciones contribuyeron a la confusión en la identificación de algunos cambios muy localizados.



Cuadro 1. Relaciones de color asociadas a la pérdida o ganancia de tierras litorales

|          | Azul<br><i>t1</i> | Verde<br><i>t2</i> | Rojo<br><i>t3</i> | Resultado<br>de la combinación<br>de colores | Cambios litorales<br>interpretables                        |
|----------|-------------------|--------------------|-------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Agua     | N                 | N                  | N                 | Negro                                        | Acromático                                                 |
| Tierra   | B                 | B                  | B                 | Blanco                                       | Acromático                                                 |
| A1/A2/T3 | N                 | N                  | B                 | Rojo                                         | TG ( <i>t2</i> + <i>t3</i> )                               |
| A1/T2/T3 | N                 | B                  | B                 | Amarillo                                     | TG ( <i>t1</i> + <i>t2</i> )                               |
| A1/T2/A3 | N                 | B                  | N                 | Verde                                        | TG ( <i>t1</i> + <i>t2</i> ); TP ( <i>t2</i> + <i>t3</i> ) |
| T1/A2/A3 | B                 | N                  | N                 | Azul                                         | TP ( <i>t1</i> + <i>t2</i> )                               |
| T1/A2/T3 | B                 | N                  | B                 | Magenta                                      | TP ( <i>t1</i> + <i>t2</i> ); TG ( <i>t2</i> + <i>t3</i> ) |
| T1/T2/A3 | B                 | B                  | N                 | Cyan                                         | TP ( <i>t2</i> + <i>t3</i> )                               |

A: Agua  
B: Blanco

T: Tierra  
N: Negro

TG: Tierras ganadas  
*t1*,...,*t3*: tiempo (fecha)

TP: Tierras perdidas

La obtención de las subimágenes, corrección geométrica, sobreposición, análisis y clasificación, se realizó con el software ERDAS.

## RESULTADOS

Para el compuesto de color del área en estudio se cumplieron las siguientes asignaciones: la imagen más reciente de 1992 (*t3*) al cañón del rojo, la imagen de 1986 (*t2*) al verde y la de 1974 (*t1*), que es la más antigua, al azul (Cuadro 2). En la Figura 2A se muestra el despliegue resultado de la sobreposición de los cortes y en la Figura 2B el detalle para Isla del Carmen.

A partir de las combinaciones de color esperadas, para el área en estudio se obtuvieron tres situaciones en la geodinámica litoral: tierras ganadas entre 1986 y 1992, tierras

ganadas entre 1974 y 1986 y tierras perdidas entre 1974 y 1986 (Cuadro 2).

Las tierras ganadas en los dos períodos muestran tendencias acumulativas sin alternancia de fases erosivas. Esta situación es evidente para la parte occidental de Isla del Carmen (Figura 2B), en donde las arenas biogénicas de fragmentos conchíferos y terrígenos se consolidan en cordones litorales, debido al aporte constante de sedimentos y a las corrientes litorales locales.

Por otra parte, en Punta Zacatal se muestra la tendencia contraria y, aunque en el compuesto de color sólo se detecta un primer período regresivo entre 1974 y 1986, la tendencia erosiva se mantiene al no mostrar entre 1986 y 1992 un período acumulativo.

Esta última se identifica en campo a través del afloramiento de raíces y la formación de estructuras edáficas de pedestal en manglares y palmares costeros cultivados, así como por la apertura localizada de canales y paleocanales que cortan los camellones de los cordones litorales de reciente formación.

En la Figura 3 se muestra la clasificación supervisada a partir de la cual se obtuvieron las estadísticas de areales y porcentuales (Cuadro 2) de los cambios en la geomorfología litoral del área en estudio durante los últimos 25 años.

