

# CARACTERIZACIÓN DE OLEAJE FRENTE A LA COSTA DE SISAL YUCATÁN

**José López González, Miguel F Domínguez Sandoval**

*Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Sisal, Yucatán 97356, México*

## RESUMEN

Se presentan los resultados de observaciones de oleaje de la zona noroeste de la Península de Yucatán. El régimen de oleaje de la zona noroeste de la Península de Yucatán, se determinó a partir de mediciones in situ con equipo ADCP (por sus siglas en inglés, Acoustic Doppler Current Profiler) de la marca RDi colocado en dos sitios en diferentes temporadas, aproximadamente a la misma profundidad a partir de 2010 a la fecha (2016). Las observaciones reflejan que existen dos temporadas bien definidas (primavera-verano y otoño-invierno) en las cuales la intensidad y dirección del oleaje cambia significativamente. En ambas temporadas el régimen de oleaje se ve fuertemente influenciado por la variabilidad del régimen de viento. En primavera-verano por la mañana, se presentan vientos suaves de la dirección sureste (de tierra) que no generan oleaje significativo en la costa; por la tarde, la dirección del viento cambia al noreste observándose brisas marinas que generan oleaje y corrientes en la misma dirección. En temporada invernal, este régimen de brisas marinas se combina con los llamados “Nortes” debido a que la zona se encuentra expuesta a los conocidos frentes fríos que viajan de Norteamérica hacia el sur con vientos intensos del noroeste los cuales generan un importante régimen de oleaje de esa dirección [Figueroa-Espinoza et al., 2014].

## INTRODUCCIÓN

La plataforma continental de la Península de Yucatán se extiende por más de 100 km a partir de la línea de costa con una pendiente del terreno muy suave del orden de 1:1000 conformada mayormente por rocas sedimentarias depositadas sobre un basamento paleozoico

[Carranza et al., 1979; Lugo-Hubp and Aceves-Quezada, 1992]. Por lo anterior, los procesos de generación y transformación de oleaje son muy particulares ya que el oleaje dominante es principalmente generado en la zona. Por lo tanto, conocer el régimen marítimo de la zona costera, es fundamental ya que de esto

dependen muchos de los procesos costeros como: el transporte de sedimentos, la erosión e inundación entre otros [Appendini et al., 2012; Cuevas et al., 2013; Silva et al., 2014] Además, esta información es muy importante para el diseño y planeación de infraestructura costera debido al embate de ciertos fenómenos meteorológicos intensos que inciden en la costa como huracanes y tormentas tropicales [Meyer-Arendt, 1993]

En 2009-2010, el Instituto de Ingeniería de la UNAM establece una sede denominada, “Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros” (LIPC) en el estado de Yucatán. Desde entonces, se inician diversas acciones para determinar las condiciones que imperan en la región dentro de las cuales se abarcan modelaciones numéricas [Appendini et al., 2014; Enriquez et al., 2010], así como campañas de campo para determinar los parámetros físicos y oceanográficos con la finalidad de crear una base de datos y determinar las condiciones y los parámetros relacionados al clima marítimo de la zona.

Han existido diversos esfuerzos y estudios para determinar algunos de estos parámetros, sin embargo éstos han sido esporádicos y limitados en tiempo y espacio, por lo cual, el objetivo del LIPC es medir continua y sistemáticamente

los parámetros más importantes de la zona costera como son viento, oleaje, corrientes y mareas aprovechando su ubicación geográfica.

De esta manera, en 2010 se inició la medición de oleaje y corrientes frente a los poblados de Chelem y Chuburná con la finalidad de conocer los factores que influyen en la zona. Posteriormente, por conveniencia logística y por la ubicación del laboratorio, el punto de medición se cambió frente al poblado de Sisal a 21 km del punto de medición anterior.

### ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio comprende la costa noroeste de la Península de Yucatán. Debido al fuerte deterioro que han sufrido las playas de esta zona y sobre todo, las de los poblados de Chelem y Chuburná [Lira-Pantoja et al., 2012], se decidió colocar el instrumento de medición frente a estos poblados, a una distancia aproximada de 10 km y una profundidad de alrededor de 8 m en las coordenadas 21°19'14.04" latitud norte y 89°50'4.38" longitud oeste. Posteriormente, el punto de medición se cambió al oeste frente al poblado de Sisal, donde se han continuado las campañas de medición hasta la fecha. En la Figura 1 se muestra la localización de los puntos de medición.

