



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
(INGENIERÍA CIVIL) – (INGENIERÍA DE COSTAS Y RIOS)

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMATICO SOBRE LA DINAMICA LITORAL A LO
LARGO DE LA COSTA NORTE DE YUCATÁN

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
OSWALDO CARRILLO RODRÍGUEZ

TUTOR PRINCIPAL
CHRISTIAN MARIO APPENDINI ALBRECHTSEN

COMITÉ TUTOR
RIGOBERTO, GUARDADO, FRANCE, UABC
ALEC, TORRES, FREYERMUTH, UNAM-LIPC
GABRIELA, MEDELLÍN, MAYORAL, UNAM-LIPC
JAIME ALONSO, ARRIAGA GARCIA, UNAM-LIPC

MÉXICO, YUCATÁN, SISAL, ENERO 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. TORRES FREYERMUTH ALEC

Secretario: Dra. MEDELLÍN MAYORAL GABRIELA

Vocal: Dr. CHRISTIAN MARIO APPENDINI ALBRECHTSEN

1 er. Suplente: Dr. Arriaga García Jaime Alonso

2 d o. Suplente: M. en C. Guardado France Rigoberto

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Laboratorio de Ingeniería t Procesos
Costeros, Sisal, Yucatán, México.

TUTOR DE TESIS:

Dr. CHRISTIAN MARIO APPENDINI ALBRECHTSEN

FIRMA

RESUMEN

La caracterización del efecto del cambio climático sobre la dinámica litoral es de suma importancia en la planeación de obras marítimas que son parte del desarrollo económico del país. En la costa de Yucatán la dinámica litoral es resultado tanto del clima medio y extremal, este último caracterizado por *Nortes* y huracanes. Se ha reportado que estos regímenes (clima medio y extremal) serán afectados como resultado del cambio climático y su impacto en la dinámica litoral deberá ser considerado en la planeación de futuras obras marítimas. Así el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del cambio climático sobre la dinámica litoral.

Para cumplir dicho objetivo se utilizaron bases de datos del reanálisis Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) para representar el clima medio actual, mientras que la evaluación de los efectos del cambio climático se basaron en el clima medio derivado del modelo Centre National de Recherchers Météorologiques-M5 (CNRM-M5) para el clima actual y el clima futuro bajo el escenario RCP 8.5. Para el clima extremal se seleccionaron eventos de *Norte* a partir del reanálisis CFSR para representar el clima actual, mientras que para futuro se seleccionaron a partir del modelo CNRM-M5 bajo el escenario RCP 8.5 para representar el clima futuro. Adicionalmente se utilizaron datos de oleaje a partir de huracanes para representar el clima actual por medio del reanálisis National Centers for Enviromental Prediction (NCEP) y el modelo Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), el cual también se utilizó para representar condiciones futuras bajo el escenario RCP 8.5. Las tasas de transporte de sedimentos a lo largo de la costa se obtuvieron por medio del modelo LITDRIFT, utilizando condiciones de clima medio, *Nortes*, perfiles de playa y características de sedimentos a lo largo de la costa de Yucatán. El clima medio mostró que el cambio climático dará como resultado tasas de transporte de sedimentos costeros similares al clima presente y que las áreas erosivas y de depósito se mantendrán igual para el clima futuro. Las tasas de transporte de sedimento bajo condiciones de clima por *Nortes* mostraron resultados similares para el clima actual y futuro. En relación a los huracanes, los cambios del perfil de playa resultaron también similares para el clima actual y futuro.

En conclusión, los resultados muestran que no existen diferencias significativas en la dinámica litoral bajo el efecto del cambio climático tanto para el clima medio como para el clima extremal.

Dedicatoria

Quisiera dedicar este logro a todos mis maestros de vida, por enseñarme cada día más acerca de este viaje. Espero abarcar a todos y si no es así, una disculpa.

Primero quiero dedicar esto a Héctor y Rita, ellos siempre lucharon con la esperanza de que tuviera una buena educación, dejándome libre de elección para desarrollar mis virtudes. Nunca me obligaron a ser lo que ellos querían que fuera, siempre me aceptaron y me ayudaron a desarrollar mis virtudes...gracias.

Quiero dedicar esto a Héctor Por brindarme su compañía desde pequeño y hacer que mi crecimiento fuera formidable. Muchos hermanos desearían tan grata compañía.

A mis amistades Marco, Mayra, Martha, Yutzil, Socde, Rodrigo Cobarruvias, Rodrigo Rodríguez, Laura, Luis, Alvaro, Eduardo, Marcela, Mariana, Estefanía, Paladio, Melisa, Cesar, Leonardo Montoya, Leonardo, Paola, Martí. Cada uno de ellos me enseñó acerca de este viaje llamado vida.

A Gabriela Caamal por siempre recibirme con el mejor ambiente en su cocina.

Al equipo de ciclismo de la unidad Sisal por animarme cada viernes.

A cada una de las personas que ha dedicado su tiempo en mí, ya que sin ellas no sería lo que soy actualmente.

Agradecimientos

Quiero agradecer al posgrado de ingeniería de la UNAM por haberme brindado la oportunidad de desarrollarme tanto académicamente como personalmente.

A CONACYT por su apoyo económico, ya que sin ese apoyo mi estancia aquí hubiese sido muy difícil.

Al Proyecto PAPIIT IA100418 por brindarme de su apoyo en la elaboración de este trabajo.

A Marco Antonio Nuñez Dórame por su ayuda en la revisión de este documento.

A Rigoberto Guardado France por darme la oportunidad de venir al instituto y su compañía de nuevo en mi camino profesional.

A Christian Mario Appendini Albrechtsen por brindarme su confianza, apoyo, paciencia y amistad. Muchas gracias, he aprendido mucho de ti.

A José López por su INMENSA influencia deportiva y motivación para disfrutar mis pasiones, sean las condiciones que sean.

A Jaime Alonso Arriaga por su confianza y gran apoyo durante este trabajo.

A Alec Torres Freyermuth por su apoyo en este trabajo y motivación a hacer las cosas de la mejor manera.

A Gabriela Medellín por su apoyo y correcciones certeras en este proyecto.

A la Dra. María Eugenia por brindarme los datos de viento para realizar mi selección de *Nortes*.

Al Dr. Paulo Salles por darme la oportunidad de pertenecer al proyecto LANRESC e iniciar mis primeros pasos en el Instituto de Ingeniería.

Al Dr. Rodolfo Rioja por brindarme la oportunidad de desarrollarme en el proyecto LANRESC.

1 Contenido

1.	Introducción	1
2.	Motivación	3
2.2	Social y económica	3
2.3	Ingenieril	3
2.4	Científica	4
3.	Hipótesis	4
4.	Objetivos	4
4.1	Objetivo General	4
4.2	Objetivos particulares	4
5.	Zona de estudio	5
6.	Modelos/bases de datos	6
6.1.1	<i>Reanálisis CFSR</i>	6
6.1.2	<i>Modelo CNRM –M5</i>	7
6.1.3	<i>Bases de datos para clima extremo del oleaje</i>	7
6.1.4	<i>Modelo de propagación de oleaje</i>	8
6.1.5	<i>Modelo de transporte de sedimentos</i>	9
6.1.6	<i>Modelo morfológico del perfil transversal</i>	10
7.	Método	11
9.1	Flujo del trabajo	11
9.2	Caracterización de receptores	13
9.2.1	<i>Caracterización del perfil de playa</i>	13
9.2.2	<i>Caracterización de sedimentos</i>	14
9.3	Caracterización del forzante	14
9.3.1	<i>Clima medio de oleaje</i>	14
9.3.2	<i>Clima extremo del oleaje</i>	15
9.4	Caracterización del transporte longitudinal	17
9.4.1	<i>Análisis de sensibilidad</i>	19
9.5	Comportamiento del transporte sedimentario con oleaje de clima medio	20
9.6	Comportamiento del transporte longitudinal con clima extremo	21
9.7	Comportamiento transversal del perfil de playa con clima extremal	21
8.	Resultados y discusión	22
10.1	Caracterización de receptores	22
10.1.1	<i>Caracterización del perfil de playa</i>	22
10.2	Caracterización de sedimentos	25
10.3	Caracterización del forzante - clima medio	25
10.4	Caracterización del clima bajo condiciones extremas	30
10.4.1	<i>Huracanes</i>	36
10.5	Calibración y validación del modelo de transporte litoral	40
10.6	Análisis de sensibilidad	41
10.6.1	<i>Selección del Perfil de playa</i>	41
10.6.2	<i>Selección de tamaño de grano</i>	43
10.6.3	<i>Selección de nodo de oleaje</i>	45
10.7	Comportamiento del transporte longitudinal con clima medio	47
10.8	Comportamiento del transporte longitudinal con clima extremo	51
10.9	Comportamiento transversal del perfil de playa con clima extremo	53

