

# COMPARACIÓN MORFODINÁMICA DE LA COSTA NOROESTE DEL ESTADO DE QUINTANA ROO, MÉXICO

• Gabriel Ruiz-Martínez •  
*Instituto Politécnico Nacional, México*

• Rodolfo Silva-Casarín\* •  
*Universidad Nacional Autónoma de México*

\*Autor de correspondencia

• Gregorio Posada-Vanegas •  
*Universidad Autónoma de Campeche, México*

## Resumen

A lo largo de las últimas cuatro décadas, en México se ha construido infraestructura en la zona costera, que ha permitido el desarrollo económico de diversas regiones del país; sin embargo, en muchos de los casos compete con procesos naturales y las experiencias evidencian desastres llamados “naturales”, no obstante el factor antropogénico. En el caso de la costa noreste de Quintana Roo, en particular en las playas de Cancún y la Riviera Maya, se ha provocado que la costa cambie de manera gradual sus estados de equilibrio natural; es por ello que los procesos y fenómenos físicos de las playas responden de manera diferente a lo deseado, lo cual implica una serie de modificaciones que pueden llegar a considerarse como adversas tanto en términos ambientales como sociales y económicos. En el presente trabajo se aplica una metodología para la determinación de los estados morfodinámicos de playas que poseen o carecen de la protección del sistema arrecifal mesoamericano. El análisis que se realizó comienza a partir del estudio de la geología y geomorfología costera; en la siguiente etapa se efectuó un análisis de las características físicas de los sedimentos que se depositan en las playas; después se simuló numéricamente el oleaje en playas con ausencia de protección natural (Cancún) y en playas donde se identificaba un sistema arrecifal (Puerto Morelos); por último se establecieron los principales parámetros morfodinámicos de las playas. Los resultados que se obtuvieron muestran la importancia que ostentan los sistemas arrecifales para el establecimiento del comportamiento de las playas, así como para el cambio de la vulnerabilidad que puede inducir la infraestructura sobre ellos.

**Palabras clave:** playas, oleaje, geomorfología, sedimentos.

## Introducción

Desde los albores de la humanidad hasta la actualidad, las personas han ejercido una gran presión sobre los sistemas litorales, para aprovechar sus múltiples recursos naturales, ya sean para fines económicos, sociales o de esparcimiento. Sin embargo, hoy en día, y como resultado de la alteración de los diferentes agentes y procesos naturales que se observan

en las márgenes costeras, se tienen constantes alertas para notificar el grado de deterioro y/o modificación acelerada de las costas alrededor del mundo (Gao, 2006), con lo cual, la tarea de preservar y mantener las playas en sus estados de equilibrio natural demanda un conocimiento más amplio acerca del funcionamiento de los diversos fenómenos que se observan en las regiones costeras, para una mejor explotación sustentable de sus recursos.

A partir de la premisa antes mencionada, el análisis del comportamiento de una costa o playa debe establecerse a partir de una perspectiva global, que permita obtener una conceptualización del comportamiento de la playa, para posteriormente abordar el sistema natural, pero desde una óptica particular que proporcione una mejor comprensión de la interacción de los diversos mecanismos que se presentan en ellos (Brommer y Bochev-van der Burgh, 2009).

Más allá de los procesos físicos y geológicos que modifican de forma instantánea o gradual el comportamiento de un sistema litoral, actividades antropogénicas tales como la extracción de arena, petróleo, gas, y el establecimiento de asentamientos humanos o desarrollos turísticos tienden a acrecentar de una manera negativa la recuperación natural que posee una playa (disminución de su resiliencia), puesto que en la mayoría de los casos se alteran las fuentes de abastecimiento natural de sedimento (e.g. dunas, barras, etcétera), las cuales se consideran como elementos de retroalimentación de las costas. La modificación de la capacidad de respuesta propia del sistema ocasionará que éste se torne más débil (Charlier y De Meyer, 1998). En México, y desde mediados de la década de los años setenta, las playas del noreste del estado de Quintana Roo (Q.R.) han sido objeto de una depredación turística tal, que el incremento de la vulnerabilidad del sistema costero ha derivado en una gama de escenarios adversos y de un alto riesgo para los sistemas naturales, y las actividades económicas y sociales que se efectúan en la región (Silva, 2007; Díez et al., 2009).

Ante las premisas planteadas entre 1966-68 para fortalecer el turismo como una herramienta de impulso a la economía de México, surge la concepción de crear la infraestructura necesaria en la zona de Cancún para convertir a la región en uno de los polos de atracción turística más importantes del país y del mundo entero, ofertando como atractivo principal las blancas arenas depositadas en la isla barrera

de Cancún (figura 1a), así como sus tranquilas y cálidas aguas de color azul turquesa, adecuadas para prácticas turísticas y de recreación (Infratur/Banxico, 1968). A partir de 1974, cuando se establece el primer hotel en la zona (Hotel Bojórquez, 332 habitaciones) y hasta el día de hoy, se continúan edificando complejos turísticos no solamente en la isla barrera sino en toda la Riviera Maya (corredor turístico Tulum-Cancún), que generan beneficios económicos de aproximadamente 3 000 millones de dólares anuales (Sedeturqr, 2008). Como un ejemplo de la relevancia económica que ha producido el febril crecimiento en la actividad turística que aún se observa en la región, de manera aproximada se calcula que en cuarenta años el número de habitaciones en hoteles ha crecido a una tasa del 11.80%, con respecto de un año a otro; en el 2008, tan sólo en Cancún se censaron 29 031 habitaciones (Sedeturqr, 2008).

Sin embargo, la localización geográfica del estado de Quintana Roo en el área del mar Caribe origina que su litoral experimente con frecuencia inundaciones por marea de tormenta, erosión de las playas, modificación de la línea de costa, etcétera, todos ellos asociados como efectos colaterales de eventos meteorológicos extraordinarios (huracanes y frentes fríos). De 1944 a 2009, en la vertiente Atlántica de América, se reportaron 723 perturbaciones meteorológicas, de las cuales un 53% adquirió el grado de huracán; del porcentaje mencionado, 78 eventos alcanzaron el territorio nacional y 11 de ellos, clasificados dentro de la máxima categoría de la escala Saffir-Simpson, han impactado en la costa de Quintana Roo (Díaz, 2010).

Ante el paso de un evento meteorológico extraordinario, las playas tienden a sufrir una serie de cambios en su comportamiento morfodinámico, lo que provoca su erosión o que se depositen sedimentos en ellas; dichos procesos marinos, en múltiples ocasiones manifiestan un efecto adverso a la zona costera, ya que los mecanismos naturales son modificados o mermados por los cambios impuestos por el ser humano en el litoral a



Figura 1. Isla barrera de Cancún-zona norte: a) fotografía tomada en 1969; b) fotografía tomada en 1995, después del paso del huracán *Wilma* por la zona.

través de la construcción de infraestructura sobre la costa (figura 1b).

Algunas de las playas de Quintana Roo son protegidas por estructuras naturales (arrecifes de coral), que generalmente tienden a disipar la energía del oleaje. Sin embargo, el papel que tienen los corales respecto al abastecimiento de sedimentos, así como el efecto que tienen sobre el acarreo litoral y el estado morfológico, se desconoce de manera precisa en estas playas, por ello, cuando se presenta un evento climatológico extremo que afecta la costa, no se tiene el conocimiento exacto de la magnitud temporal y espacial de la función que desempeñan los arrecifes para la recuperación del estado de equilibrio del litoral.

Con la metodología utilizada en este trabajo para el análisis del efecto que ejercen los obstáculos naturales sumergidos en el estado morfodinámico de las playas, se realizó una comparación entre las características morfodinámicas de una franja de costa de la Riviera Maya, localizada en Puerto Morelos, con la línea de playa de Cancún (figura 2). El conocimiento generado permitirá un mejor entendimiento del funcionamiento de las playas y, por consiguiente, se tendrán elementos

para un mejor manejo y explotación sustentable del litoral del noreste de Q.R. Para la realización de la comparación de los mecanismos morfológicos que existen entre una playa que se encuentra abrigada por el sistema arrecifal con respecto a otra que está expuesta al embate de las olas, la metodología que se aplicó fue: 1) determinación de los aspectos geológicos y geomorfológicos de la línea de costa; 2) evaluación de las propiedades del sedimento y elaboración de una zonificación de éstos; 3) caracterización regional del clima marítimo; 4) determinación de los patrones de oleaje en las zonas de estudio, y 5) evaluación de los principales parámetros morfodinámicos de los sistemas litorales.