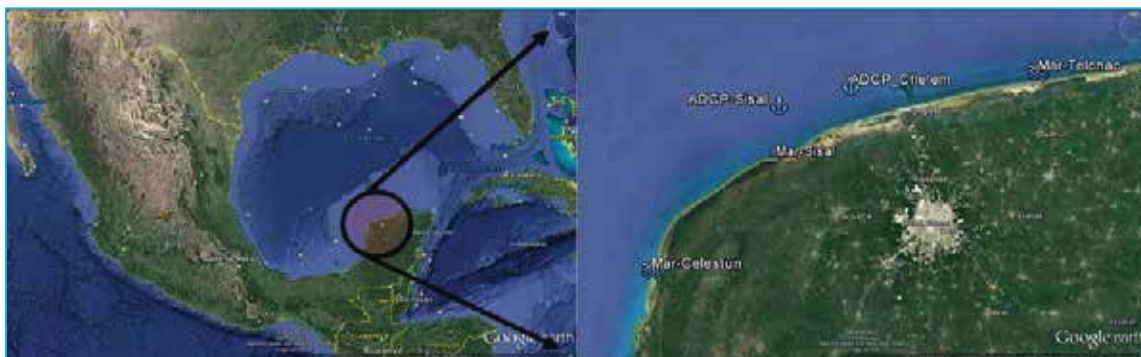


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

## CARACTERIZACIÓN DE OLEAJE FRENTE A LA COSTA DE SISAL YUCATÁN

En la Tabla 1 se muestran las fechas y periodos de medición de las campañas realizadas, primero frente a los poblados de Chelem y Chuburná y posteriormente frente al poblado de Sisal. En las tablas se pueden observar barras de color que representan las temporadas de medición para cada campaña para las cuales en algunas de ellas se abarcan dos estaciones del año.

### MÉTODOS Y MATERIALES

A la fecha, el LIPC cuenta con 3 mareógrafos operados coordinadamente con el servicio mareográfico del Instituto de Geofísica de la UNAM los cuales se encuentran en 1) Celestún, en una caseta sobre el muelle del pueblo con

coordenadas 20°51.50' latitud norte y 90°24.20' longitud oeste; 2) en Sisal, a la entrada del puerto de abrigo con coordenadas 21°9.70' latitud norte y 90°2.90' longitud oeste y el último 3) en Telchac, también a la entrada del puerto de abrigo con coordenadas 21°20.40' N -89°18.50' W. Los datos de los mareógrafos se pueden consultar en la página del servicio mareográfico nacional o en la página del observatorio costero del LIPC donde además se pueden consultar datos de viento y oleaje.

<http://www.mareografico.unam.mx/portal/index.php?page=Estaciones>

<http://observatoriocostero.iingen.unam.mx/web/Mareografo.php?graf=3&ubi=3>

Tabla 1. Fechas de las campañas de medición con equipo ADCP frente a los poblados de Chelem y Chuburna.

Camp	Año	Fecha		Invierno		Primavera			Verano			Otoño			
		Inicial	Final	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic
1	2010	17-jun	02-sep												
2	2010	02-sep	03-ene												
3	2011	04-mar	15-jun												
4	2011	08-jul	29-sep												
5	2011	29-sep	09-dic												
6	2012	09-dic	16-feb												
7	2012	08-mar	13-may												
8	2012	26-jun	25-oct												
9	2012	16-nov	13-feb												
10	2013	13-feb	29-may												
11	2013	30-may	30-sep												

Tabla 2. Fechas de las campañas de medición con equipo ADCP, Sisal Yucatán.

Camp	Año	Fecha		Invierno		Primavera			Verano			Otoño			
		Inicial	Final	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic
1	2013	14-dic	27-ene												
2	2014	25-mar	29-may												
2	2014	25-mar	22-may												
3	2014	01-jul	01-oct												
4	2014	21-nov	15-feb												
5	2015	17-mar	04-jul												
5	2015	17-mar	11-may												
6	2015	13-ago	07-oct												
7	2015	10-dic	20-abr												
8	2016	30-mar	26-may												