9. Conclusiones	58
10. Bibliografía	59

Índice de figuras

Figura 1.- Zonas muestreadas.	5
Figura 2.-Diagrama de flujo.....	12
Con el objetivo de establecer la configuración del modelo LITDRIFT se evaluaron distintas simulaciones. Cada una de las simulaciones tomaron en cuenta los siguientes parámetros; presencia de rizaduras, temperatura de agua, orden de solución de Stokes, propiedades del grano, velocidad de caída y tipo de descripción espectral. Adicionalmente de los nodos propuestos se seleccionó el nodo de oleaje más cercano a Progreso (figura 1) y se utilizó un perfil de playa sobre Progreso (figura 3). Cada una de las simulaciones realizadas tomo en cuenta parámetros del trabajo realizado por Appendini et al. (2012) quien utilizo un D50 de 0.35 mm, una rugosidad de 0.03 m y una orientación para el perfil de Progreso (figura 3) de 350°	17
Figura 4.- Perfil PROG06.	17
Figura 5.-Nodo utilizado para obtener datos de oleaje.	18
Figura 6.-Perfiles topobatimétricos para la campaña de invierno.....	23
Figura 7.-Perfiles topobatimétricos para la campaña de verano.	23
Figura 8.-Cambios estacionales sobre los perfiles de playa.	24
Figura 9.-Distribución de D50 a lo largo de la costa de Yucatán. Modificado de Trejo (2011).	25
Figura 10.- Probabilidad de ocurrencia de altura significativa (SWH) contra periodo pico (PWP) a partir del modelo CNRM (derecha) y el reanálisis CFSR (izquierda) para el nodo 7.....	26
Figura 11.- Probabilidad de ocurrencia de altura significativa (SWH) contra dirección promedio (MWD) a partir del modelo CNRM (derecha) y el reanálisis CFSR (izquierda) para el nodo 7.....	26
Figura 12.- Rosas de oleaje a partir de datos de CNRM (1980-2005).....	27
Figura 13.- Rosas de oleaje a partir de CFSR (1980-2005).....	28
Figura 14.-Rosa de oleaje a partir de CNRM (1970-2005).	29
Figura 15.- Rosas de oleaje a partir del CNRM (2026-2044).....	29
Figura 16.- Rosas de oleaje a partir del CNRM (2081-2099).....	30
Figura 17.- Rosas de altura de ola (a, b), periodo pico (c, d) y viento (f, g) para Nortes a partir de CFSR (a, b y g) y CNRM (c, d y f). Los datos de oleaje provienen del nodo 7. 32 La rosa de viento para el clima presente se caracterizó por una dirección dominante del noreste, con magnitudes de viento de 6 m/s a 10 m/s (figura 18-g). Estos vientos generan un clima de oleaje con una dirección del noroeste y alturas de ola de hasta 1.5 m con periodos mayormente de 6 s a 8 s.	33
Figura 18.- Rosas de altura de ola (a, c, e) y periodo pico (b, d, f) para Nortes a partir del modelo CNRM para presente (sección superior), mitad de siglo (sección media) y final de siglo (sección inferior). Los incisos g, h y i corresponden a datos de viento para presente, mitad de siglo y final de siglo respectivamente. Los datos de oleaje provienen del nodo 7.	34
Figura 19.- Serie de tiempo para clasificación de Nortes para final de siglo.	35

Figura 21.-Ajustes de Weibull para altura significativa (figura superior) y periodo pico (figura inferior) para GFDL para el clima presente.	38
Figura 22.- Ajuste logarítmico normal para altura de ola (figura superior) y periodo pico por Weibull para GFDL (figura inferior) para el clima futuro.	39
Figura 23.- Transporte neto anual para verano e invierno.	42
Figura 24.-Perfiles cercanos al perfil promedio en verano. El perfil promedio está delimitado por la línea negra.....	43
Figura 25.-Transporte anual neto en función de los tamaños de grano y rugosidad para el perfil seleccionado. El inciso a) muestra el transporte tomando en cuenta la rugosidad para cada tamaño de grano mientras que el b) lo muestra con una rugosidad constante de 0.026 mm.	45
Figura 26.- Transporte neto en función de nodos propuestos.	46
Figura 27.-Transporte neto anual en función de la orientación del perfil de playa.	48
Figura 28.- Transporte neto obtenido a lo largo de la costa para presente (a), mitad de siglo (b) y futuro (c).	50
Figura 29.-Transporte positivo a lo largo del perfil seleccionado para el modelo CFSR (a), CNRM presente (b), CNRM mitad de siglo (c) CNRM final de siglo (d).	52
Figura 30.- Evolución del perfil después del evento, con percentil 90(a), 95(b) y 99(c) sobre zonas afectadas.	54
Figura 31.- Evolución del perfil después del evento, con percentil 90 (figura superior), 95 (figura intermedia) y 99 (figura inferior) sobre las zonas afectadas.	55
Figura 32.- Evolución del perfil después del evento, con percentil 90 (figura superior), 95 (figura intermedia) y 99 (figura inferior) sobre las zonas afectadas.	55
Figura 33.- Evolución del perfil después del evento, con percentil 90(a), 95(b) y 99(c) sobre las zonas afectadas asumiendo un cambio en el nivel del mar.....	56
Figura 34.- Evolución del perfil después del evento, con percentil 90 (figura superior), 95 (figura intermedia) y 99 (figura inferior) sobre las zonas afectadas asumiendo un cambio en el nivel del mar.	57

Índice de Tablas

Tabla I.-Orientación de la playa y coordenadas de cada uno de los perfiles medidos.	24
Tabla II.- Características del clima medio a mitad de siglo y final de siglo.	30
Tabla III.- Cantidad de eventos norte y duración promedio (Appendini, 2018).	31
Tabla IV.- Cantidad de eventos norte y duración promedio (Appendini, 2018).	36
Tabla V.- Percentiles seleccionado para GFDL Y NCEP.....	39
Tabla VI.- Configuraciones propuestas.	41
Tabla VII.- Comparación de transporte neto anual por medio de CFSR y CNRM.	41
Tabla VIII.- Valores máximos, mínimos y promedios para perfiles de invierno y verano.	43
Tabla IX.- Correlación acumulada para los nodos propuestos.	47
Tabla X.-Transporte neto anual generado por <i>Nortes</i>	51

1. Introducción

La zona costera es importante para el desarrollo socioeconómico del país debido a las actividades económicas y de recreo que en ella se realizan. Entre estas actividades tenemos el comercio internacional, turismo de sol y playa, y la extracción de hidrocarburos. Estas actividades generan empleos y oportunidades de inversión a partir de infraestructura, como hoteles y puertos (García De Fuentes *et al.*, 2011). Además de esto, la zona costera alberga al 60% de la población mundial, mientras que en México el 50% de sus estados son costeros y el 21% de la superficie del país se encuentra frente al mar, albergando aproximadamente al 20% de su población. En el caso de la costa de Yucatán la zona costera es considerada como el primer punto de entrada para importación de productos y un eficaz promotor del desarrollo del sureste de México a nivel internacional (García De Fuentes *et al.*, 2011). Por ello, es importante mantener las características que hacen atractiva a la zona costera, como lo son sus playas, y es importante buscar un desarrollo sustentable, para el cual es fundamental entender el comportamiento de los procesos costeros (Rodríguez.J.J & Windevoxhel.N.J, 1998).

Los procesos costeros determinan los patrones de transporte de sedimento a lo largo del litoral, y son el resultado de la interacción entre forzantes (viento, oleaje y corrientes) y receptores (perfil de playa, propiedades de los sedimentos y la orientación de la costa) (Appendini *et al.*, 2012). En el caso de la costa de Yucatán los procesos costeros son a su vez afectados por eventos de brisas (Torres-Freyermuth *et al.*, 2017) los cuales en conjunto con el clima medio provocan un transporte litoral neto en dirección oeste. La dirección marcada del transporte litoral hacia el oeste en la costa de Yucatán (Appendini *et al.* 2012), interactúan con cualquier estructura localizada sobre la costa, generando erosión aguas abajo, i.e. al oeste de las estructuras (Medellín *et al.*, 2015; Medellín *et al.*, 2018; Torres-Freyermuth *et al.*, 2019;Medellín & Torres-Freyermuth, 2019). Esto es evidente en donde se encuentran los puertos de abrigo a lo largo del litoral de Yucatán, donde existen zonas de depositación al este y zonas de erosión al oeste. Si bien los puertos de abrigo han generado erosión del litoral, estos problemas se han exacerbado debido a la percepción de los pobladores en zonas urbanas, que al sentirse amenazados por la erosión, han desatado la construcción de una serie de espolones en poblados como Yucalpetén y Chelem, sin que existiera una justificación técnica para su construcción (Meyer-Arendt, 1993). Los problemas de erosión costera en Yucatán han llevado a la implementación de distintas acciones para recuperar las playas. Entre estas acciones esta la colocación rompeolas sumergidos, arrecifes artificiales y rellenos de playas, sin embargo, estas han sido soluciones a corto plazo para tramos pequeños (Alavares *et al.*, 2018). Si bien la solución al problema de erosión en Yucatán es compleja como consecuencia del marcado transporte litoral

hacia el oeste, las soluciones a largo plazo presentan una nueva incógnita, que es el posible cambio en los procesos costeros debido al calentamiento global.

Los procesos costeros están directamente relacionados al oleaje y los vientos, y por lo tanto con los patrones de circulación atmosférica, los cuales son afectados por el calentamiento global. Así, el cambio climático puede resultar en un cambio sobre los patrones de oleaje, brisas y corrientes, teniendo efectos inesperados sobre las medidas de protección costera y por lo tanto sobre la morfología de la costa. Entre estos estudios están las tendencias de incremento en la altura de ola sobre el clima medio del oleaje (Gulev & Grigorieva, 2004; Appendini *et al.*, 2014). En el caso del clima extremal de oleaje también se han reportado tasas de incremento en altura de ola, siendo de hasta 8 cm por año tomando en cuenta oleaje por frentes fríos (*Nortes*) y ciclones tropicales (Appendini *et al.*, 2014), si solo se considera el mes de octubre, aunque no existe una tendencia significativa al considerar todo el año. Aunado a lo anterior, se ha evaluado el efecto del cambio climático sobre el oleaje extremo en el Golfo de México, donde se espera un aumento en la altura de ola generada por ciclones tropicales (Appendini *et al.*, 2017) y un aumento en la frecuencia de *Nortes*, aunque de menor intensidad (Appendini *et al.*, 2018). Por lo tanto, es relevante evaluar si estos cambios pueden afectar la dinámica litoral.