### Geología y geomorfología

El estado de Quintana Roo (Q.R.) se ubica en la parte oriental de la península de Yucatán y se sitúa entre las coordenadas  $17^{\circ} 48'$  y  $21^{\circ} 10'$  de latitud norte y los  $86^{\circ} 48'$  y  $89^{\circ} 10'$  de longitud oeste (con respecto al meridiano de Greenwich). El estado de Q.R. colinda con el estado de Yucatán al noroeste, al norte con el Golfo de México, al oeste con el estado de

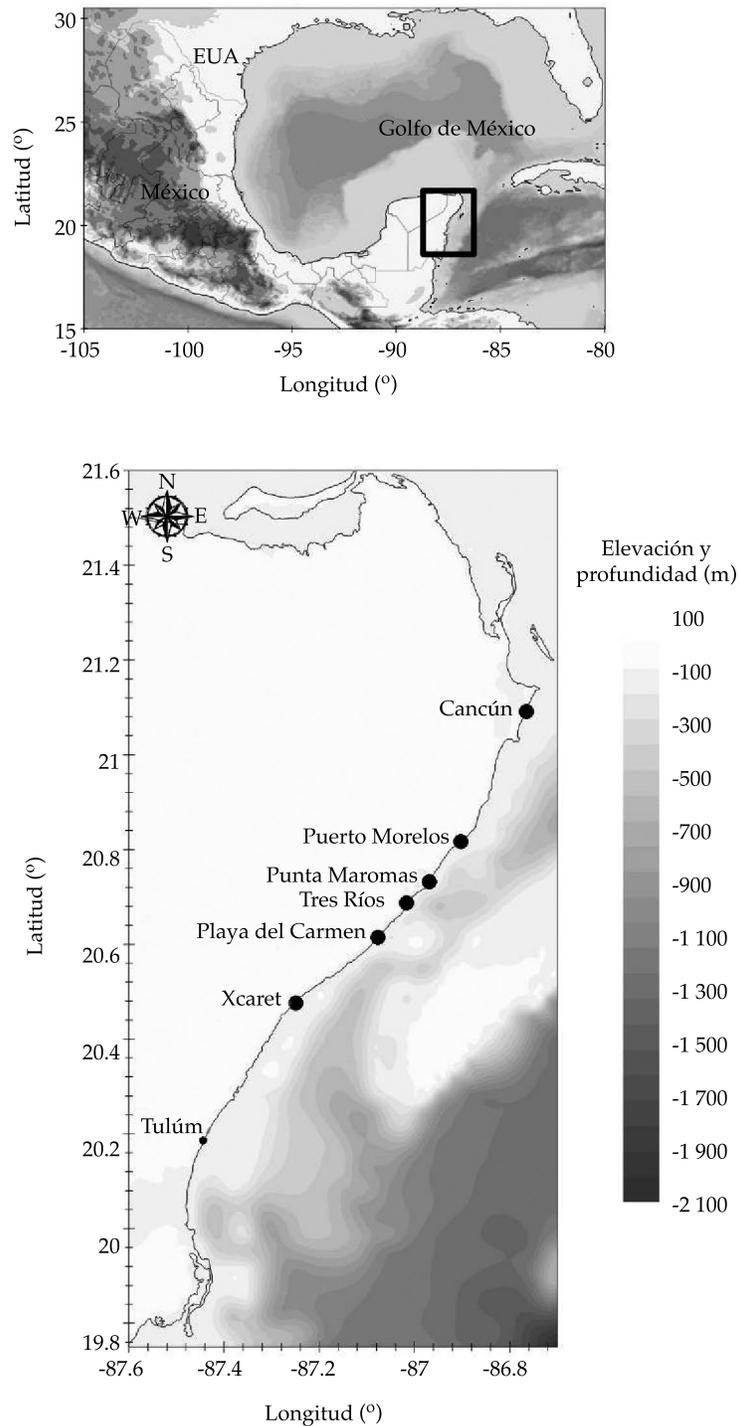


Figura 2. Zona de estudio.

Campeche, al sur con Belice y al este con el mar Caribe. Las márgenes litorales de Quintana Roo en su totalidad miden 1 176 kilómetros de

longitud, las cuales representan el 10.57% del total del litoral mexicano (INEGI, 2010) (figura 2).

Los sistemas litorales de la Riviera Maya y Cancún se localizan en una península donde básicamente su composición geológica consiste de carbonatos autigénicos y anhidritas, siendo ésta la principal razón geológica por la cual se relaciona a la península de Yucatán con la Plataforma de Florida (López, 1973). La península de Yucatán se encuentra cubierta casi en su totalidad de sedimentos del periodo Terciario y se considera como una zona tectónicamente estable, en la que se observan rasgos orográficos casi planos por la ausencia de relieves positivos de importancia; esta peculiaridad facilita la libre precipitación de carbonatos, que da lugar a la formación de rocas carbonatadas. Una de las características de la porción central y norte de la península de Yucatán es que al no existir ríos superficiales a través de los cuales fluya el agua de las precipitaciones atmosféricas o de la condensación, el líquido se percola hacia el subsuelo, formando mantos freáticos; esta agua subterránea tiende a disolver las calizas superficiales (fenómeno conocido como karst), originando generalmente cenotes. Otra consecuencia de la falta de drenaje superficial es que no existe aporte de sedimentos terrígenos al mar.

Los sistemas litorales del noreste de la península de Yucatán han evolucionado a través de los diversos periodos y épocas geológicas; la zona de estudio presenta dos características relevantes: a) el sedimento que se deposita en las playas es una acumulación de calcarenitas (sedimentos calcáreos, en este caso, de origen bioclástico) y b) las planicies costeras se generaron a partir del incremento del nivel de mar en el Pleistoceno Tardío. Las rocas carbonatadas que se identifican en las playas se componen de material oolítico (esferas calcáreas con diámetros inferiores a 2 mm), que se genera por la acción de las olas y corrientes paralelas a la costa (Aguayo et al., 1980). Ward y Brady (1979) mencionan que la sedimentación en las playas del noreste del estado de Quintana Roo es diferente a la que se reconoce en las costas del mar Caribe, puesto que en la región

del Caribe (Cuba, República Dominicana), el depósito de material carbonatado en bancos de material se encuentra dominada por las mareas.

La caracterización geomorfológica de la zona que abarca el corredor turístico Tulum-Cancún (Riviera Maya), Cancún e Isla Mujeres, fue realizada a partir de la construcción de fотомosaicos georreferenciados de imágenes aéreas de escala 1:5 000; para la zona de la Riviera Maya, las fotografías con las cuales se trabajó fueron obtenidas en el año 1999. Para la isla barrera de Cancún, la caracterización se desarrolló utilizando diferentes series de imágenes, correspondientes a los años de 1985, 1990 y 1999. Debido a la importancia económica que representa Cancún para el sector turístico del país, se analizaron los compartimientos litorales que se desarrollaron antes y después del huracán *Gilberto*, así como la configuración costera que existía en este sitio antes del huracán *Wilma*.

En lo que respecta a la caracterización que se realizó a la línea de playa de Cancún del año 1985, no se apreciaron características morfológicas que influyeran de una manera drástica en la forma que tenía la playa; de igual manera, no se identificaron obstáculos naturales que llegaran a alterar la configuración de la playa o el acarreo litoral. El rasgo más relevante desde el punto de vista geomorfológico fue el relacionado con la formación de barras paralelas a la línea de playa; en algunas zonas, las barras podían considerarse como del tipo ondulatorio. Otro aspecto interesante que se identificó de la línea de playa de Cancún fue observar el ancho de la playa, ya que se registró un promedio de 20 a 23 metros. Es importante resaltar que el fотомosaico se integraba con fotografías de 1985, tres años antes del paso del huracán *Gilberto* por la península de Yucatán, al cual se consideró como el agente meteorológico que provocó el inicio de erosión de las playas y el elemento desestabilizador del equilibrio del sistema litoral de Cancún. En 1985, a través de las imágenes, era posible percibir que las playas de Cancún ya sufrían de graves problemas de

erosión, con la reducción del ancho de playa de 40 a 20 metros (Delgado, 2007).

Para la caracterización de la línea de playa de Cancún del año 1990, dos años después del huracán *Gilberto*, los aspectos que resaltaron del análisis de este fotomosaico fueron los relacionados con la aparición de elementos rocosos en las playas. Además, se reconoció la formación de barras perpendiculares a la playa; para ese año era evidente el problema de erosión. La aparición de los estratos rocosos demostró la inestabilidad del equilibrio que tenía la playa.

Del análisis de las imágenes de Cancún para el año 1999 y de la delimitación de la playa, se observó que antes del paso del huracán *Gilberto* (1988) por la zona, el estado morfológico de la playa no podía considerarse como estable; en los años subsecuentes a dicho huracán, el sistema litoral recuperó parcialmente su estado previo, pero al ser alterados los mecanismos de retroalimentación a lo largo de veinte años, el sistema no posee la capacidad necesaria de autorregenerarse y como resultado de ello, continuamente se erosiona (Delgado, 2007). Es por ello que las playas tienden a desarrollar un estado de equilibrio, en el cual y de manera alternada, se presentan condiciones de estabilidad y desequilibrio en cortos periodos de tiempo (equilibrio hiperestático o metaestable).

Para la línea de playa que existe entre Playa del Carmen y Punta Nizuc, la mayor parte de la línea de costa presentó un contorno de líneas semirrectas, con algunas playas en forma de bolsillo o encajadas. Es precisamente en esta zona donde fue posible constatar la influencia que tienen el arrecife coralino y la zona de manglar en las costas; por ejemplo, en la periferia de Punta Maromas es posible reconocer una punta de arena, en la cual su comportamiento se rige por el arrecife de coral que se encuentra en la zona exterior de la playa y las corrientes litorales. En la celda litoral correspondiente a esta punta se observó que las playas presentan problemas de erosión, en especial por la edificación de estructuras

marinas que interrumpen el acarreo litoral que existe sobre la costa. Por medio de las fotografías fue posible identificar cómo el sedimento se movía a través de la laguna arrecifal, donde una cantidad del volumen de sedimentos oscila entre las playas de la periferia y otra cantidad de arena sale del sistema por la ruptura del cordón arrecifal. En algunas playas se encontraron evidencias visuales de canales entre el mangle y la playa; estos conductos naturales tienen la función de desalojar tanto el agua como el sedimento, que son depositados por algún evento meteorológico extremo en la zona del humedal.