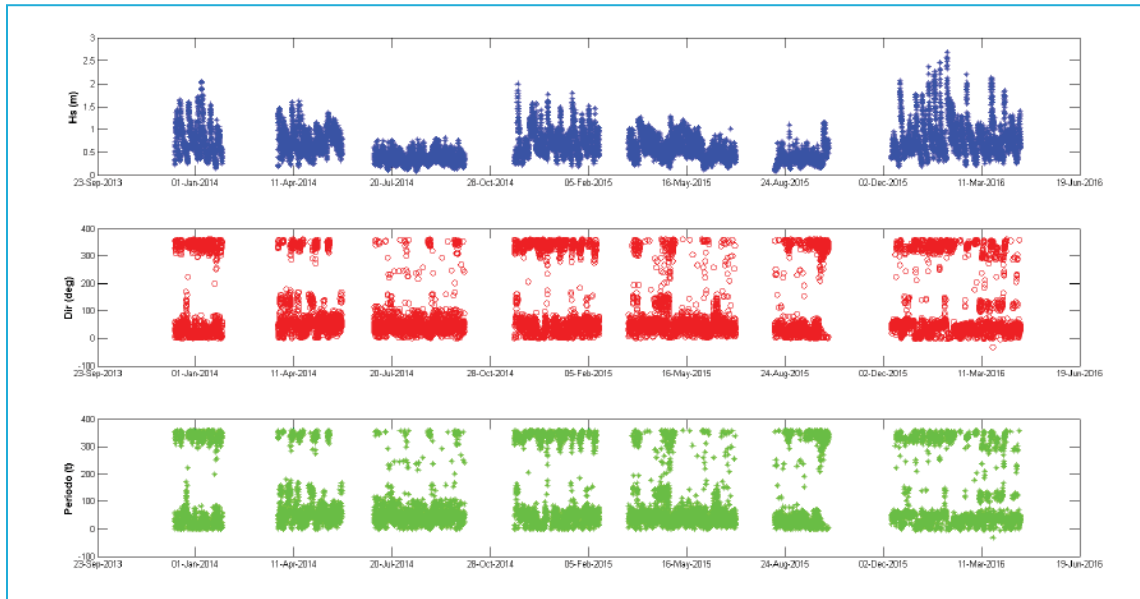


Figura 2. Serie de oleaje. Datos obtenidos a partir de las mediciones del ADCP colocado en la costa de Sisal.

La medición de oleaje y corrientes, consiste en campañas de campo utilizando un equipo ADCP de la marca RDI, el cual se programa para realizar mediciones de la velocidad y dirección de las corrientes en la columna de agua en capas de 50 cm de espesor hasta alcanzar la superficie libre. Los registros son un promedio de 50 lecturas a una frecuencia de 2 Hz cada 30 minutos. Con respecto al oleaje, éste se registra con una frecuencia de 2 Hz durante 20 min cada hora y para el caso de la presión y la temperatura las mediciones se realizan cada hora.

Una vez programado el equipo, se coloca en una plataforma de metal o fibra de vidrio con suficiente peso para permanecer en el fondo marino por lo menos durante 3 meses. Una vez cumplido este tiempo, que es la duración aproximada de las baterías, se recupera y se sustituye por otro equipo previamente programado, al equipo recuperado se le da mantenimiento y se le extraen los datos.

### DESCRIPCIÓN DEL RÉGIMEN DE OLAJE

En la Figura 2 se presenta la serie de tiempo de los datos de oleaje obtenidos con el mencionado equipo de enero de 2014 hasta junio de 2016. En el panel superior de esta figura se presenta la altura de ola significativa (Hs) que presenta un máximo de 2.5 m en el periodo invernal. El panel intermedio se muestra la dirección de incidencia del oleaje que tiene una orientación reinante del NNE y una orientación dominante de NNO, las cuales tienen relación directa con la dirección del viento. Las alturas máximas de la dirección reinante son del orden de 1.5 m y en las dominantes mayores a 2.5 m debido a las condiciones de tormenta que se presentan en la temporada invernal. En el panel inferior se presenta el periodo del oleaje; siguiendo con la relación de las alturas de ola se puede observar que el oleaje dominante tiene periodos de hasta 10 s y para el oleaje reinante los periodos oscilan entre 4 y 8 s.

### CLIMA MARÍTIMO ESTACIONAL

El clima marítimo de la zona de Sisal se caracteriza por tener temporadas o estaciones del año muy marcadas. Así mismo tiene una marcada variabilidad diaria: por las mañanas se percibe una relativa calma en el oleaje, el cual incrementa a partir del mediodía hasta alcanzar el máximo por la tarde. En la noche comienza el descenso nuevamente hasta una relativa calma.

Sin embargo, en temporada invernal, estas condiciones diarias se ven afectadas por temporales de oleaje y viento intenso proveniente del norte noroeste llamados “Nortes”, los cuales se superponen a las condiciones “normales”. Estas condiciones se caracterizan por el incremento de la altura de oleaje y la velocidad del viento, así como el cambio de la dirección de incidencia de ambos, la cual es principalmente del norte.

Para el estudio, el clima se ha dividido en las siguientes estaciones (Tabla 4): primavera, del 21 de marzo al 20 de junio; verano, del 21 junio al 22 de septiembre; otoño, del 21 de septiembre al 20 de diciembre e invierno, del 21 de diciembre al 20 de marzo.