Considerando que las actividades en la franja costera interactúan con los procesos costeros, es necesario contar con información que permita pronosticar sus cambios y así poder evaluar estrategias de desarrollo sustentables. Los cambios a largo plazo están relacionados no solo a la afectación del cambio climático, sino también con la afectación de los proyectos de desarrollo en la zona costera. Estos proyectos en general usan mediciones *in-situ*, que en muchos casos no son suficientes para realizar proyectos sustentables a largo plazo debido a su baja cobertura espacio-temporal. Una manera de complementar esta información para poder hacer predicciones, es el uso de escenarios de cambio climático en base a los Modelos de Circulación Global (MCG), que en combinación con modelos numéricos de oleaje espectral pueden proporcionar información de oleaje a largo plazo, que a su vez se puede utilizar para evaluar el efecto del cambio climático sobre el transporte litoral. (Pang *et al.*, 2013; Friedlingstein and Prentice, 2010; Schwinger *et al.*, 2014; Arora *et al.*, 2013; Stive, 2004; Rhein y Rintoul 2013). Los MCG se han utilizado para evaluar cambios en la dinámica litoral en distintas partes del mundo. Por ejemplo Dastgheib *et al.* (2016) establece un incremento de 500,000 millones de m³/año para final de siglo lo cual implicaría cambios en la orientación de la costa de Vietnam. En algunos otros casos estos incrementos no son tan notorios, como es el caso de la costa de Holanda donde se reporta un ligero incremento en el transporte neto anual cercano a la incertidumbre del modelo ACCES 1.0 (Rojas, 2017). Así, la utilización de los MCG permite evaluar la

dinámica litoral a futuro, permitiendo la elaboración de planes sustentables a largo plazo. En el caso de la costa de Yucatán, la amenaza de la erosión es un problema constante y se han planteado distintas alternativas de solución, sin embargo, no se cuenta con un estudio acerca del comportamiento a futuro del litoral costero. Por lo tanto, el análisis de la posible afectación del oleaje y los procesos costeros debido al calentamiento global, es de suma importancia para establecer cuáles son las condiciones que dominarán en la costa, y así proveer mejor información para la toma de decisiones sobre las acciones de desarrollo a largo plazo en la franja costera. De esta manera, el objetivo del presente trabajo es evaluar el efecto del cambio climático sobre la dinámica litoral de la costa de Yucatán.

2. Motivación

2.2 Social y económica

La costa de Yucatán es de alto valor social y económico al verse rodeada de islas de barrera, humedales y selvas. Estos paisajes hacen de Yucatán una zona altamente utilizada por el turismo, motivando así el desarrollo de hoteles y viviendas. La presencia de hoteles y restaurantes generan empleos a los pescadores, quienes componen un 48.7 % de la población sobre la costa. Anualmente los ingresos generados por estos hoteles van de los 1,460.8 a 1,723.5 millones de pesos (Secretaría de Fomento Turístico, 2019) convirtiendo a este sector en parte importante de la actividad económica regional. Si bien el turismo de playa es importante para la economía local la erosión de las playas provoca la pérdida del atractivo paisajístico y con ello pérdida de ingresos por parte del sector terciario. Además, la reducción del ancho de playa por la erosión provoca la degradación del hábitat para aves, lo cual es relevante ya que la costa de Yucatán es una zona de paso y refugio de una gran diversidad de aves migratorias y locales. Añadido a esto, la reducción en el ancho de playa por la erosión, representa un serio problema para la infraestructura la cual recibe el embate del oleaje en épocas de tormenta. Al no tener protección por parte de la playa, estas estructuras sufren deterioros los cuales pueden representar incluso pérdidas de viviendas a los pobladores. Así, el mantenimiento de las playas de Yucatán es importante para mantener e incrementar los ingresos en la costa (García De Fuentes *et al.*, 2011), así como generar empleos en la localidad. Por lo tanto, la generación de planes manejo que cambien el estado erosivo de muchas zonas de la costa de Yucatán es de suma importancia.

2.3 Ingenieril

Actualmente las obras de protección costera se realizan sin considerar la interacción con la dinámica litoral (Salles y Casarin, 2006). Debido a esto, muchas localidades sufren de problemas de erosión o mal funcionamiento, como es el caso de la costa de

Yucatán donde las estructuras de los puertos de abrigo han generado problemas de erosión aguas abajo. Añadido a esto, el cambio del clima marítimo debido al calentamiento global ha mostrado tener implicaciones a futuro en las condiciones de oleaje (Appendini, 2018), por lo cual se puede esperar que la dinámica litoral también sufra afectaciones. Así, la predicción de la dinámica litoral puede brindar un mejor funcionamiento a largo plazo de las obras portuarias, si son proyectadas incluyendo los efectos del cambio climático.

2.4 Científica

Actualmente se han reportado tendencias de incremento en la altura de ola, tanto para el clima actual actual como para futuro, en la costa de Yucatán . Por ejemplo, Gulev y Grigorieva (2004) encuentran una tasa de incremento en la altura de ola de 4 a 6 cm/década mediante datos históricos de 1950-2002, mientras que Appendini *et al.* (2014) reportan un incremento de 5 mm/año para clima medio de oleaje y un incremento de 7-8 cm/año para oleaje de tormenta. Añadido a esto, Appendini (2017, 2018) reporta el incremento de eventos de tormenta como ciclones tropicales y frentes fríos (*Nortes*) debido al calentamiento global. A pesar de lo anterior, no se cuenta con información que detalle la implicación de estos posibles cambios sobre en la dinámica litoral.

Predecir el impacto del calentamiento global sobre la dinámica litoral es de suma importancia en términos de impacto costero ya que si la altura de ola sigue incrementando se espera que la erosión aumente en el futuro. El presente estudio de dinámica litoral en la costa de Yucatán mejorará el entendimiento del comportamiento a futuro de la costa de Yucatán.

3. Hipótesis

El cambio climático provocará cambios en el transporte litoral de la costa norte de Yucatán.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

-Evaluar el efecto del cambio climático en el transporte de sedimentos asociado al clima de oleaje medio y extremal, lo largo de la costa norte de Yucatán.

4.2 Objetivos particulares

- Caracterizar las variaciones espacio-temporales del perfil de playa en la zona de estudio.

- Utilizar datos de bibliografía para caracterizar las variaciones espaciales de las propiedades del sedimento de las playas de Yucatán.
- Caracterizar el clima medio actual de oleaje a partir del reanálisis CFSR y el modelo CNRM-CM5.
- Caracterizar del clima medio de oleaje futuro a partir del modelo CNRM-CM5.
- Caracterizar el clima extremal actual por *Nortes* a partir del reanálisis CFSR y el modelo CNRM-CM5.
- Caracterizar del clima extremal futuro por *Nortes* a partir del modelo CNRM-CM5.
- Caracterizar el clima extremal actual de oleaje a partir de ciclones tropicales sintéticos derivados del reanálisis NCEP y el modelo GFDL.
- Caracterizar el clima extremal de oleaje por ciclones tropicales para el clima actual y futuro a partir de eventos sintéticos provenientes del modelo GFDL.
- Calibrar y validar el modelo LITDRIFT para calcular el transporte longitudinal.
- Realizar un análisis de sensibilidad a las condiciones de frontera del modelo LITDRIFT.
- Estimar el transporte longitudinal para las condiciones actuales y futuras.
- Modelar el comportamiento transversal del perfil de playa ante el clima extremal actual y futuro.

5. Zona de estudio

La costa de Yucatán se sitúa al sureste de México, entre las costas de Quintana Roo y Campeche, colindando con el Golfo de México. Esta franja costera abarca el 15% del Estado de Yucatán, dando vivienda al 6.5% de la población del estado. La costa de Yucatán se caracteriza por tener una extensa plataforma litoral, con una pendiente aproximada de 1:1000, por lo que las profundidades a lo largo de la costa son muy bajas (García De Fuentes *et al.*, 2011).