El análisis de morfología costera muestra que los huracanes pueden inducir condiciones que permiten el equilibrio a largo plazo de un sistema litoral. Desafortunadamente, en muchos de los casos, el comportamiento de los sistemas costeros se concibe como un sistema lineal, y se ignora que son sistemas complejos y dinámicos que exhiben mecanismos de retroalimentación, ya sean positivos o negativos (Carter y Woodroffe, 1997). En el caso de Cancún, se identificó que los elementos de retroalimentación negativos, como pudieran ser las bocas litorales intermitentes que existían entre el sistema lagunal y el sistema litoral, han sido obstruidas por causas antropogénicas, ocasionando con ello que la línea de playa no tenga la capacidad de regenerarse de manera natural (Pedrozo, 2008). Por otro lado, los mecanismos positivos, *i.e.* las barras y las dunas de las playas de Cancún, en especial estas últimas, han sido completamente alteradas, a tal grado que las edificaciones han sido construidas en esta sección de la playa, provocando con ello una gran vulnerabilidad del sistema litoral; las dunas y las barras representan los conductos por los cuales la playa tiende a tener la capacidad de mantener cierto balance hasta el momento en que el sistema se modifica por los distintos procesos, agentes y fenómenos que se presentan en las zonas litorales.

El equilibrio morfológico que poseen algunas de las playas de la costa de Quintana Roo

se considera como dinámico, exceptuando la franja costera de Cancún, que bien podría afirmarse que posee un equilibrio metaestable. Las playas de la Riviera Maya, en especial las que se encuentran protegidas por arrecifes, guardan un estado de equilibrio estable de manera temporal; pero, de manera contraria, si el equilibrio de dichas playas se estudia a mediano y largo plazos, se consideraría dinámico. Desde la perspectiva de la morfología costera, la costa noreste de Quintana Roo es un caso excepcional para estudiar, ya que en ella se presentan sistemas costeros que son estables, dinámicos o hiperestables; las playas de Puerto Morelos, Tulum y Punta Maromas representan las zonas litorales que poseen un equilibrio estático, mientras que Playa del Carmen, Xcaret y Tres Ríos (entre otras) se consideran con un equilibrio dinámico. La mejor ejemplificación de playas con equilibrio hiperestático en nuestro país se tiene en toda la isla barrera de Cancún.

La principal conclusión que se efectuó de la caracterización fue que todas aquellas playas que exhiben la interacción entre los dos mecanismos de retroalimentación son capaces de regresar a un estado de equilibrio previo a cualquier evento que modifique dicho estado de manera temporal. Los arrecifes coralinos, además de desempeñar un papel como disipadores de la energía del oleaje, tienden a consolidar los mecanismos de retroalimentación positiva y negativa.

### Caracterización de la arena

Se recolectaron 110 muestras de arena en 36 sitios, que cubren una gran extensión de la línea de costa del estado de Quintana Roo. La determinación de las características de los sedimentos se dividió en las etapas: 1) recolección del material; 2) realización del análisis granulométrico; 3) obtención de las propiedades físicas básicas de la muestra; 4) determinación del valor del ángulo de reposo natural del material; 5) determinación de las propiedades del mezclado agua-sedimento; 6)

cálculo de los umbrales de movimiento de la partícula en el fondo marino, y 7) análisis de la forma de los granos del sedimento.

Las muestras de arena fueron extraídas de tres secciones diferentes del perfil transversal de la playa: a) en la zona seca o berma; b) zona de lavado (zona donde se observa la sobreelevación del agua por oleaje), y c) en el área o playa sumergida, aproximadamente a una profundidad de -1.5 a -2 m. Con el objeto de obtener valores representativos de cada categoría, se realizó un análisis estadístico descriptivo de los parámetros de las arenas, donde se calcularon el valor promedio, la mediana, la media geométrica, la varianza, la desviación estándar, el coeficiente de variación, la media absoluta de la desviación, el valor máximo y mínimo, el rango, el sesgo y la curtosis.

A partir de la determinación de los valores promedio del diámetro del percentil 50 ( $D_{50}$ ) del material sedimentario, en los casos de las zonas de la playa se pudo comprobar el proceso de selección de los tamaños del sedimento que el acarreo litoral realiza, ya que la arena fina que se identificó corresponde a la zona de lavado de la playa, mientras que en las zonas donde el oleaje disipa su energía y las corrientes litorales son relevantes para el transporte litoral, los tamaños de sedimentos se encontraron en la transición de arenas finas a arenas medias; por otro lado, se observó que las playas que reciben directamente la energía del oleaje, al no estar protegidas por el arrecife coralino, presentaron el mayor diámetro de sedimento de todo el universo de muestras que se analizaron. El menor tamaño de las arenas se identificó en las playas que se ven afectadas por las discontinuidades del arrecife coralino, sitios donde se aprecian los fenómenos de refracción y difracción; las playas encajadas mostraron el mayor diámetro de material de todos los sitios de extracción, y las franjas costeras que mostraron poseer la arena más fina del muestreo que se hizo fueron las de Tulum. Las arenas de Puerto Morelos tienen un diámetro de aproximadamente 0.30 mm. Las

playas de Cancún y Bahía Mujeres tienen un tamaño promedio de 0.44 mm.

Debido a la importancia que tiene la determinación de las características en la cuantificación del acarreo litoral, se generaron mapas en los cuales es posible identificar las magnitudes de los parámetros, como el  $D_{50}$ , la densidad relativa, el ángulo de reposo, el factor de forma, etcétera; en ellos es posible observar la variación que tienen los parámetros a lo largo de la costa y deducir el posible comportamiento que tiene la arena en las playas. Por ejemplo, para el caso de Cancún, se puede establecer que el sedimento de mayor tamaño tiende a desplazarse en una dirección norte-sur en Cancún. En la figura 3, la altura de las líneas verticales representa el valor del  $D_{50}$  en los puntos donde se extrajeron las muestras de la zona de lavado para la isla barrera de Cancún; como se puede observar, en algunas zonas de la barra (puntos 4A y 6) se identifica que el tamaño del sedimento decrece de una manera importante, dicho cambio podría identificarse como una zona de erosión, mientras que en

las zonas donde se detecta un mayor tamaño de grano (mayor altura de la línea) podrían considerarse como zonas de depósito (puntos 7, 8, 9).

### Caracterización del clima marítimo

A partir del re-análisis 1948-2007 del clima marítimo para la república mexicana (Silva *et al.*, 2008), que se generó a partir del uso del modelo híbrido (Ruiz *et al.*, 2009), se consultó la información correspondiente a la zona de la costa noreste de Quintana Roo. Para definir un nivel de tormenta, se consideró como todo oleaje que superara el umbral de una vez y media la altura de ola significativa media anual; es decir, la altura de la ola excediera los dos metros; los periodos del oleaje elegidos para simulación numérica del campo de oleaje fueron de ocho, diez y doce segundos; siendo éstos los que con mayor frecuencia se presentan con olas extremas en la línea de costa que se analiza. En cuanto a las direcciones de propagación de las olas, se consideró que éste,

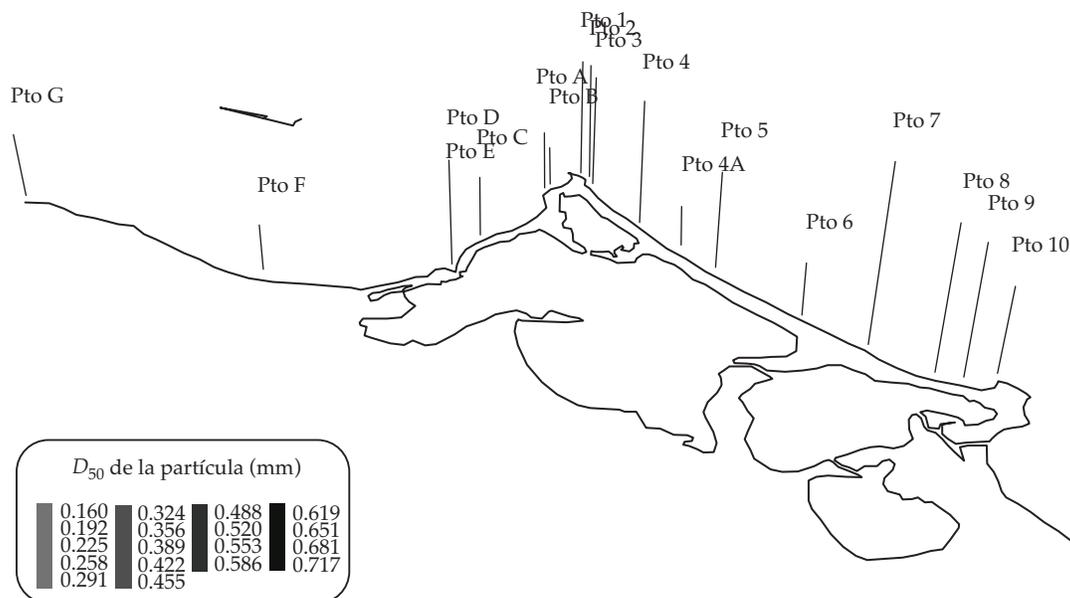


Figura 3. Distribución de tamaños de sedimento ( $D_{50}$ ) en la zona de lavado de Cancún.

principalmente, proviene de las direcciones noreste y sureste.