A partir de esta división, se agruparon las cuatro temporadas para determinar la variabilidad en la intensidad del oleaje y la dirección de incidencia. De esta manera, por ejemplo, se tomaron los datos del ADCP de las 4 temporadas de invierno registradas y los resultados se muestran en forma de rosa de direcciones para cada año de medición con altura de ola significativa. En la Figura 3 se muestran los datos de dirección y altura de ola significativa de la temporada invernal. En el panel a) se muestran los datos

del invierno 2013 correspondientes a los meses de diciembre y enero, siendo solo la mitad de la temporada invernal por lo que se puede observar una gran acumulación de oleaje incidente del NNO con intensidades y alturas de ola en su mayoría superiores a 1.5m. En la temporada invernal 2014 en el panel b) se puede observar oleaje predominante en la dirección NNE con alturas de 0.75 a 1m y por otro lado, en la dirección NNO un oleaje con mayor intensidad y alturas significantes de 1.5 m y mayores, que indica la participación de los Nortes en el aumento de la altura y dirección del oleaje. En el invierno de 2015 mostrado en el panel c), las condiciones de oleaje fueron similares al año anterior con dirección de incidencia de NNO y NNE siendo en mayor frecuencia oleaje de aproximadamente 1 m de altura significativa, pero en esa ocasión las alturas provenientes del NNO presentaron un aumento considerable llegando a una altura de ola mayor de 1.75 m. Para la última temporada, panel d), se puede observar que las frecuencias del oleaje incidente del NNE se redujeron y aumentaron las provenientes del N y NNE originadas por los Nortes. También se puede observar que las alturas de ola son mayores que en las tres primeras temporadas alcanzando un máximo de 2.5m. En esta temporada los Nortes se extendieron hasta el final de la temporada, por lo que fue un caso extraordinario con más eventos “Nortes” hacia el final de la temporada. La dirección de incidencia fue del NNO y NNE de la misma manera que en los casos anteriores.

En primavera, el oleaje está modulado principalmente por el viento ya que, en la mayoría de

Tabla 4. Temporadas climáticas de la Costa de Sisal.

Invierno		Primavera				Verano			Otoño		
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic

los casos, la orientación es del NNE siendo ésta en gran parte similar a la dirección del viento. Como se observa en la Figura 4, el oleaje es del orden de 0.75 a 1.5 m, y para esta temporada se observa con menos frecuencia oleaje provocado por eventos de “Nortes”. Sin embargo, en esta temporada aún persisten algunos de ellos en menor proporción y conforme avanza la temporada estos efectos se ven reducidos.

En la temporada de verano el oleaje se mantiene de la dirección NNE. Sin embargo la

intensidad y las alturas se reducen de manera que la máxima altura significativa de ola oscila entre 0.25 m a 0.75 m, lo cual es un oleaje de menor intensidad a lo presentado en la temporada de invierno y conforme se aleja de la temporada toma condiciones estables, con oleaje local provocado por las brisas locales

Llegada la temporada de otoño (Figura 5), el oleaje empieza a cambiar. Al inicio de la temporada las condiciones continúan hasta cierto punto con la tendencia de la temporada anterior y