Cuadro 2. Resultado de la clasificación supervisada del compuesto de color multitemporal (1974-1986-1992) para el área en estudio

|              | Azul<br>t1<br>(1974) | Verde<br>t2<br>(1986) | Rojo<br>t3<br>(1992) | Cambios<br>geomorfológicos          | Color    | ha                | %             |
|--------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------------------|----------|-------------------|---------------|
| Agua         | N                    | N                     | N                    | Agua                                | Negro    | 22 425.281        | 66.46         |
| Tierra       | B                    | B                     | B                    | Tierras estables y/o<br>compensadas | Blanco   | 11 438.641        | 31.12         |
| A1/A2/T3     | N                    | N                     | B                    | Tierras ganadas<br>(t2+t3)          | Rojo     | 457.920           | 1.25          |
| A1/T2/T3     | N                    | B                     | B                    | Tierras ganadas<br>(t1+t2)          | Amarillo | 151.920           | 0.41          |
| T1/A2/A3     | B                    | N                     | N                    | Tierras perdidas<br>(t1+t2)         | Azul     | 279.720           | 0.76          |
| <i>Total</i> |                      |                       |                      |                                     |          | <i>36 753.480</i> | <i>100.00</i> |



Figura 2A. Compuesto de falso color con las tres bandas del IRC correspondientes a cada fecha (1974, 1986, 1992) en el área en estudio.



Figura 2B. Acercamiento que muestra en detalle los resultados obtenidos del compuesto de color en Isla del Carmen, Campeche.

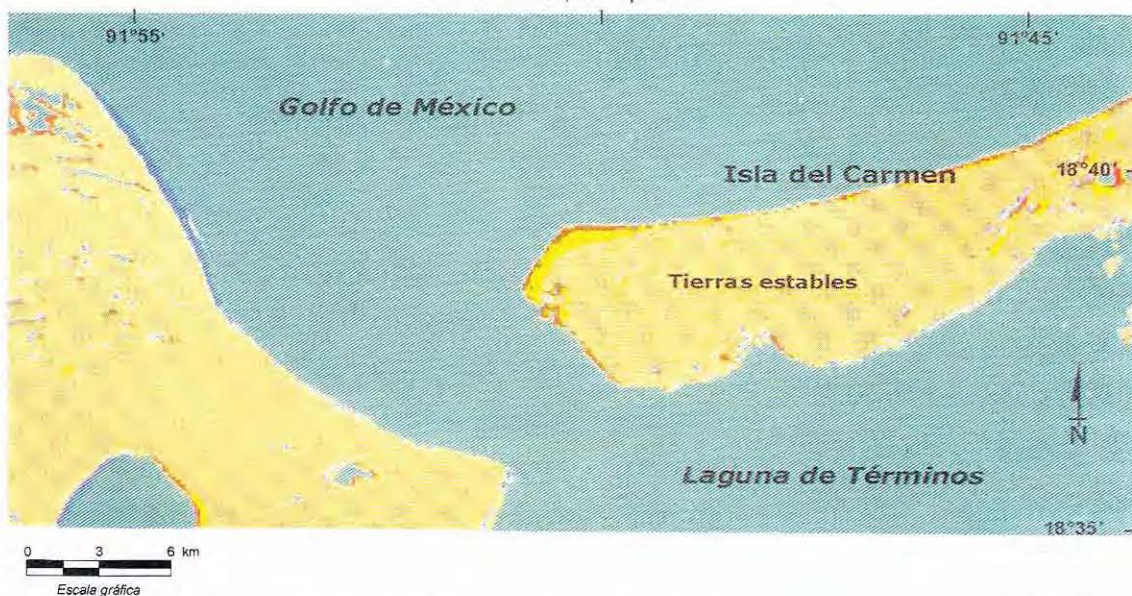


Figura 3. Cambios morfológicos en el litoral de Punta Zacatal y parte occidental de Isla del Carmen, Campeche, México (1974-1986-1992). El color rojo = tierras ganadas entre 1986 y 1992; amarillo = tierras ganadas entre 1974 y 1986; azul = tierras perdidas entre 1974 y 1986.

Según las estadísticas obtenidas durante el período de estudio se han perdido cerca de 280 ha de tierras costeras y se han ganado 609 ha. Asimismo, en dirección perpendicular al litoral durante el mismo período, la línea de costa ha ganado como máximo 0.43 km en Playa Norte (parte occidental de Isla del Carmen) y perdido 0.29 km en Punta Zacatal. Estas cantidades reflejan la geodinámica litoral del área en estudio y no del sistema costero regional.