### Modelación del comportamiento del oleaje

Para esta etapa se decidió emplear un modelo numérico de oleaje que se fundamenta en la extensión de las ecuaciones de pendiente suave, a fin de conocer las principales características del oleaje en los sistemas litorales de la región de estudio. El modelo numérico que se utilizó para determinar el campo de oleaje en la zona de estudio fue el WAPO3 (Silva *et al.*, 2005); éste resuelve la ecuación de la pendiente suave, la cual permite simular de manera aceptable los fenómenos de asomeramiento, reflexión, refracción, rompiente del oleaje y difracción, que se producen por la presencia de los arrecifes de coral en el sistema costero, y por las condiciones complejas de los contornos batimétricos que existen en la zona. Como resultado de la simulación numérica del oleaje en ambas zonas de estudio, se obtuvieron mapas de la superficie libre del agua, alturas significantes y energía del oleaje; además, se determinaron las características de la altura y el periodo de la rompiente en la zona litoral; siendo estas últimas características del oleaje de relevancia para establecer los estados morfodinámicos de las playas.

### Parámetros morfodinámicos

Con base en los datos obtenidos de la caracterización geomorfológica, sedimentos y oleaje de la región litoral del noreste de Quintana Roo, los estados morfodinámicos de las playas se determinaron a partir de las siguientes relaciones adimensionales: parámetro de escala de la rompiente ( $\epsilon$ ), velocidad de caída del grano ( $\Omega$ ), efecto relativo de las mareas (RTR) y el parámetro de estabilidad de la playa ( $K_s$ ) (Short, 2000), las cuales son:

$$\epsilon = \frac{2\pi a}{gT \tan^2 \beta} \quad (1)$$

$$\Omega = \frac{H_b}{TW_f} \quad (2)$$

$$RTR = \frac{tr}{H_b} \quad (3)$$

$$K_s = \frac{H_b}{gT^2 D_{50}} \quad (4)$$

donde  $H_b$  es la altura de la ola en rompiente (m);  $T$ , el periodo de la ola (s);  $a$ , la amplitud del oleaje, dada en metros;  $\beta$ , la pendiente de la playa ( $^\circ$ );  $g$ , la aceleración de la gravedad ( $\text{ms}^{-2}$ );  $W_f$ , la velocidad de caída del sedimento ( $\text{ms}^{-1}$ );  $tr$ , el valor del rango de la marea (m), y  $D_{50}$  representa el diámetro del percentil del sedimento (m) número 50.

En lo que respecta al rango de mareas que se observan en la región de estudio, las mareas fluctúan entre 20 y 40 cm (Coronado *et al.*, 2007).

### Discusión

A través de los parámetros morfodinámicos calculados, se identificó que cuando el oleaje proviene de la dirección noreste, la línea de costa de Cancún se comporta como una playa que disipa la energía del oleaje (figura 4); sin embargo, debido a que el sistema litoral es tan frágil, la condición de disipación de energía puede alterar de una manera substancial el estado morfodinámico de las playas de la isla barrera. Se ha mencionado que este tipo de playas posee amplias zonas de playa seca y rompientes, que permiten la atenuación de la energía de las olas; en Cancún, los problemas de erosión reducen de manera significativa el ancho de la playa y aumentan la zona de rompientes, por lo que bajo estas condiciones, cuando se presenta un oleaje de tormenta, la zona de rompientes se traslada a la región de la playa seca; si existieran dunas naturales en la línea de costa, éstas se encargarían de regular las dimensiones de las zonas de la playa durante el evento extremo. Pero en Cancún, la infraestructura hotelera se encuentra edificada sobre la duna, lo que conlleva a que la playa

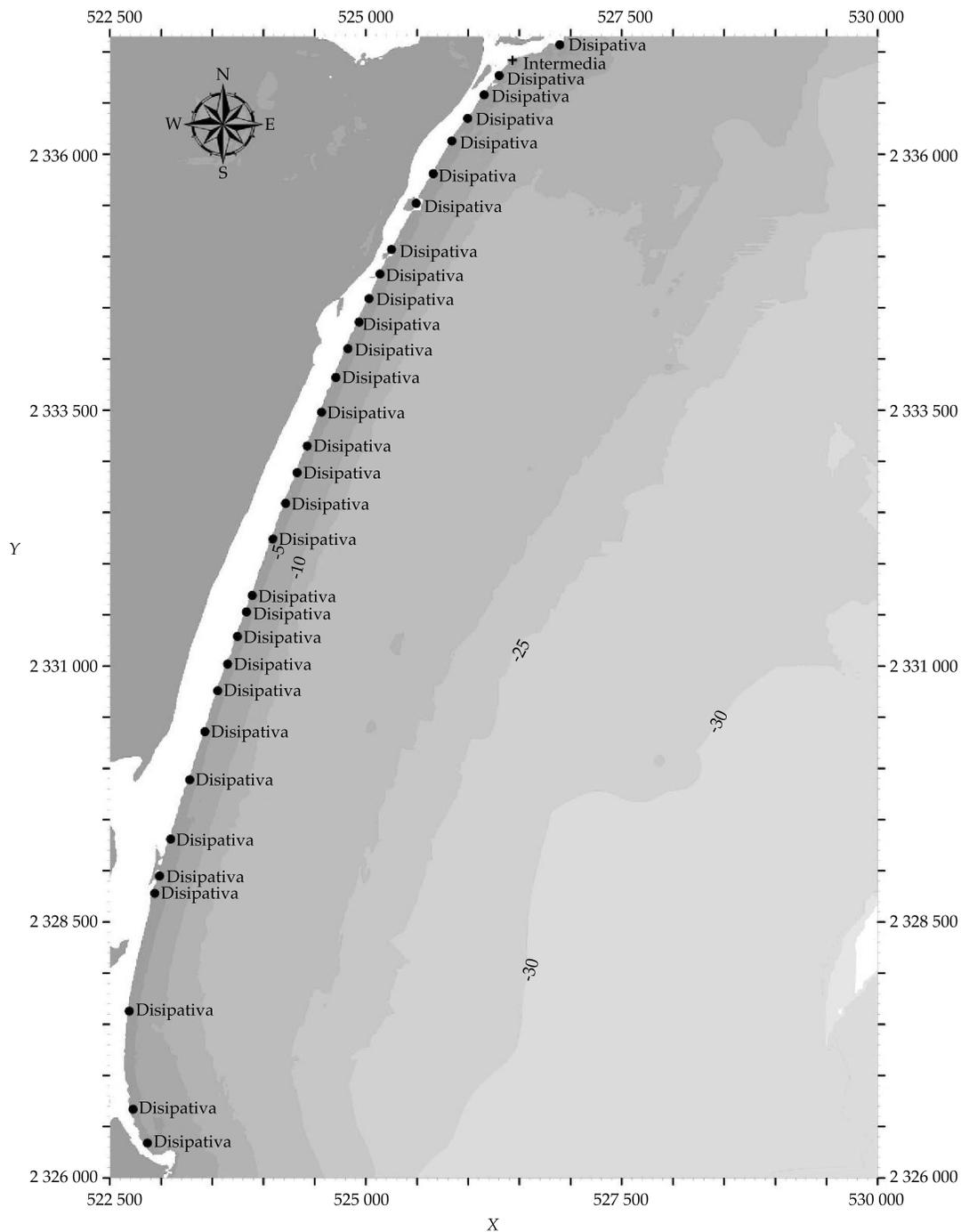


Figura 4. Estado modal de las playas de Cancún, con una condición de oleaje dirección noreste.

no tenga la capacidad para que sus zonas (y el actuar de éstas) oscilen en las tormentas. La disipación de energía en condiciones normales se presenta en la zona de rompientes y parcialmente sobre la playa seca; en una

tormenta, normalmente bajo la influencia de un aumento del nivel del mar por el efecto de la marea de tormenta, la zona de disipación se desplaza en dirección hacia las dunas, lo que induce que dependiendo de la magnitud de la

variación del nivel del mar y de la energía del oleaje, sólo parte de la energía se disipa en la playa seca y otra es reflejada hacia el mar, lo que detona de manera acentuada los procesos de erosión en Cancún.