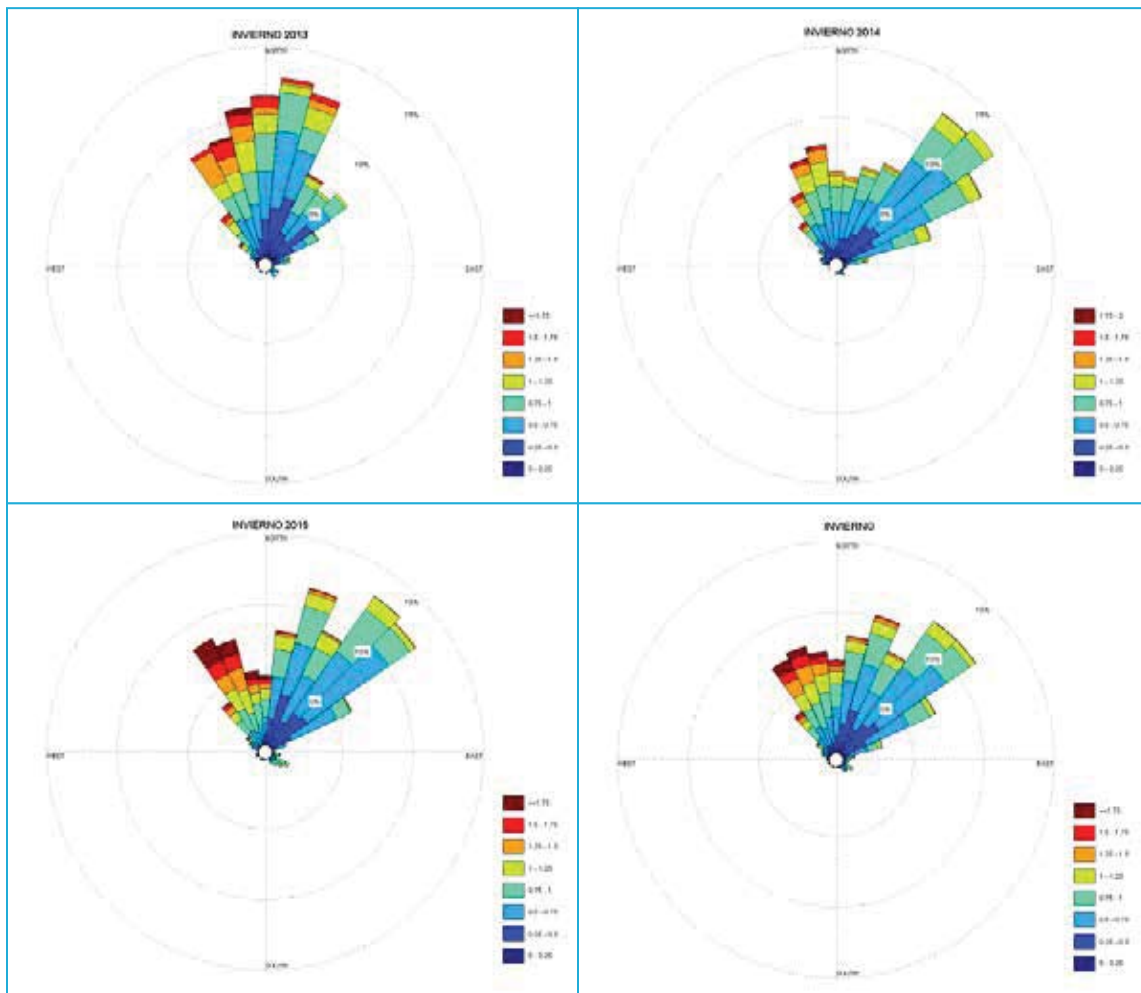


Figura 3. Dirección e intensidad de oleaje en temporada invernal.