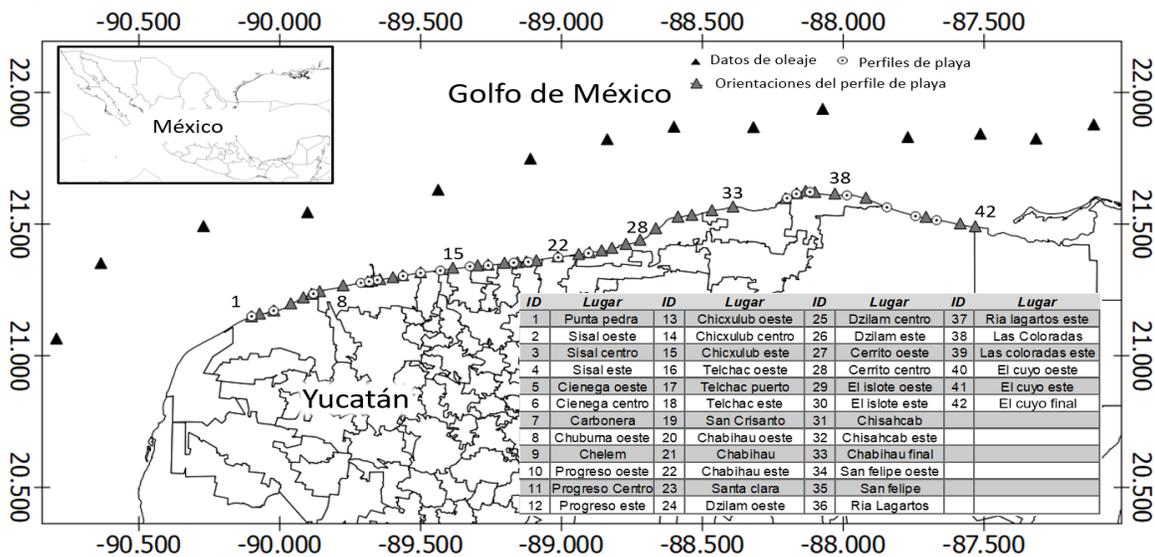


Figura 1.- Zonas muestreadas.

A lo largo de la plataforma continental dominan los vientos del noreste y sureste, siendo más intensos los primeros que los segundos (Figuroa *et al.*, 2014). Los eventos más intensos son asociados a *Nortes* mientras que los menos intensos son asociados a eventos de brisa. Tanto *Nortes* como brizas varían su frecuencia a lo largo de la costa, ya que la parte oeste (Dzilam a Hunucmá) es dominada por brisas, mientras que la zona este (Dzilam a Tizimín) por vientos de carácter sinóptico (Cauich, *et al.*, 2016).

El clima medio del oleaje para la costa de Yucatán presenta alturas de ola de 0.5 m a 2.5 m con periodos de 2 a 10 segundos para la parte oeste de la costa, que incrementan para ser de 1 m a 4 m con periodos entre los 3 s y 20 s en la zona este de la costa (Appendini *et al.*, 2012). En cuanto a las condiciones extremas, el oleaje es regulado por frentes fríos (*Nortes*) y ciclones tropicales. La altura de ola generada a una profundidad de 50 m durante los *Nortes* alcanza hasta 4 m de altura, mientras que para ciclones tropicales la altura de ola puede alcanzar los 9 m (Ojeda *et al.*, 2017). En el caso de los *Nortes*, estos son más frecuentes que los ciclones tropicales, presentándose en la zona un promedio de 11 a 21 eventos por año (Appendini *et al.*, 2012). En el caso de los ciclones tropicales, 100 km al norte de Progreso se reciben de 2 a 6 eventos por año (Ojeda *et al.*, 2017). Tomando en cuenta el clima medio del oleaje este genera corrientes predominantes de este a oeste en la zona litoral, donde esta dirección varía en algunos eventos de norte cambiando de dirección de oeste a este (Torres-Freyermuth *et al.*, 2017). La predominancia de estas corrientes provoca un transporte sedimentario neto en dirección oeste, con tasas reportadas en campo de 70 m³ durante un evento de brisas (Medellín *et al.*, 2015) y simuladas que van de 20,000 m³/año hasta 80,000 m³/año (Appendini *et al.*, 2012).

Los sedimentos transportados se caracterizan mayormente por tamaños de grano clasificados como arenas finas y poca presencia de arenas medias. Las localidades de Dzilam hasta Hunucma muestra valores de 0.18 mm a 0.48 mm, mientras que de Dzilam hasta Tizimin los valores se concentran entre los 0.2 mm y 0.35 mm. La asimetría del sedimento en la costa de Yucatán va de simétrica a simétrica hacia los finos, con comportamiento de mesocúrtico a platicúrtico, y moderadamente sorteado (Trejo-Rangel, 2012).

6. Modelos/bases de datos

6.1.1 Reanálisis CFSR

La base de datos CFSR es un reanálisis global acoplado el cual comprende el periodo de 1979 a 2011. El CFSR surge de una mejora a el reanálisis R1/R2 NCEP con una resolución de 200 km a 38 km, acoplado modelos atmosféricos que contiene

variaciones observadas en el dióxido de carbono durante el periodo 1979-2009, junto con cambios en los aerosoles, gases traza y variaciones solares. Por lo tanto el modelo incluye estimaciones de los cambios en el clima por gases invernadero (Saha *et al.*, 2010; Saha., 2007; Cox *et al.*, (2011); Chawla *et al.* 2013; Stopa y Cheung 2014). El CSR incluye una mejora en la asimilación de datos desarrollados desde R1/R2, y datos marinos a partir de escaterómetros del ERS 1 y 2 (1991-1997), QUICKSAT (2001-2009) y WINDSAT (2008-presente). De igual manera, los datos altimétricos de viento han sido asimilados por lo que el CFSR provee una de las mejores mediciones de viento a lo largo de océanos globales.

6.1.2 Modelo CNRM –M5

La base de datos CNRM-M5 (referido desde ahora como CNRM) es un modelo global acoplado con datos para presente (1970-2005) y futuro (2024-2100). El modelo CNRM incluye 5 modelos independientes y acoplados para representar cada uno de los ambientes de la tierra. El primero, el modelo ARPEGE- Climate se encarga de representar procesos atmosféricos tomando en cuenta flujos de gases como CO₂, O₃, CH₄, N₂O y aerosoles. El segundo, el modelo NEMO se encarga de los procesos oceánicos, tales como mezcla y sus velocidades tridimensionales. El tercero, el modelo GELATO se encarga de la evolución dinámica y termodinámica del hielo marino en el Ártico y Antártida haciendo posible estudiar la variabilidad del hielo marino. El cuarto, el modelo SURFEX calcula los flujos promedio de momento, calor sensible, calor latente y opcionalmente, flujos de especies químicas o polvo entre la atmosfera, océano y tierra. Por último, el modelo TRIP simula la ruta de los ríos y su descarga de agua en los océanos. La resolución de los procesos representados por cada uno de los modelos es entre 2° y 1°. Añadido a esto el modelo CNRM es considerado como uno de los mejores modelos para reproducir las condiciones históricas del viento en el Golfo de México (Salinas, 2016).

6.1.3 Bases de datos para clima extremo del oleaje

El reanálisis NCEP es un sistema de análisis/pronóstico de última generación el cual realiza la asimilación de datos de viento desde 1948 al presente. El modelo incluye datos marinos de buques, boyas fijas, boyas a la deriva y datos cercanos a la superficie como velocidades de viento. El reanálisis cuenta con tres módulos principales: descifrador de datos y control de calidad preprocesador, módulo de asimilación de datos con un sistema de monitoreo automático y módulo de archivado. El modulo central es el de asimilación de datos el cual toma en cuenta el modelo atmosférico T62

con 28 niveles verticales y una resolución de 105 km. En este módulo se realizan análisis de interpolación estadística espectral, mejorando el error estadístico, implementando de igual manera restricciones de equilibrio a partir de la ecuación de divergencia. El reanálisis cuenta con controles de calidad complejos para datos de radiosonda incluyendo revisiones de interpolaciones en tiempo, con correcciones de confianza de altura y temperatura, así como interpolaciones óptimas basadas en controles de calidad complejos de todos los demás datos. El modelo incluye promediados óptimos para varios parámetros, así como interpolaciones óptimas de temperatura superficial de mar. Cada una de estas asimilaciones busca eliminar “saltos” en el clima asociados a errores en el proceso de asimilación.

El módulo de velocidades de viento de este sistema en la superficie adopta el algoritmo de red neuronal de Krasnopolsky (1995) el cual da resultados significativamente cercanos a mediciones de boyas. Este modelo cuenta con una resolución de 105 km la cual representa parametrizaciones de procesos físicos principales como convección superficial y procesos de difusión vertical y horizontal.

El modelo GFDL por otra parte es un acoplamiento para representar la circulación global atmosfera-tierra-océano desarrollado por la NOAA con datos de 1975 al 2005 y proyecciones a futuro del 2070 al 2100. Uno de los principales acoplamientos de este modelo es la del modelo de tierra (LM3) junto al modelo de atmosfera (AM3). Este acoplamiento se encarga de representar procesos físicos como la convección de nubes, procesos de advección, convección y turbulencia, así como la variabilidad del viento cercana al océano. Estos modelos cuentan con una resolución horizontal de 200 km y en el caso del modelo AM3 una resolución vertical aproximada de 70 m cercana a la superficie de la tierra, hasta 1-1.5 km cerca de la tropopausa y 3 km a 4 km en la estratosfera.

6.1.4 Modelo de propagación de oleaje

El modelo MIKE 21 SW simula el crecimiento, descenso y transformación del oleaje mediante la ecuación de densidad de acción del oleaje ($N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$

Ecuación 1).

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad \text{Ecuación 1}$$

Esta ecuación está en función de dos parámetros de fase del oleaje, la frecuencia angular, σ , y la dirección promedio de la ola, θ , donde N representa la acción de densidad y E la densidad de energía.