Por otra parte, las playas de Puerto Morelos que se encuentran protegidas por el sistema coralino (figura 5) muestran una tendencia a moderar o disipar la energía de las olas que llegan del noreste. En la costa es posible identificar las características inherentes a este

tipo de playas; de manera contraria al caso de Cancún, las playas de la región presentan anchos de playa y zonas de rompientes que aminoran los efectos de las olas. A partir de los resultados obtenidos se ha valorado el efecto de atenuación de las olas que brinda el arrecife de coral a la playa; es por ello que cuando las condiciones de tormenta dejan de presentarse, la costa se adapta a las ligeras variaciones que prevalecen después de la tormenta. Al comparar los estados de la playa que se observan

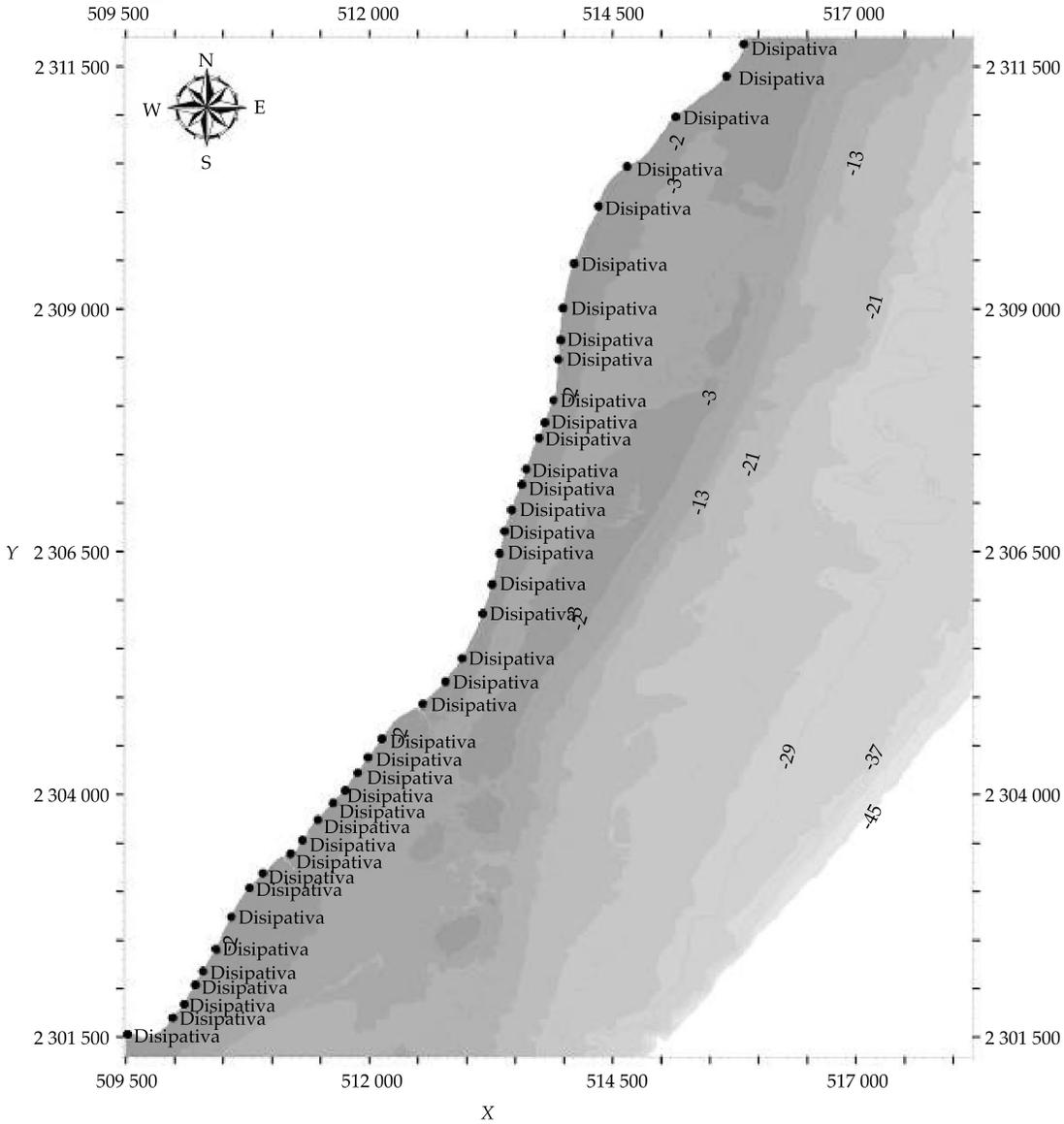


Figura 5. Estado modal de las playas de Puerto Morelos, con una condición de oleaje dirección noreste.

tanto con oleajes que provienen del noreste y sureste en las zonas que se analizaron, no se encontró una variación significativa entre los tipos de ambas direcciones; lo anterior se debe a que no existe una variación significativa de valores entre los parámetros de las ecuaciones de  $\xi_{br}$ ,  $\Omega$  y RTR.

Sin embargo, los estados modales de las playas muestran cierta diferencia cuando se clasifican, según su rango de marea. Considerando que las olas arriban del sureste, un porcentaje de las playas en Cancún revela que son ultradisipativas; mientras otro porcentaje se clasifica como playas con terrazas de marea baja (figura 6). En la región de Puerto Morelos fue común identificar las playas con terrazas de bajamar (figura 7); es relevante resaltar que las playas que se determinaron como ultradisipativas en esta zona corresponden a los sitios donde se interrumpe el sistema arrecifal.

En cuanto a la evaluación del comportamiento morfológico según los procesos de erosión y depositación, en todos los escenarios planteados en Puerto Morelos, se encontró que en gran parte de esta costa, el proceso de erosión es el predominante y sólo en un par de sitios los procesos se consideraron como en una etapa intermedia. En la figura 8 se muestra el tipo de procesos que se presentaría con un oleaje de tormenta que proviene del sureste y con un sedimento de un  $D_{50} = 0.1986$  mm que se deposita en la playa. Sin embargo, para el caso de Cancún, se puede identificar la relevancia que tiene el tamaño del sedimento en los procesos que sobrevienen en las playas. Por ejemplo, cuando las olas se aproximan a la costa a partir del sureste y considerando que en la playa se depositan sedimentos de  $D_{50} = 0.1986$  mm (figura 9) a través de la línea de costa, se identifican zonas intermedias, de erosión y depositación; por otra parte, cuando aumenta el tamaño del sedimento ( $D_{50} = 0.8696$  mm) (figura 10), la mayoría de las playas tiende a erosionarse, en especial todas las playas que se encuentran al norte de la isla barrera, mientras que las del sur se

clasifican como intermedias. Si se considera la variación del tamaño de sedimentos en las playas de Cancún y Puerto Morelos, con oleaje que arriba a la costa del sureste, se observa que los procesos que predominan son la erosión y un estado intermedio. Es interesante hacer notar que en el caso de Cancún se esperaba que el proceso dominante fuera la erosión, sin embargo se observó que la mayoría de las playas se podría considerar como intermedias, ya que los procesos de este tipo de playas suelen cambiar si se analiza cómo una playa erosiva se transforma gradualmente a una de depositación y, de manera opuesta, cómo un proceso de azolvamiento tiende a emigrar a la erosión; ante ello, la condición de estabilidad que poseen tales sitios reforzaría clasificar a Cancún como una región de playas metaestables.

A partir de las figuras presentadas se observa que los procesos marinos que actúan en las playas de Cancún están íntimamente ligados al tamaño del sedimento; dicha afirmación cobra relevancia ante el hecho de que eventualmente se realizan rellenos de playas y la elección del material de relleno debería estar basada en resultados como los que se han mostrado para garantizar un ancho de playa, que de igual manera influiría en el estado morfodinámico de la playa.

Con base en el estado morfodinámico, y considerando los parámetros RTR,  $\varepsilon$  y  $\Omega$ , que muestran las regiones analizadas, es posible identificar que tanto las playas de Cancún, así como las de Puerto Morelos, se comportan como sistemas que disipan la energía del oleaje cuando la dirección de propagación del oleaje es noreste (figuras 4 y 5); por otra parte, si el análisis modal de las playas se realiza solamente considerando RTR y  $\Omega$ , y una condición de oleaje que proviene del sureste, la franja costera de Cancún se comporta como ultradisipativa (figura 6); mientras que en Puerto Morelos, de los puntos donde se analizó la playa, 309 de ellos se consideran como playas con terraza de marea baja y sólo 74 sitios se determinaron como playas ultradisipativas (figura 7).