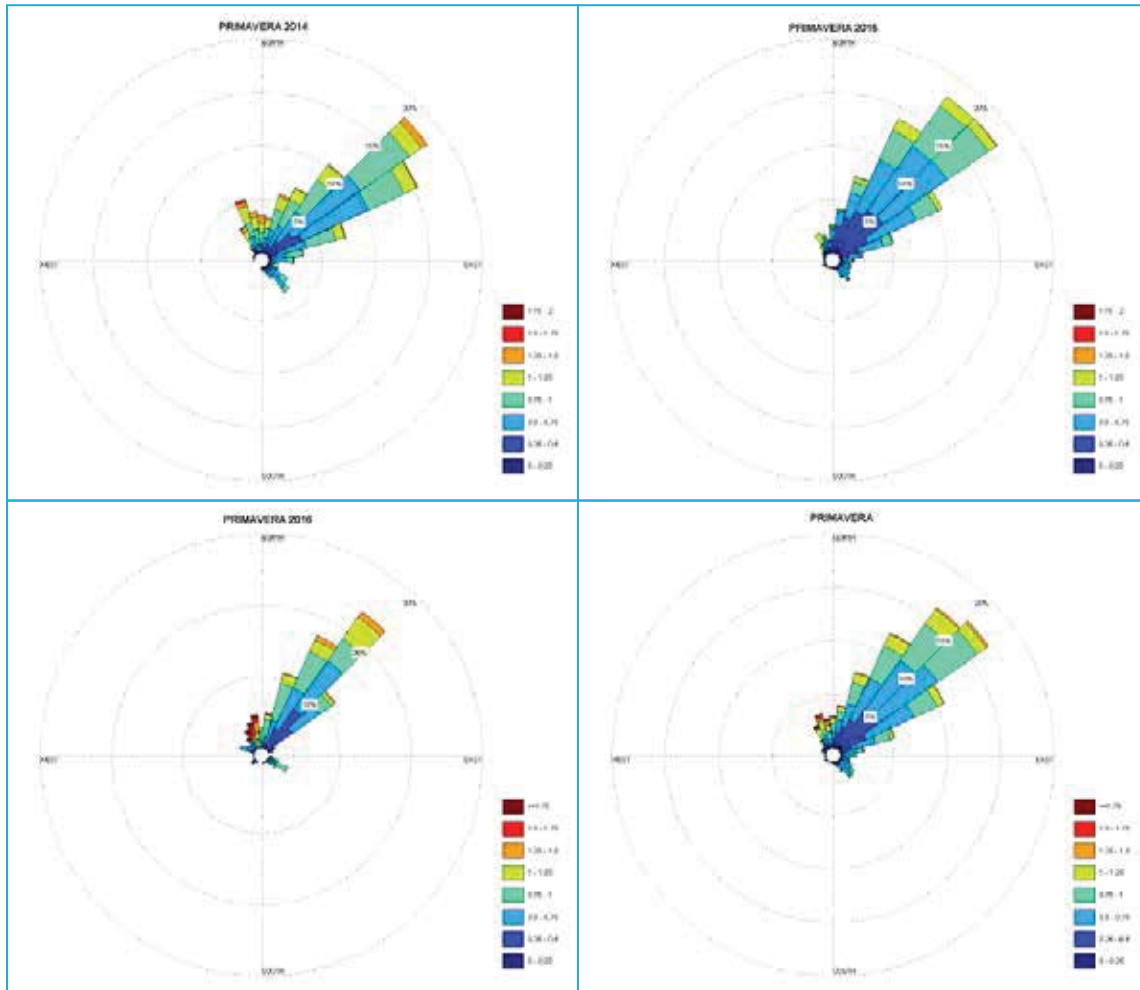


Figura 4. Dirección e intensidad de oleaje en periodo de primavera.

conforme llegan los meses de noviembre y diciembre, las condiciones van cambiando debido al inicio de la temporada de “Nortes” que en algunas ocasiones suceden antes de la temporada invernal, afectando la dirección del oleaje y la altura significativa de ola. En esta temporada se pueden observar direcciones dominantes NNE con alturas de ola de 0.25 a 1.25m y de la dirección NNO las frecuencias e intensidades aumentan con alturas mayores a 1.25 m. Esto debido, como se mencionó anteriormente, a la transición

de las 2 estaciones al inicio de verano a otoño y al final de otoño a invierno cuando se presentan la mayoría de las tormentas.

### DISCUSIÓN

Como la zona de estudio se encuentra dentro de la plataforma continental de la Península de Yucatán, no presenta cambios abruptos en la batimetría, por lo que el oleaje es modificado en menor parte por este factor. Los datos medidos de las condiciones de oleaje, permitieron analizar



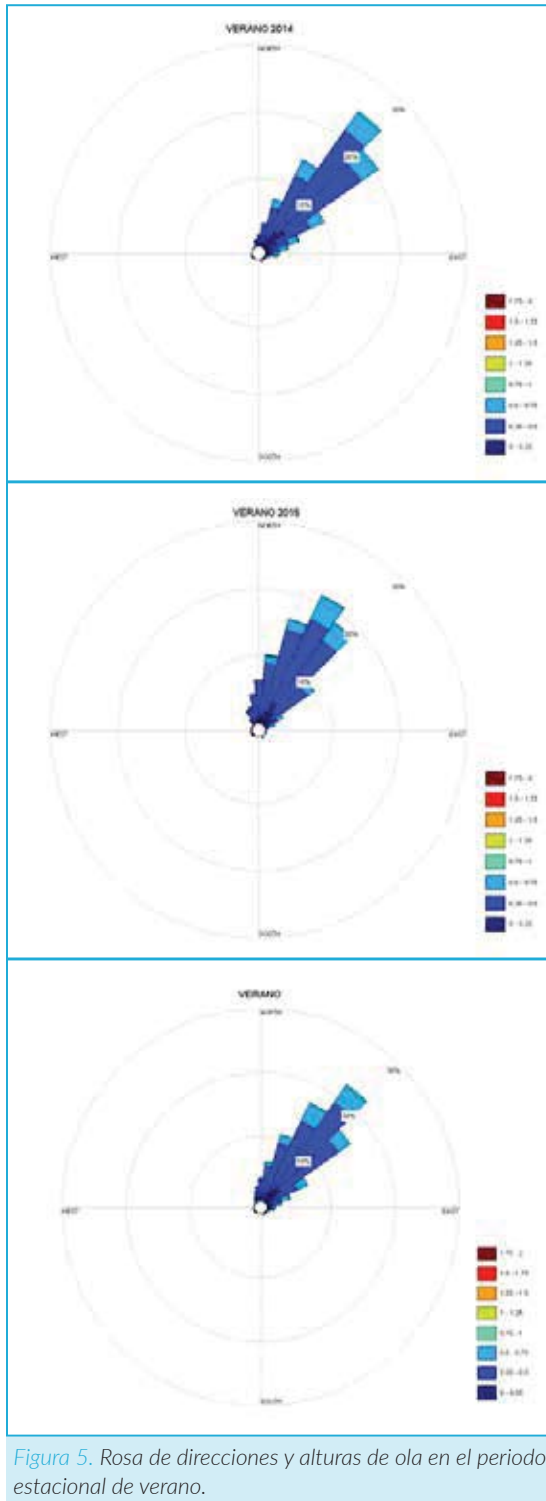


Figura 5. Rosa de direcciones y alturas de ola en el periodo estacional de verano.