## CONCLUSIONES

El uso de esta metodología permite identificar espacial y temporalmente los procesos de erosión y acreción en la zona costera. Estas combinaciones de color muestran no sólo lo que pasa de una fecha a la otra, sino a lo largo de un período definido de estudio, permitiendo el monitoreo sistemático de las tendencias en la dinámica litoral y el mejor conocimiento del sistema costero. Esta si-



tuación adquiere mayor importancia si se considera que en la actualidad, el cambio climático global empieza a manifestar sus impactos sobre todo en las tierras bajas de la zona costera.

Es conveniente enfatizar que la detección de cambios en la morfología costera forma parte de la fase inicial del diagnóstico del estado del sistema costero y que la causalidad de estos cambios es parte de un proceso más complejo. Éste debe considerar no sólo los procesos costeros naturales e inducidos por el hombre, sino los que tienen que ver con el comportamiento hidrológico y sedimentológico de las cuencas que desembocan en las aguas litorales protegidas y la plataforma continental. De la misma manera, deben incluirse procesos asociados a cuencas de sedimentación marginal como la subsidencia e incluso movimientos tectónicos locales y regionales.

El detalle o generalización del análisis de los cambios dependerá de la resolución espacial de la imagen y la precisión de las correcciones geométricas. Asimismo, la detección de cambios estará condicionada por la magnitud de los procesos erosivos o acumulativos y su relación con la resolución espacial del sensor. Esto significa que si los cambios son notorios y de amplias coberturas areales, una resolución alta pero de poco detalle como la de la imagen Landsat MSS aporta información suficiente. Para el área en estudio los cambios son tan significativos en un período de 25 años, que una imagen Landsat MSS con píxeles remuestreados a 60 m resulta útil para obtener una visión sinóptica de los cambios.

En la selección y procesamiento de imágenes usadas para detectar cambios, es necesario considerar factores inherentes al proceso técnico de la adquisición y manipulación de las imágenes y las condicionantes ambientales del área en estudio, si se quiere evitar obtener información. Para el primer

caso, las condiciones técnicas asociadas al ángulo de reflectancia, dispersión atmosférica, confusión espectral y corrección geométrica fueron controlables. Igualmente para el segundo caso, la fluctuación de mareas, que sería una limitante en términos de la precisión de los cambios, tampoco afectó notoriamente en el área de estudio, porque la oscilación diurna promedio es de 0.30 m.

## REFERENCIAS

- Bravo Nuñez, E. y A. Yáñez Arancibia (1979), "Ecología en la boca de Puerto Real, Laguna de Términos I. Descripción del área y análisis estructural de las comunidades de peces", *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*, UNAM, México, 6 (1):125-182.
- Dunbar, J. B., L. D. Britsch y E. B. Kemp III (1992), *Land loss rates: Report 3, Louisiana Coastal Plain*, Technical Report # GL-90-2, USACE-New Orleans District.
- El-Raey, M., S. M. Nasr, M. M. El-Hattab and I. Frihy, O. E. (1995), "Change detection of the Rosetta promontory over the last forty years", *International Journal of Remote Sensing*, 16 (5):825-834.
- Lewis, A. J., Q. Tao y D. H. Braud (1996), "Change detection in colour presentation and interpretation of multi-dimensional image data sets", *Proceedings of the 17th Asian Conference on Remote Sensing*, Colombo, Sri Lanka, pp. E-7-1 - E-7-6.
- Wayne, L. D., M. R. Byrnes, J. D. Hayden and G. Pallinti (1994), "An analytical model for land loss in Louisiana", *Proceedings of the Second Thematic Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, vol. L, 31 de enero al 2 de febrero 1994, Nueva Orleans, Louisiana, EUA, pp. 679-686.
- Williams, S. J., S. Penland y A. H. Sallenger Jr. (1991), "Geologic controls on the formation and evolution of quaternary coastal deposits of the northern Gulf of Mexico", *Proceedings Coastal Sediments*, Specialty Conference, 25 al 27 de junio, Seattle, WA, EUA.
- Yáñez Arancibia, A. y P. Sánchez Gil (1983), "Environmental behavior of Campeche sound ecological system, off Términos Lagoon, Mexico: preliminary results", *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*, UNAM, México, 10 (1):117-136.