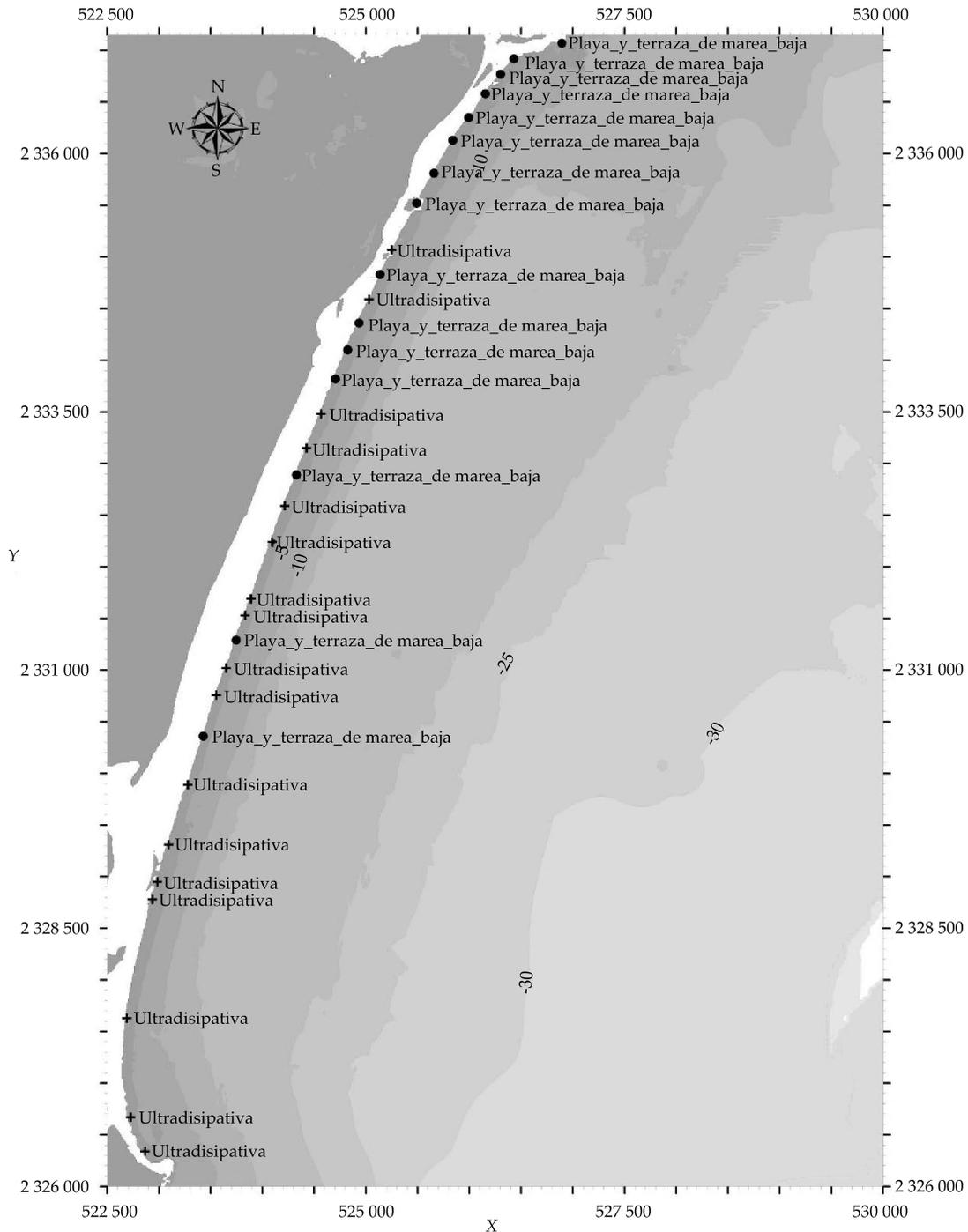


Figura 6. Estado modal de las playas de Cancún, con una condición de oleaje dirección sureste.

## Conclusiones

La modificación de la configuración costera puede traer consigo repercusiones, que

pueden considerarse como positivas o negativas según la perspectiva desde la cual se analicen; en los últimos veinte años, el litoral del noreste del Quintana Roo ha

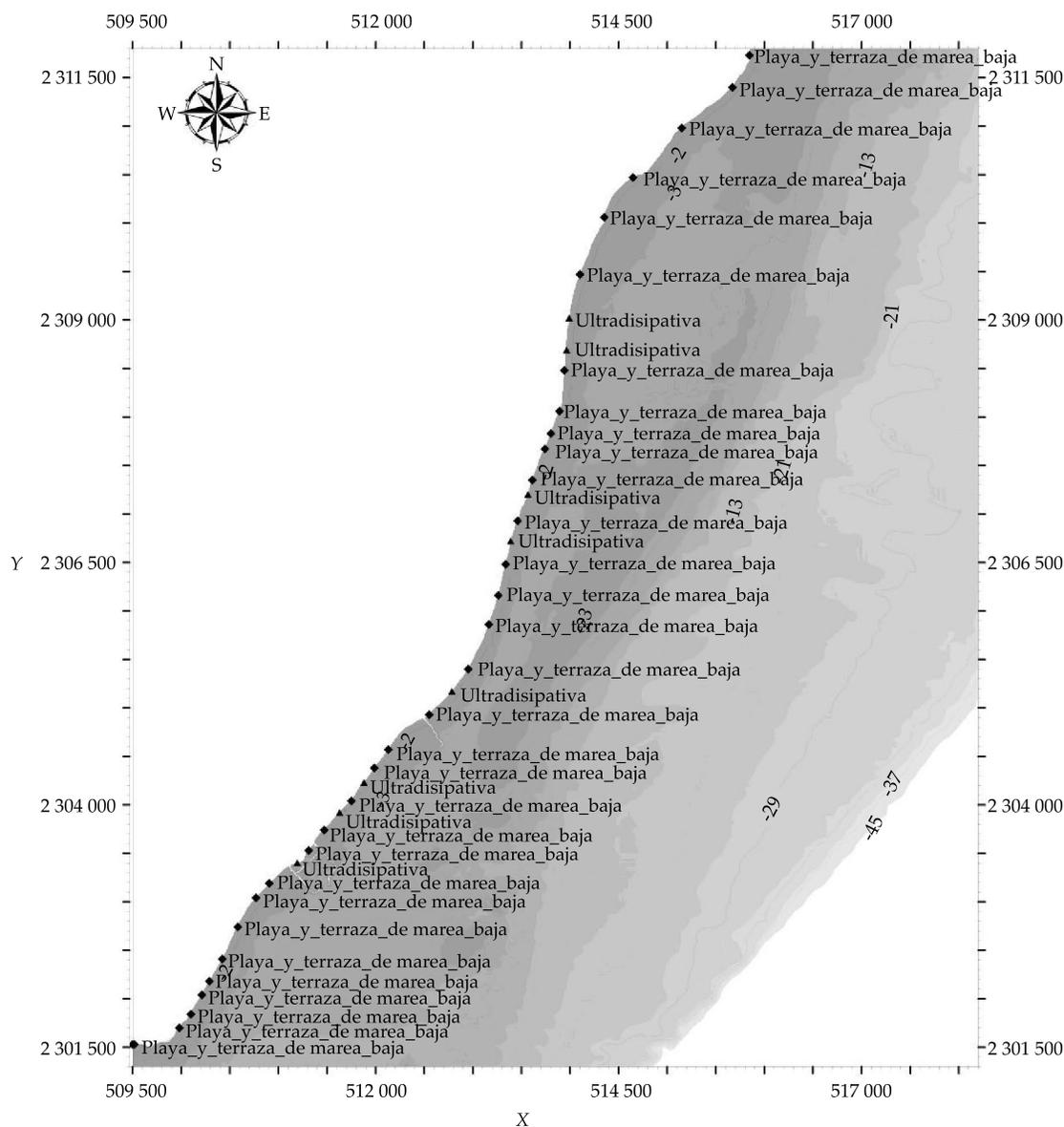


Figura 7. Estado modal de las playas de Puerto Morelos, con una condición de oleaje dirección sureste.

sufrido de forma paulatina cambios en su comportamiento morfodinámico debido a factores humanos y naturales; en la gran mayoría de las ocasiones, un inadecuado manejo de los recursos naturales en la costa ha contribuido a que las alteraciones en las playas pongan en riesgo las actividades económicas, sociales y ambientales que se observan en éstas. Por tal razón, es esencial que exista entendimiento y comprensión de las relaciones que se derivan de cada uno de

los procesos y fenómenos que interactúan en el sistema litoral; una adecuada concepción de los elementos que conforman una costa conducirá a predicciones adecuadas y acordes, según el uso o la explotación sustentable que se le quiera dar a las costas.

A partir de los resultados que se observaron, las simulaciones permiten explicar en buena medida los mecanismos por los cuales se da la pérdida de sedimento en la playa en Cancún. Estas pérdidas se deben