y clasificar las estaciones del clima marítimo de la región.

La zona tiene muy marcado un régimen estacional, es decir las estaciones del año se definen con claridad en las condiciones del clima marítimo. Se observa que existen dos temporadas bien definidas: primavera-verano con oleaje moderado principalmente de NNE y otoño-invierno con periodos de oleaje intenso del NNO con alturas mayores a 1.75 m lo cual para la zona es considerado como oleaje de tormenta.

Las condiciones de oleaje en esta temporada son muy variables ya que dependen de los Nortes que se generen, por lo que se puede tener relativa calma por la mañana, oleaje moderado a medio día y al día siguiente tormenta. Estos cambios bruscos son los que definen esta temporada invernal y los datos recolectados por el ADCP lo demuestran claramente.

Por otra parte, la temporada primavera-verano, muestra oleaje moderado en cuanto a altura se refiere y dirección predominantemente de NNE, cuando se acerca a la mitad de la temporada se puede observar que el oleaje alcanza alturas máximas de alrededor de 0.5 m. En esta temporada se puede observar el cambio diario y bien marcado que tiene el sistema marítimo. Por la mañana se presenta calma en las costas con oleaje menor a 0.5 m y conforme va avanzando el día y los vientos empiezan a hacer efecto sobre la superficie, se puede observar claramente el incremento de las alturas de ola lo cual ocurre generalmente a partir del mediodía, en la tarde-noche el oleaje empieza a descender terminando así el ciclo diario del clima marítimo primavera-verano. Este comportamiento se ve afectado en la temporada invernal sin embargo en la temporada de primavera-verano es muy estable.



Los datos obtenidos por instrumentos como el ADCP son muy útiles para el análisis del comportamiento de los procesos físicos costeros del área. Además, sirven para calibrar modelos numéricos de oleaje que tendrán mayor cobertura tanto temporal como espacial.

En este caso se utilizaron datos de 4 años de medición y lo observado fue similar en los 4 años de estudio, con ello se pudo determinar con claridad las temporadas en la zona. Sin embargo

cabe mencionar que no se registraron eventos extremos como tormentas tropicales o huracanes por lo que este estudio no es concluyente y es por esto conveniente seguir con las mediciones para contar con una base de datos más amplia y completa.