Debido a que el modelo de oleaje abarca todo el Golfo de México y parte del Caribe (Appendini *et al.*, 2018), la ecuación de balance (Ecuación 2) se presenta en coordenadas esféricas.

$$\frac{\delta N}{\delta \tau} + \frac{\delta}{\delta \phi} c_{\phi} N + \frac{\delta}{\delta \lambda} c_{\lambda} N + \frac{\delta}{\delta \sigma} c_{\sigma} N + \frac{\delta}{\delta \theta} c_{\theta} N = \frac{S}{\sigma} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde ϕ representa latitud y λ representa la longitud. La fuente de energía para el oleaje, S , representa la función de fuentes y sumideros descrita por los múltiples fenómenos físicos en el momento de generación y transformación del oleaje. c_{σ} se refiere al cambio de frecuencia angular respecto al tiempo y c_{θ} se refiere al cambio de dirección respecto al tiempo.

En la Ecuación 3 se describe la función de fuentes de energía;

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad \text{Ecuación 3}$$

Esta ecuación es descrita por la energía del viento (S_{in}), la transferencia de energía debido a la interacción no lineal ola-ola (S_{nl}), la disipación de energía debida al whitecapping (S_{ds}), la disipación por fricción con el fondo (S_{bot}) y la disipación de energía debida por la rotura de la ola (S_{surf}).

6.1.5 Modelo de transporte de sedimentos

El modelo LITDRIFT, calcula el transporte de sedimento total (qt) sumando el transporte de sedimento de fondo (qb) y el transporte de sedimento suspendido (qs). El cálculo del transporte de fondo se realiza a partir del modelo de Engelund y Fredsoe (1976), el cual se basa en el parámetro instantáneo de Shields.

$$\theta' = \frac{U_f^2}{(s-1)gd_{50}} \quad \text{Ecuación 4}$$

El parámetro de Shield's θ' , se obtiene a partir de la velocidad de fricción de la ola, donde S es la densidad relativa, g la aceleración de gravedad y d_{50} la media del tamaño de grano. Una vez obtenido el parámetro de Shield's el transporte de fondo (ecuación 5) se calcula a partir del aporte de cada ola en un determinado tiempo (t).

$$qb = \frac{1}{T} \int_0^t f(\theta') dt \quad \text{Ecuación 6}$$

El cálculo de volumen de sedimento en suspensión para un paso en el tiempo se calcula a partir de la ecuación de difusión vertical:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial y} \right) + w \frac{\partial c}{\partial y} \quad \text{Ecuación 7}$$

C representa la concentración instantánea de sedimento en un volumen determinado, Y es la coordenada vertical, ε_s el coeficiente de difusión turbulento, el cual se considera proporcional a la viscosidad de remolino y w representa la velocidad de caída del sedimento en suspensión. El sedimento transportado en suspensión (ecuación 8), q_s , es calculado como el producto de la velocidad de flujo instantáneo y la concentración instantánea de sedimento.

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{2d}^D (uc) dz dt \quad \text{Ecuación 9}$$

La profundidad del agua es representada por D y U representa la velocidad instantánea del movimiento combinado por la corriente y el oleaje, la cual es obtenida a partir del modelo hidrodinámico en LITDRIFT (ecuación 10) utilizando los tensores de radiación.

$$-\frac{\partial(Sxy)}{\partial x} = \tau_b - \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho E D \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad \text{Ecuación 11}$$

Sxy representa los componentes del tensor de radiación τ_b es el esfuerzo de cizalla de la corriente, x es la coordenada perpendicular a la costa, ρ es la densidad del agua de mar, E es coeficiente de momentum y V es la velocidad de corriente.

6.1.6 Modelo morfológico del perfil transversal

El modelo LITPROF se basa en tres modelos; un modelo morfológico, un modelo de transporte sedimentario y un modelo hidrodinámico. El modelo morfológico se basa en la ecuación de continuidad para el fondo marino, dada por:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{1}{1-n} \cdot \frac{\partial q_{s,x}}{\partial x} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde $\frac{\partial z_b}{\partial t}$ es el cambio del fondo marino respecto al tiempo, en función de la porosidad (n) y la tasa de transporte a lo largo del perfil ($\frac{\partial q_{s,x}}{\partial x}$). La tasa de transporte de fondo a lo largo del perfil ($\frac{\partial q_{s,x}}{\partial x}$) se calcula a partir del modelo de Engelund y Fredsoe (1976) descrito previamente por la Ecuación 4 y Ecuación 6.

La transformación del oleaje y los procesos por los cuales pasa (asomeramiento, refracción, rotura y pérdida de energía por fricción de fondo) están descritos por la ecuación de energía de ola:

$$\frac{d(E_f \cdot \cos \alpha)}{dx} = D_{br} + D_{bf} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde E_f representa el flujo de energía de la ola, α el ángulo incidente de la ola, x las coordenada transversal al perfil y D_{br} y D_{bf} representan la disipación de energía por rotura y por fricción con el fondo.

El modelo LITPROF utiliza una tabla de transporte sedimentario, la cual es creada en función de las características del oleaje y el nivel del mar. Esta tabla se generó con los mismos parámetros utilizados para el modelo LITDRIFT (Tabla VII), además de especificar los rangos de cada una de las características del clima de oleaje bajo la influencia de huracanes (dirección promedio, altura de ola y periodo de ola). De esta manera durante los cálculos del modelo LITPROF, las tasas de transporte son encontradas por interpolaciones en la tabla establecida, en vez de llamar al modelo de cálculo de transporte y realizar todo el procedimiento.

7. Método

9.1 Flujo del trabajo

Para cumplir el objetivo de esta tesis se dividió el estudio en las siguientes componentes:

- Caracterización de receptores (perfiles de playa y sedimento)
- Caracterización del forzante (clima medio del oleaje y clima extremo del oleaje para presente y futuro)
- Calibración y validación del modelo de transporte litoral
- Análisis de sensibilidad

- Comportamiento del transporte longitudinal para presente y futuro bajo oleaje medio
- Comportamiento del transporte longitudinal para presente y futuro bajo clima de oleaje extremo
- Comportamiento transversal del perfil de playa para a presente y futuro bajo clima de oleaje extremo

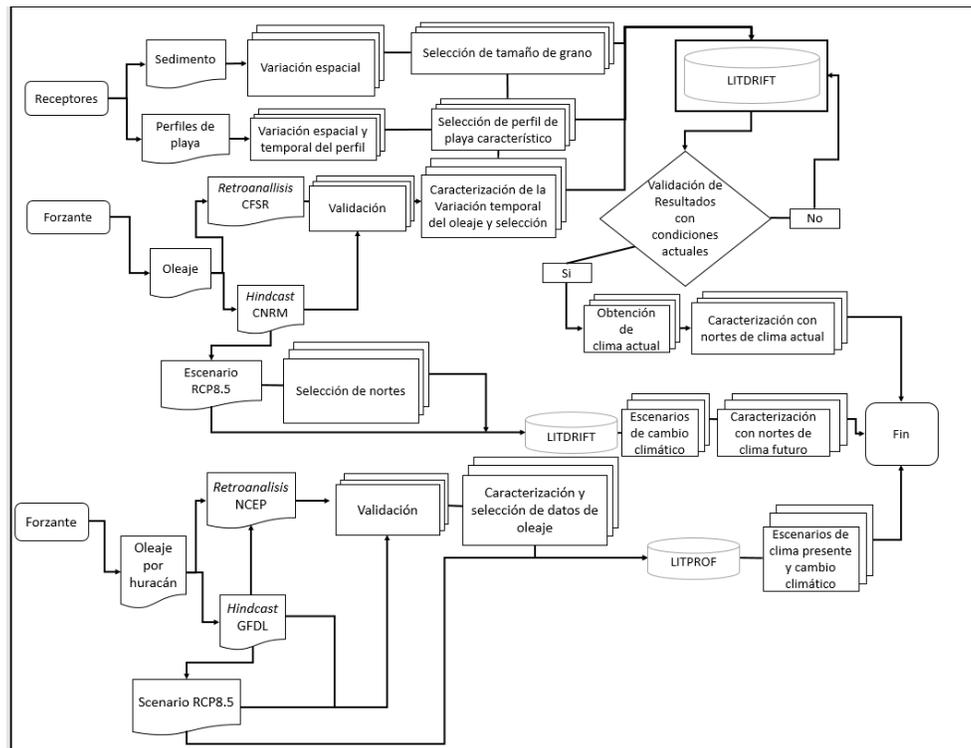


Figura 2.-Diagrama de flujo.

En la Figura 2 se puede observar como los datos obtenidos fueron divididos en forzantes y receptores. Los forzantes (oleaje medio y extremal) fueron tomados de simulaciones numéricas, mientras que los receptores (perfiles, orientación de la línea de costa y sedimentos) fueron obtenidos de trabajos de campo y análisis granulométrico.

En el caso del clima de oleaje se utilizaron bases generadas por el CFSR y CNRM bajo condiciones de clima presente y bajo proyecciones a futuro bajo el escenario RCP 8.5 (de sus siglas en inglés *Representative Concentration Patways*) respectivamente. Una vez obtenido el clima de oleaje, este se utilizó para forzar el modelo de transporte litoral, el cual fue calibrado y validado con base a un análisis de sensibilidad a los distintos perfiles y sedimentos presentes en la zona, así como a la variación del clima marítimo a lo largo de la costa. Con este análisis se pudo dar respuesta a si esta zona puede o no ser representada mediante un solo perfil de playa, mismas propiedades de sedimento, y un solo nodo de oleaje. Una vez seleccionados los agentes receptores se

procedió a caracterizar el transporte de sedimentos bajo el clima medio y bajo la acción de *Nortes*, tanto para el clima actual (1970-2005) como para el clima futuro (2024-2100). El efecto del cambio climático sobre la dinámica litoral fue cuantificado respecto a la diferencia entre el transporte litoral en el clima presente y el futuro.