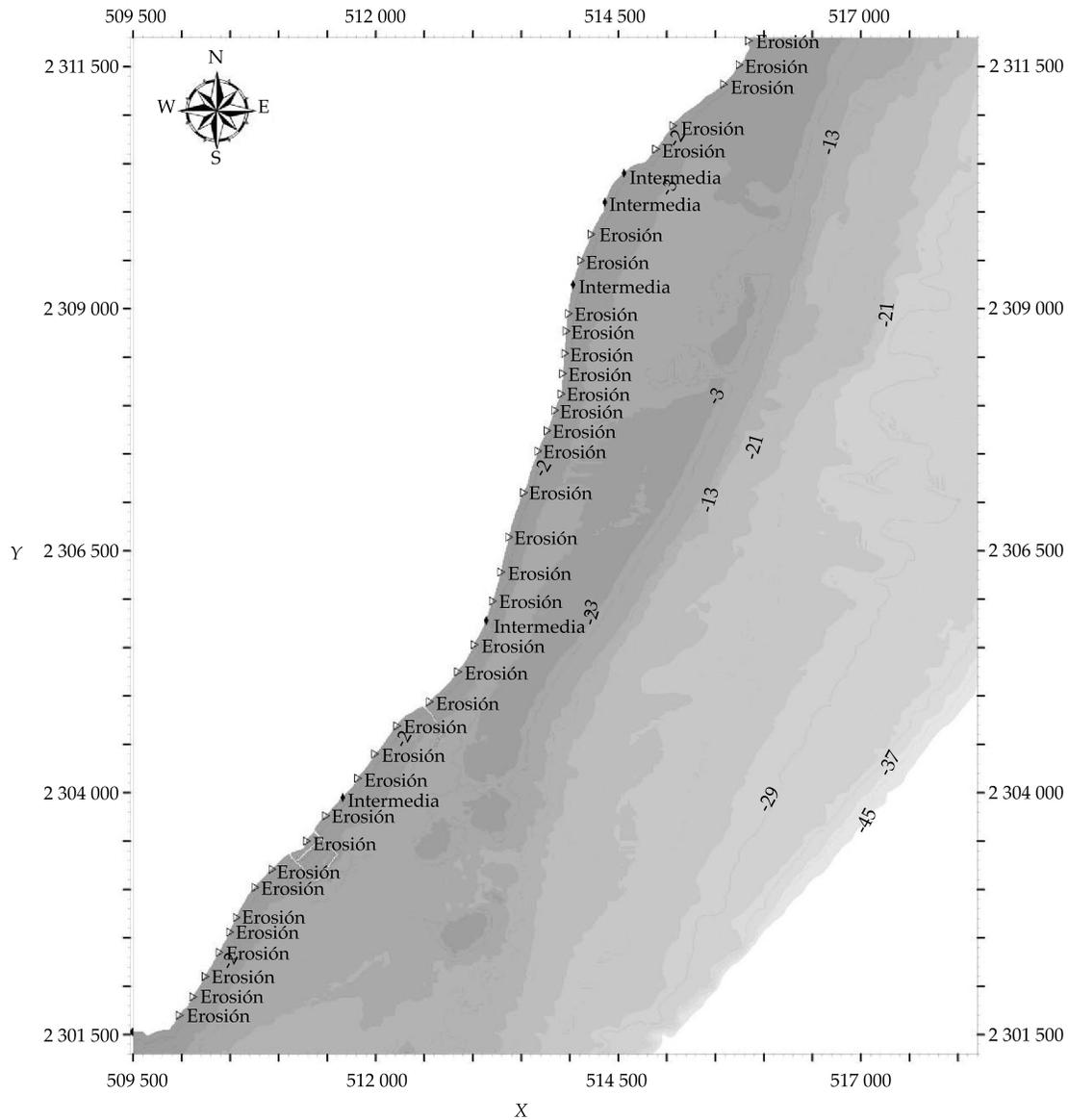


Figura 8. Estado morfodinámico de Puerto Morelos, con una condición de oleaje dirección sureste y  $D_{50} = 0.1986$  mm.

en gran medida a que la energía del oleaje induce corrientes litorales que transportan el sedimento hacia fuera de la celda litoral. Las estimaciones de los campos de oleaje local permitieron comprender la función de los arrecifes como protección costera natural. De ahí se concluye que en condiciones ordinarias, aun cuando parte de la energía del oleaje pasa a través de las discontinuidades que existen en el cordón arrecifal, no genera condiciones

con la capacidad de alterar de manera significativa los estados morfodinámicos y de equilibrio de las playas. Por otra parte, cuando se presenta una tormenta, la sobre elevación del nivel del mar asociada hace que el oleaje se propague por encima de los arrecifes, provocando una condición más energética en la playa. Sin embargo, la disipación de energía debida al arrecife es suficiente para evitar que los mecanismos de recuperación

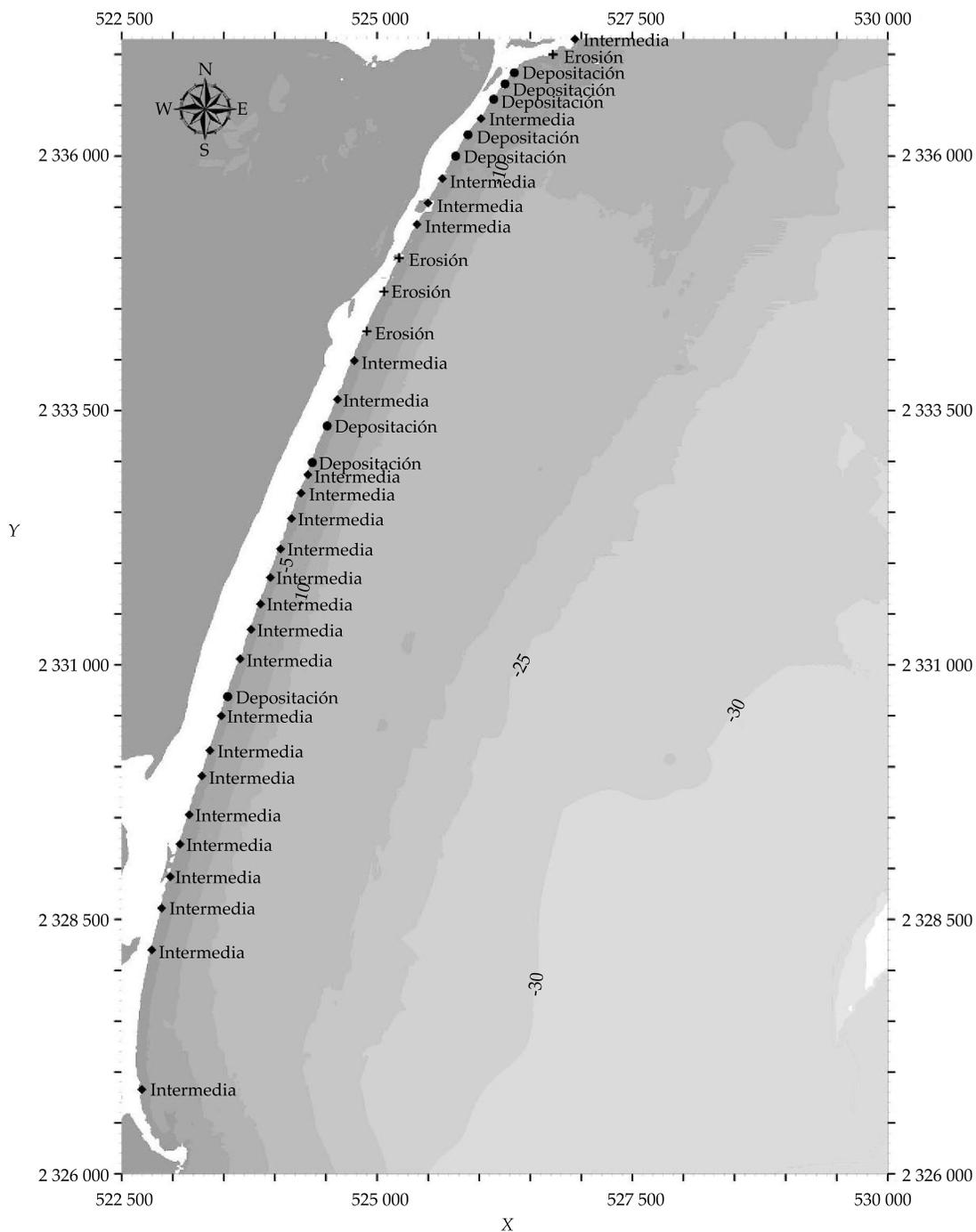


Figura 9. Estado morfodinámico de Cancún, con una condición de oleaje dirección sureste y  $D_{50} = 0.1986$  mm.

natural de las playas sean afectados de manera considerable. Luego entonces, dos condiciones son directamente responsables de la pérdida permanente de playa seca: el debilitamiento o no existencia del arrecife, y la actividad hu-

mana. Obviamente, la combinación de ambas representa la condición más desfavorable.