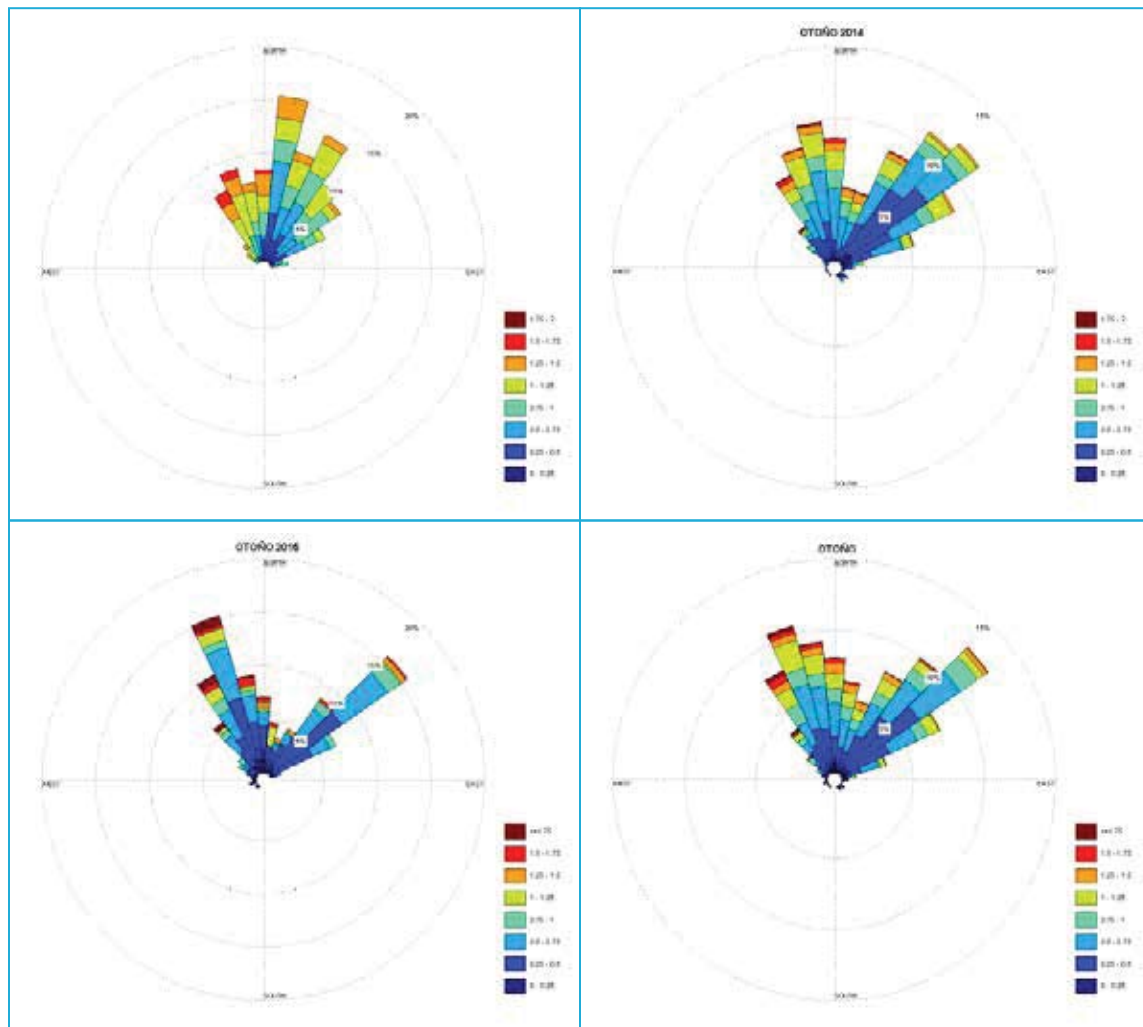


Figura 6. Direcciones de oleaje y alturas de ola para el periodo de otoño.

## BIBLIOGRAFÍA

- Appendini, C. M., P. Salles, E. T. Mendoza, J. López, and A. Torres-Freyermuth (2012), Longshore Sediment Transport on the Northern Coast of the Yucatan Peninsula, *Journal of Coastal Research*, 1404-1417.
- Appendini, C. M., A. Torres-Freyermuth, P. Salles, J. López-González, and E. T. Mendoza (2014), Wave Climate and Trends for the Gulf of Mexico: A 30-Yr Wave Hindcast, *Journal of Climate*, 27(4), 1619-1632.
- Carranza, E., A. M. Gutiérrez, and R. Rodríguez (1979), Unidades morfotectónicas continentales de las costas mexicanas, México, *An. Centro Cienc. del Mar y Limnol. UNAM*, 2.
- Cuevas, E., M. d. I. Á. Liceaga-Correa, L. A. Rincón-Sandoval, G. Mexicano-Cintora, L. Arellano-Méndez, J. I. Euán-Ávila, H. Hernández-Núñez, and S. Mulsow (2013), Evaluación morfológica y sedimentológica de campos de dunas submarinas en la costa de Yucatán, México, *Ciencias marinas*, 39, 83-99.
- Enriquez, C., I. Mariño-Tapia, and J. A. Herrera-Silveira (2010), Dispersion in the Yucatan coastal zone: Implications for red tide events *Continental Shelf Research*, 30(2), 127-137.
- Figuroa-Espinoza, B., P. Salles, and J. Zavala-Hidalgo (2014), On the wind power potential in the northwest of the Yucatan Peninsula in Mexico, *Atmósfera*, 27(1), 77-89.
- Lira-Pantoja, M. A., A. Torres-Freyermuth, C. M. Appendini, D. Fernandez, P. Salles, E. T. Mendoza, J. López, and A. Pedroso-Acuña (2012), Chronic beach erosion induced by coastal structures in Chelem, Yucatán, *Coastal Engineering Proceedings*, 1(33).
- Lugo-Hubp, J., and A. Aceves-Quezada (1992), Relieve estructural V.2.1.1., Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Meyer-Arendt, K. J. (1993), Shoreline changes along the north Yucatan coast, *Coastlines of the world series, American Society of Civil Engineers*.
- Silva, R., et al. (2014), Present and Future Challenges of Coastal Erosion in Latin America, *Journal of Coastal Research*, 1-16.