Añadido a esto se realizaron simulaciones de oleaje a partir de huracanes para presente y futuro bajo el escenario RCP 8.5. Los datos de oleaje fueron utilizados para observar el comportamiento transversal del perfil de playa y comparar el comportamiento de eventos en el presente contra eventos en el futuro.

9.2 Caracterización de receptores

9.2.1 Caracterización del perfil de playa

Para caracterizar los perfiles de playa de Yucatán se utilizó la información recabada por Trejo (2016), la cual está compuesta por 22 mediciones topo batimétricas a lo largo de la costa de Yucatán (Figura 1). Las mediciones de los perfiles de playa se realizaron durante diciembre 2010 y agosto 2011 con el propósito de representar las condiciones de invierno y verano respectivamente. Además de las mediciones de perfiles de playa, se obtuvo la orientación de la playa y se tomaron muestras de sedimento sobre la zona de deriva litoral (Tabla I).

Los perfiles fueron medidos con un equipo GPS diferencial a partir de la base de la duna hasta la profundidad máxima posible de medir. Cada uno de los perfiles de playa fue complementado mediante campañas batimétricas en agosto y septiembre de 2011, utilizando una ecosonda, llegando a una profundidad de 1.5 m. Con la información batimétrica se extendieron los perfiles de playa, para después ser completados hasta una profundidad de 10 metros utilizando la ecuación de Dean (1977).

$$h = Ax^{2/3} \quad \text{Ecuación 14}$$

Dónde:

$$h = \text{profundidad}$$

$$A = 0.41 D_{50}^{0.94} \text{ Hanson y Kraus (1989)} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$x = \text{distancia}$$

$$D_{50} = \text{Diametro medio de grano}$$

9.2.2 Caracterización de sedimentos

Los datos de las muestras de sedimento corresponden a las campañas de campo de agosto 2011 realizadas por Trejo (2016). Las muestras recolectadas fueron introducidas a un horno de secado a una temperatura de 50 °C durante 24 horas para posteriormente realizar un cuarteo de las mismas. Cada cuarteo tuvo como finalidad generar muestras de 50 g o menos para cada una de las muestras originales. Si la muestra superaba los 50 g se realizaba un segundo cuarteado.

Las muestras de sedimento fueron tamizadas utilizando tamices de 125, 300, 355, 425, 500, 710, 1000, 1180 y 1400 micras. A partir de los datos obtenidos se obtuvo el tamaño promedio de la población utilizando el método de momentos de Folk y Ward.

9.3 Caracterización del forzante

9.3.1 Clima medio de oleaje

Para caracterizar el clima medio de oleaje se utilizaron 30 años, de oleaje, que es el número de años mínimo especificado por la Organización Meteorológica Mundial para la caracterización del clima (Arguez y Vose, 2011). El oleaje fue obtenido a partir del modelo MIKE 21 SW, que es un modelo espectral de oleaje de tercera generación, forzado por vientos del reanálisis CFSR, así como vientos del MCG CNRM. Ambas bases de datos (CFSR y CNRM) cuentan con dos periodos de registro. En el caso del modelo CNRM desde 1970 al 2015. El modelo CNRM fue comparado con el reanálisis CFSR, en orden de evaluar el sesgo del modelo. Añadido a esto, los datos de Appendini *et al.* (2018) cuentan con proyecciones a futuro a partir del modelo CNRM bajo el escenario RCP 8.5. Estas proyecciones se dividen en dos periodos; mitad de siglo y final de siglo (2081-2099) las cuales fueron utilizadas para representar el clima futuro.

Las bases de campos de viento a partir del CNRM y el CFSR para presente y futuro fueron utilizadas para realizar simulaciones mediante el modelo MIKE 21 SW. La resolución del dominio computacional para este modelo fue de 10 km bajo una malla no estructurada, resolviéndose por el método de volúmenes finitos. La malla cuenta con fronteras en el estrecho de Florida y en el mar del Caribe entre América Central y Cuba, a una longitud de 80°. La batimetría utilizada fue la ETOPO1 (Amante y Eakins, 2009) añadiendo campañas locales en áreas seleccionadas de la costa mexicana.

La configuración utilizada para cada una de las simulaciones siguió el trabajo de Ruiz-Salcines (2013), quien calibró el modelo para simular eventos de huracanes y comparó resultados numéricos contra resultados de campo de diferentes boyas de la NOAA en el Golfo de México. La configuración utilizó una discretización direccional de 360° en 18 direcciones y una discretización espectral logarítmica con un mínimo de 0.05 Hz. Se tomó en cuenta el efecto de fricción de fondo basado en una rugosidad de Nikuradse de 0.04 m, interacción entre cuádrupletas y whitecapping. Las fronteras fuera de la costa en el estrecho de Florida se consideraron cerradas y las olas en dirección fuera del dominio fueron totalmente absorbidas. Mediante esto se obtuvieron variables del estado de mar como altura de ola, periodo pico y dirección promedio. Una vez obtenidos los datos de oleaje se extrajeron los datos de oleaje a partir de 14 nodos propuestos a una profundidad de 20 m (Figura 1).

Los resultados de oleaje en base al CFSR son una fuente fiable con menor incertidumbre ya que los campos de viento del CFSR incluyen asimilación de datos, mientras que los datos del CNRM son contrastados con los datos de oleaje obtenidos con el CFSR, y así evaluar el error del MCG al usarlo para obtener oleaje.

9.3.2 *Clima extremo del oleaje*

El clima de oleaje extremal fue representado por la influencia de dos tipos de eventos; *Nortes* y huracanes. Los eventos de *Nortes* fueron seleccionados utilizando datos de rapidez y dirección de viento, además de presión reducida sobre el nivel medio del mar a partir del reanálisis CFSR (<https://rda.ucar.edu/datasets/ds093.1>) y el modelo CNRM para presente (1970-2005) y futuro (2026-2044, 2081-2100) (<https://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/ceraresearch>). Las variables atmosféricas mencionadas anteriormente fueron seleccionadas por ser los principales factores utilizados para clasificar un evento *Norte* (Méndez, 2008; Appendini, 2018; Torres-Freyermuth et al., 2017; Ojeda et al., 2017; Colle & Mass, 1995; Schultz *et al.*, 1998; Reding, 1992; Pérez et al., 2014).

Con base a trabajos anteriores donde se caracterizan o identifican *Nortes*, en este trabajo se identificaron los *Nortes* a partir de la información atmosférica descrita anteriormente. Para identificar los *Nortes* que inciden en Yucatán consideramos la intensidad y la dirección del viento, considerando como *Nortes* a aquellos eventos que presentan vientos con direcciones mayores a 330° y menores a 45°, con presiones reducidas sobre el nivel medio del mar mayores a 1005 hpa, y con una rapidez de viento mayor a 7.5 m/s al inicio del evento, finalizando el evento si la rapidez disminuye por debajo de los 3.5 m/s. Para corroborar la selección de eventos, se realizó una selección aleatoria de 100 eventos identificados, revisando visualmente su

comportamiento y que en realidad representen eventos *Norte*. Con base a las fechas obtenidas para los *Nortes* se extrajeron las condiciones de oleaje para los análisis de transporte de sedimento. Los *Nortes* identificados en el CFSR (1975-2005) se utilizaron para caracterizar el clima actual y evaluar el sesgo para el clima actual en el CNRM, el cual se utilizó también para caracterizar las condiciones futuras (2026-2044, 2081-2100) bajo el escenario RCP 8.5.

Una vez echo lo anterior, los parámetros de selección se ajustaron de manera que siguieran estos tres puntos principales para clasificar un *Norte*, corroborando mediante una selección de 100 eventos de manera aleatoria que se siguieran estos tres puntos. La selección tomo en cuenta los eventos atmosféricos con direcciones mayores a 330° y menores a 45°, con presiones reducidas sobre el nivel medio mayores a 1005 hPa, además de tener una rapidez de viento mayor a 7.5 m/s al inicio del evento y finalizar con una rapidez mayor a 3.5 m/s. se obtuvieron las fechas de cada evento para poder extraer los datos de las bases de datos del clima medio.

El oleaje debido a huracanes se obtuvo a partir de datos de oleaje de Appendini (2018) generados a partir de eventos sintéticos del modelo GFDL y el reanálisis NCEP. Ambas bases de datos (GFDL y NCEP) han demostrado ser confiables a nivel mundial y regional (Dastgheib *et al.*, 2016; Müller *et al.*, 2018; Reguero *et al.*, 2012;). En el caso de la costa de Yucatán el clima extremo se ha representado utilizando el reanálisis NCEP y el modelo GFDL generando buenos resultados al ser comparados con datos históricos (Appendini, 2018). Por estos motivos ambas bases de datos se utilizaron en este trabajo.

El modelo GFDL y el reanálisis NCEP fueron utilizados para crear eventos sintéticos a partir del método de Emanuel (2006, 2008), el cual realiza implantaciones aleatorias de núcleos de vórtices calientes en el océano. Cada uno de los vórtices puede desarrollarse o decaer dependiendo de qué tan favorables sean las condiciones para el evento. Los campos de viento generados a partir de los vórtices del modelo GFDL y el reanálisis NCEP fueron utilizados para caracterizar el clima del oleaje para presente y futuro mediante el modelo MIKE 21 SW utilizando la misma resolución y configuración para el clima medio.