Recibido: 12/08/11  
Aceptado: 11/10/12

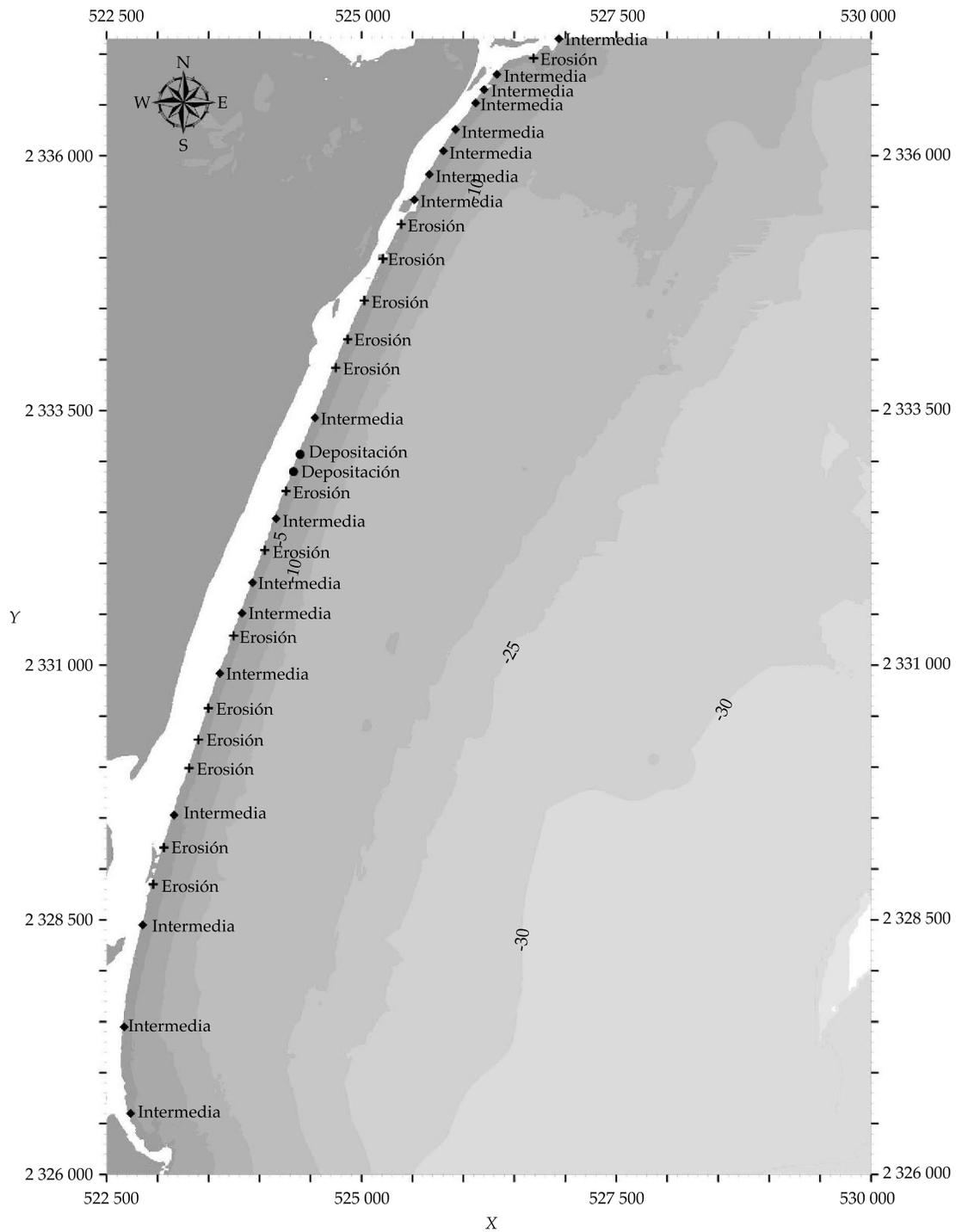


Figura 10. Estado morfodinámico de Cancún, con una condición de oleaje dirección sureste y  $D_{50} = 0.8696$  mm.

## Referencias

AGUAYO, J., BELLO, R., VECCHIO, M., ARAUJO, J. y BASAÑEZ, M. Estudio sedimentológico en el área de

Tulum-Cancún-Isla Mujeres, Estado de Quintana Roo, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Vol. XLI, núm. 1-2, 1980, pp. 15-32.

- BROMMER, M.B. and BOCHEV-VAN DER BURGH, L.M. Sustainable coastal zone management: a concept for forecasting long-term and large-scale coastal evolution. *Journal of Coastal Research*. Vol. 25, No. 1, January, 2009, pp. 181-188.
- CARTER, R.W.G. y WOODROFFE, C.D. Coastal evolution: an introduction. En *Coastal evolution: Late Quaternary shoreline morphodynamics*. Carter, R.W.G. and Woodroffe, C.D. (editors). Cambridge: Cambridge Press University, 1997, pp. 1-33.
- CHARLIER, R.G. and DE MEYER, C.P. Coastal zone management. *Coastal erosion response and management*. Charlier, R.G. and De Meyer, C.P. Berlin: Springer, 1998, pp. 6-18.
- CORONADO, C., CANDELA, J., IGLESIAS, R., SHEINBAUM, J., and OCAMPO, F. On the circulation in the Puerto Morelos fringing reef lagoon. *Coral Reefs*. Vol. 26, No. 1, March 2007, pp. 149-163.
- DELGADO, A. *Análisis de la dinámica geomorfológica de la zona hotelera de Cancún, como contribución al desarrollo de un plan de manejo costero*. Tesis de maestría. Campeche, México: Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México de la Universidad Autónoma de Campeche (EPOMEX-UAC), 2007.
- DÍAZ, S.C. Variabilidad de los ciclones tropicales que afectan a México. *Interciencia*. Vol. 35, núm. 4, abril de 2010, pp. 306-310.
- DIEZ, J., ESTEBAN, M., and PAZ, R. Cancún-Nizuc coastal barrier. *Journal of Coastal Research*. Vol. 25, No. 1, January, 2009, pp. 57-68.
- GAO, S. Catchment Coast interactions in the Asia-Pacific Region. *Global Change and Integrated Management. The Asia-Pacific Region*. Harvey, N. (editor). Coastal systems and continental margins series. Vol. 10. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2006, pp. 67-92.
- INEGI. *Anuario estadístico de los Estado Unidos Mexicanos, 2009*. Aguascalientes, México: INEGI, 2010.
- INFRATUR/BANXICO. *Tourist development Project of Cancún, Q.R.* Mexico City: Banxico, 1968.
- LÓPEZ, E. Estudio geológico de la Península de Yucatán. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*. Vol. 25, núm. 1-3, 1973, pp. 22-72.
- RUIZ, G., SILVA, R., PÉREZ, D., POSADA, G. y BAUTISTA, G. Modelo híbrido para la caracterización del clima marítimo. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XXIV, núm. 3, julio-septiembre de 2009, pp. 5-32.
- SEDETURQR. *Número de habitaciones en centro turístico* [en línea]. Citado en marzo de 2008. Disponible para World Wide Web: <http://sedetur.qroo.gob.mx/estadisticas/estadisticas.php>
- SHORT, A. *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*. New York: John Wiley and Sons, Ltd. 2000.
- SILVA, R. *Informe final: caracterización morfodinámica y evaluación de alternativas para la recuperación de las playas de la zona norte de Quintana Roo*. México, D.F.: Proyecto Fondo Mixto Conacyt-Gobierno de Quintana Roo, QROO-2003-C02-12707, 2007.
- SILVA, R., BORTHWICK, A.G.L. y EATOCK, R. Numerical implementation of the harmonic modified mild-slope equation. *Coastal Engineering*. Vol. 52, núm. 5, May, 2005, pp. 391-407.
- SILVA, R., RUIZ, G., POSADA, G., PÉREZ, D. y RIVILLAS, G. *Atlas de clima marítimo de la vertiente atlántica mexicana*. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2008.
- PEDROZO, D. *Respuesta hidrodinámica del sistema laguna Nichupté, Cancún, México*. Tesis de maestría. México, D.F.: DEPEFI-UNAM, 2008.
- WARD, W.C. and BRADY, M. Strandline sedimentation of carbonate grainstones, Upper Pleistocene, Yucatán Peninsula. *American Association Petroleum Geologist Bulletin*. Vol. 63, No. 3, March, 1979, pp. 362-369.

## Abstract

RUIZ-MARTÍNEZ, G., SILVA-CASARÍN, R. & POSADA-VANEGAS, G. *Morphodynamic comparison of the Northeast shoreline of Quintana Roo, Mexico*. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. IV, No. 3, July-August, 2013, pp. 47-65.

Over the last 40 years, infrastructure has been built in coastal regions in Mexico, contributing to the economic development of diverse regions in the country. Nevertheless, in many cases this infrastructure competes with natural process and these experiences have provided evidence of disasters that are called "natural," although the factors are anthropogenic. In the case of the beaches on the northeast coast of Quintana Roo, in particular in Cancun and the Riviera Maya, a gradual loss has occurred in the coast's natural balance. This has resulted in an undesirable response by the physical processes and phenomena related to beaches, involving a series of modifications that can be considered adverse both in environmental as well as social and economic terms. This work applies a methodology to determine the morphodynamic state of beaches with and without the protection of the Mesoamerican reef system. The analysis began with the study of the geology and geomorphology of the coast. The next phase involved an analysis of the physical characteristics of the sediments deposited on the beaches. Then, a numerical wave simulation was carried out for beaches without natural protection (Cancun) and those identified as having a reef system (Puerto Morelos). Lastly, the main morphodynamic parameters of the beaches were established. The results obtained show the importance of reef systems to the establishment of the behavior of beaches as well as to changes in vulnerability that can be caused by infrastructure.

**Keywords:** beaches, wave, geomorphology, sediments.

## Dirección institucional de los autores

*Dr. Gabriel Ruiz Martínez*

Investigador posdoctoral  
Laboratorio de Procesos Costeros y Oceanografía Física  
Centro de Investigación y Estudios Avanzados, U. Mérida  
Instituto Politécnico Nacional  
Ant. carr. a Progreso, km 6, Cordomex  
97310 Mérida, Yucatán, MÉXICO  
Teléfono: +52 (999) 9422 923  
gruizm@mda.cinvestav.mx

*Dr. Rodolfo Silva Casarín*

Investigador titular  
Coordinación de Hidráulica  
Instituto de Ingeniería  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Circuito Universitario s/n, Coyoacán  
04510 México, D.F., México  
Teléfono: +52 (55) 5623 3600  
rsilvac@iingen.unam.mx

*Dr. Gregorio Posada Vanegas*

Investigador  
Instituto de Ecología, Pesquería y Oceanografía del Golfo de México  
Universidad Autónoma de Campeche  
Av. Agustín Melgar s/n, entre Juan de la Barrera y Calle 20, Buenavista  
24039 San Francisco de Campeche, Campeche, México  
Teléfono: +52 (981) 8119 800  
gposadav@uac.mx