El oleaje generado a partir del reanálisis de viento NCEP fue utilizado para representar las condiciones en el presente (1975-2005), mientras que las condiciones futuras (2070-2100) se obtuvieron mediante el modelo GFDL bajo el escenario RCP 8.5. El modelo GFDL fue comparado con el reanálisis NCEP, en orden de evaluar el sesgo del modelo para el clima presente.

A los datos de oleaje obtenidos se les realizó un análisis extremal con los datos generados frente a Progreso, Yucatán. Se obtuvieron los percentiles 90, 95 y 99 para presente y futuro en búsqueda de cambios entre ambos periodos de tiempo. Esta selección se realizó tanto para la altura de ola como para el periodo pico.

9.4 Caracterización del transporte longitudinal

La información obtenida de oleaje para el clima medio y los *Nortes*, se utilizó para generar la caracterización del transporte sedimentario en Yucatán. Para obtener el transporte litoral se calibró y validó el modelo LITDRIFT el cual ha sido utilizado para caracterizar la dinámica litoral de la costa de Yucatán tanto a nivel regional (Appendini *et al.*, 2012) como a nivel local (Batún, 2018; Fernández, 2012). Por lo tanto, el modelo LITDRIFT es considerado una buena herramienta para cumplir el objetivo de este proyecto.

Con el objetivo de establecer la configuración del modelo LITDRIFT se evaluaron distintas simulaciones. Cada una de las simulaciones tomaron en cuenta los siguientes parámetros; presencia de rizaduras, temperatura de agua, orden de solución de Stokes, propiedades del grano, velocidad de caída y tipo de descripción espectral. Adicionalmente de los nodos propuestos se seleccionó el nodo de oleaje más cercano a Progreso (Figura 1) y se utilizó un perfil de playa sobre Progreso (figura 3). Cada una de las simulaciones realizadas tomo en cuenta parámetros del trabajo realizado por Appendini *et al.* (2012) quien utilizo un D50 de 0.35 mm, una rugosidad de 0.03 m y una orientación para el perfil de Progreso (Figura 4) de 350°.

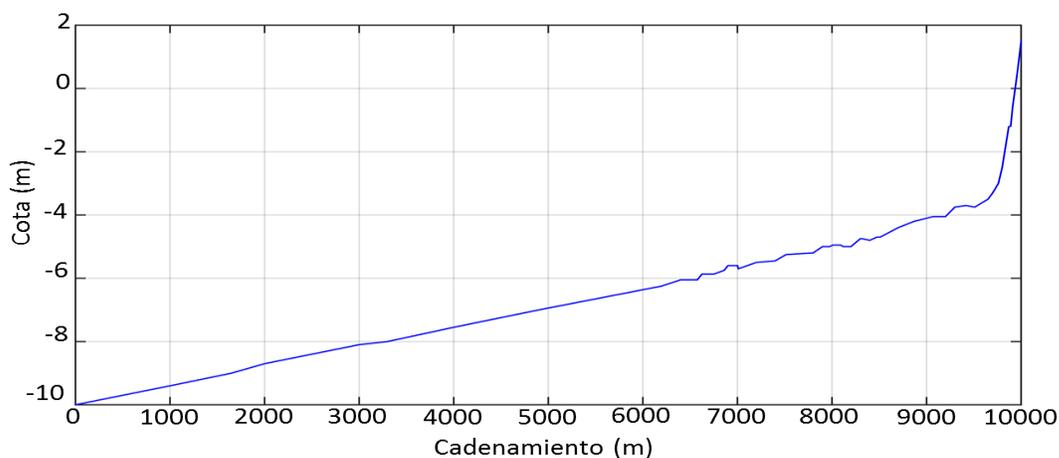


Figura 4.- Perfil PROG06.

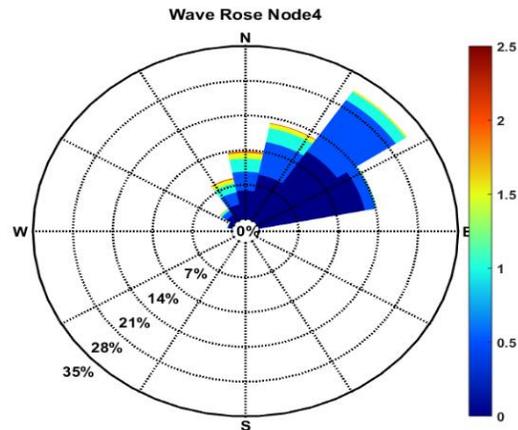


Figura 5.-Nodo utilizado para obtener datos de oleaje.

Para el cálculo de los parámetros de rugosidad y velocidad de caída, se utilizaron las ecuaciones propuestas por Liu (2001). A continuación, se muestran ambas ecuaciones y en que parámetros se basan;

$$WS = \frac{\sqrt{\left(\frac{36 v}{dn}\right)^2 + 7.5 (s-1)g dn} - \frac{36 v}{dn}}{2.8} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde;

ωs = velocidad de asentamiento

$$s = \frac{\rho}{\rho s}$$

ρ = densidad del fluido

ρs = densidad del sedimento

$\pi = 3.1416$

d = diametro del grano

v = Viscosidad del fluido

g = gravedad

En el caso de la rugosidad de fondo o de Nikuradse esta se puede emplear de dos maneras distintas dependiendo del tipo fondo que se tenga, sea con presencia o sin presencia de rizaduras (fondo plano). La Ecuación 17 se utilizó cuando el perfil fue de fondo plano y la Ecuación 18 cuando el perfil presento rizaduras.

$$Hr = (1 - 10) \cdot d_{50} \text{ fondo sin rizaduras} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$Hr = 100 \cdot d_{50} \text{ fondo con rizaduras}$$

Ecuación 18

Donde;

$Hr = \text{Altura de la rizadura}$

$ks = (0.75) \cdot Hr$

$Ks = \text{Rugosidad de Nikurase}$

Para el uso del modelo se seleccionaron distintos forzantes y receptores para caracterizar el transporte litoral buscando minimizar las variables. En la siguiente sección, se explican los análisis realizados para el proceso de selección.

9.4.1 *Análisis de sensibilidad*

Con el objetivo de evaluar si es o no factible representar la costa de Yucatán con únicamente un nodo de oleaje, un perfil de playa y un tamaño de grano se realizaron distintos análisis de sensibilidad. Cada uno de los análisis de sensibilidad consistió en observar si hay o no variaciones estadísticamente significativas al variar únicamente los nodos de oleaje propuestos, los perfiles de playa y el tamaño de grano. De ser posible esto, los gradientes de transporte litoral representarían solo la variación de la forzante (oleaje) de acuerdo a las bases de datos, permitiendo una mejor interpretación del efecto del cambio climático sobre la dinámica litoral.

Para saber si las variaciones en el transporte neto por la variación en los parámetros antes mencionados, son o no son significativas, se realizaron distintos análisis estadísticos dependiendo del tipo de distribución de los datos. En el caso de ser una distribución normal se aplicó un análisis por medio del método t-student, mientras que para distribuciones no normales se aplicó un análisis de Wilcoxon. El intervalo de confianza utilizado en ambos análisis fue de 95 % y α de 0.05. Dependiendo del tipo de análisis sea Wilcoxon o t-student el criterio de decisión para saber si es o no una diferencia significativa fue el siguiente;

En el caso del análisis por medio de t-student un valor de t menor a la t crítica indica variaciones no significativas, caso contrario las variaciones serán significativas. Para el análisis de Wilcoxon un valor t menor al valor crítico variaciones significativas, caso contrario las variaciones serán no significativas. A continuación, se detalla cada uno de los análisis realizados.

Para realizar el análisis de sensibilidad a los perfiles de playa se obtuvo el transporte sedimentario para todos los respectivos perfiles en las campañas de invierno y verano (Figura 6 y Figura 7). Cada uno de los perfiles de playa mantuvo una orientación de 350° en todas las simulaciones y la configuración seleccionada al calibrar el modelo, a fin de evaluar solo el efecto de modificar el perfil. Si los resultados de las simulaciones muestran variaciones no significativas, se selecciona un solo perfil como representativo, siendo aquel con la mayor correlación al perfil promedio de dicha campaña.

Para el análisis de sensibilidad en el caso del tamaño de grano se realizaron simulaciones donde se variaron únicamente las distintas medias de grano (D_{50}) obtenidas en cada zona muestreada. Cada una de las simulaciones mantuvo una orientación del perfil de playa de 350° y la configuración seleccionada al calibrar el modelo. E caso de obtener una variación no significativa se considerará el tamaño de grano que represente la moda de todas las muestras.

Para evaluar la sensibilidad del modelo de transporte al uso de distintos nodos de oleaje, se simuló el transporte usando cada uno de los nodos, manteniendo la misma orientación de playa, tamaño de grano y perfil. En caso de que la variación fuera no significativa se seleccionara el nodo con mayor correlación a los demás. Para obtener la correlación constó en obtener la suma de las correlaciones de cada uno de los nodos contra todos los demás, siendo de la siguiente manera para el nodo 1; nodo 1 contra nodo 2, nodo 1 contra nodo 3, así sucesivamente hasta realizar todas las combinaciones posibles para cada nodo. Cada una de las comparaciones uso datos de altura significante y periodo pico para obtener las distintas correlaciones. Los resultados de correlación obtenidos para cada nodo fueron normalizados y mediante esta operación se eligió el nodo con el mayor valor de correlación.

9.5 Comportamiento del transporte sedimentario con oleaje de clima medio

Para caracterizar el transporte sedimentario con el oleaje de clima medio se realizaron simulaciones con los forzantes y receptores seleccionados en el paso anterior, y utilizando la orientación de la costa que representa cada una de las zonas del área de estudio (Figura 1). Las simulaciones para clima presente tomaron en cuenta el oleaje a partir del modelo CNRM y el reanálisis CFSR en búsqueda de validar los resultados del modelo CNRM. Para observar el comportamiento del transporte sedimentario bajo el clima futuro se utilizaron los datos de oleaje derivados del modelo CNRM bajo el escenario RCP 8.5. Los resultados obtenidos de transporte longitudinal fueron comparados con los resultados de clima presente, para evaluar de esta manera el efecto del cambio climático sobre el transporte longitudinal. Así mismo calculando los gradientes en las tasas de transporte neto anual se definió el estado potencial de cada

una de las zonas del área de estudio (Figura 1), es decir se evaluó si la playa es potencialmente erosiva, de acreción o estable.

9.6 *Comportamiento del transporte longitudinal con clima extremo*

El transporte longitudinal generado por eventos extremos está dominado por *Nortes* en la zona de estudio, por esta razón se utilizaron los datos de oleaje para los periodos identificados de *Nortes* para forzar el modelo LITDRIFT de la manera descrita anteriormente. El cálculo de transporte sedimentario durante *Nortes* se estimó con los datos del modelo CNRM y CFSR, utilizando los resultados del CFSR para evaluar el sesgo del CNRM para poder representar el clima actual. Para caracterizar los cambios en el clima futuro, se utilizó el modelo CNRM bajo el escenario RCP 8.5 y se comparó con las cantidades para el clima presente.

9.7 *Comportamiento transversal del perfil de playa con clima extremal*

Con el objetivo de observar los cambios sobre el perfil de playa inducidos por el efecto del oleaje generado por huracanes, se realizaron simulaciones con el modelo LITPROF forzando con el objetivo basado en eventos sintéticos, descrito anteriormente. Las simulaciones utilizaron los percentiles 90, 95 y 99 a partir de los datos de oleaje por huracanes para determinar los picos de las tormentas que pueden llegar a afectar a la zona. Para el clima de oleaje actual se realizó el análisis con los datos derivados usando el reanálisis NCEP, a fin de evaluar el sesgo de resultados de presente a partir del modelo GFDL. Para el clima de oleaje a futuro se utilizó el modelo GFDL bajo el escenario RCP 8.5 con el fin de encontrar diferencias al contrastar contra el clima de oleaje para el clima presente.

A partir de los valores establecidos de oleaje para el pico de las tormentas, se generaron series de tiempo con una duración de 15 días imitando el comportamiento del huracán Gilberto. De igual manera se reprodujo el comportamiento de la altura de ola y periodo pico del evento Gilberto, asumiendo un embate normal del oleaje hacia el perfil de playa. El comportamiento de la altura de ola según el huracán Gilberto mostró un ascenso el cual fue tomado como lineal hasta llegar al percentil seleccionado. Este ascenso duro 6 días para mantenerse constante durante los siguientes 3 días y descender linealmente durante los últimos 6 días. En cuanto al periodo pico de oleaje, este se consideró constante hasta que la altura de ola llegara al punto máximo de ascenso. En este punto de máximo ascenso el periodo pico asciende de un periodo de 6 s (periodo base) al del percentil seleccionado. El valor del percentil seleccionado permaneció constante durante los siguientes 3 días, para posteriormente regresar al periodo base. Este proceso se repitió para cada percentil seleccionado generando las series de tiempo.

Cada una de las series de tiempo generadas fueron utilizadas en conjunto con el perfil seleccionado para realizar las simulaciones con el modelo LITPROF. En total se realizaron 18 simulaciones; 9 de ellas utilizando cada serie generada y 9 utilizando una serie de tiempo en la cual aumenta el nivel del mar.

La serie de aumento del nivel del mar se obtuvo a partir de resultados de campo reportados por Sánchez (2017). En estos resultados el autor reporta una cota de 0.4 m sobre el nivel medio del mar para un evento *Norte* en 1979. Este dato fue utilizado para generar la serie de aumento del nivel del mar, tomando en cuenta un aumento lineal hasta la mitad de los 15 días simulados y posteriormente un descenso hasta regresar nuevamente a una cota de 0 m sobre el nivel medio del mar.

8. Resultados y discusión

10.1 Caracterización de receptores

10.1.1 Caracterización del perfil de playa

Los perfiles obtenidos para la época de invierno y verano mostraron diferentes comportamientos, principalmente en los primeros 50 m (Figura 6, Figura 7 y Figura 8). Los perfiles de invierno mostraron una pendiente más inclinada en la cara de la playa (cadenamiento 25 a 50) además de una playa más angosta que los perfiles de verano (Figura 8). Estos cambios estacionales de los perfiles de playa se atribuyen a las variaciones en el clima de oleaje entre invierno y verano. Durante invierno los perfiles reciben oleaje con mayor energía debido a frentes fríos (*Nortes*) (Medellin, 2017), resultando en una playa angosta, en contraste con la presencia de una playa en condiciones de verano cuando el oleaje incidente es de baja energía.

Los perfiles de playa medidos se caracterizaron por una orientación respecto al norte (Tabla I) que varía de los de los 316° a los 359°. Estas orientaciones en su mayoría son de 344° a 359° sugiriendo una orientación E-O de la línea de costa.

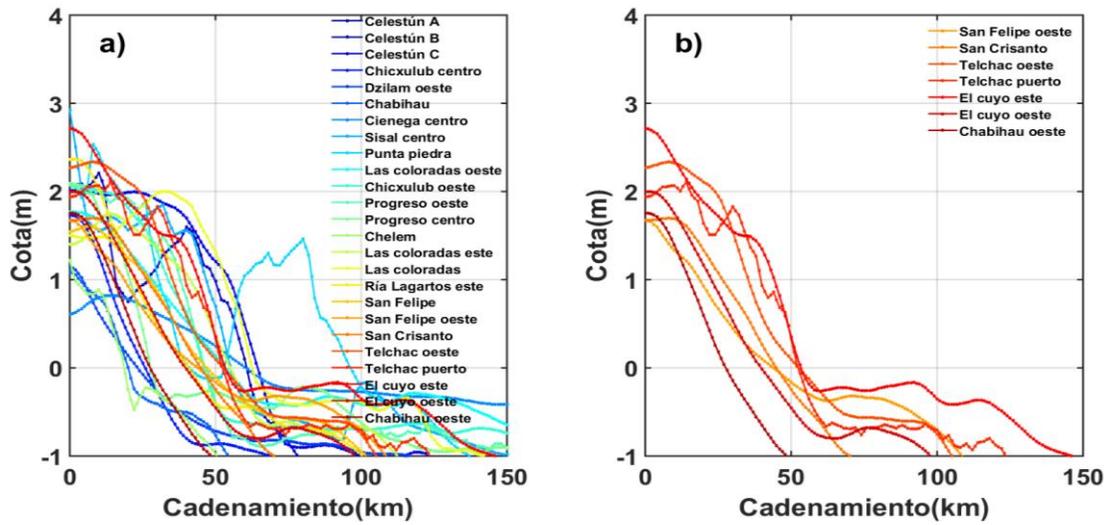


Figura 6.-Perfiles topobatimétricos para la campaña de invierno.

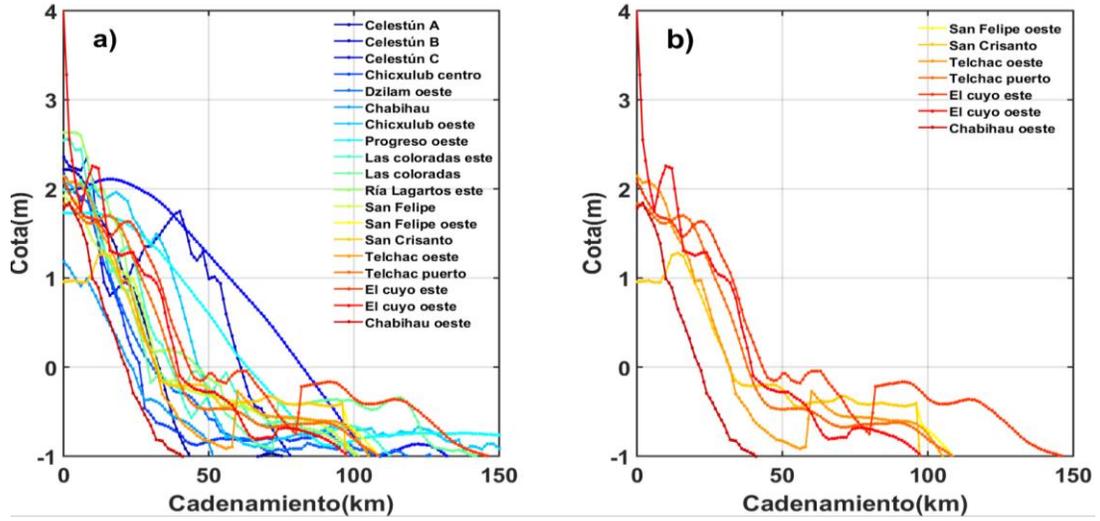


Figura 7.-Perfiles topobatimétricos para la campaña de verano.

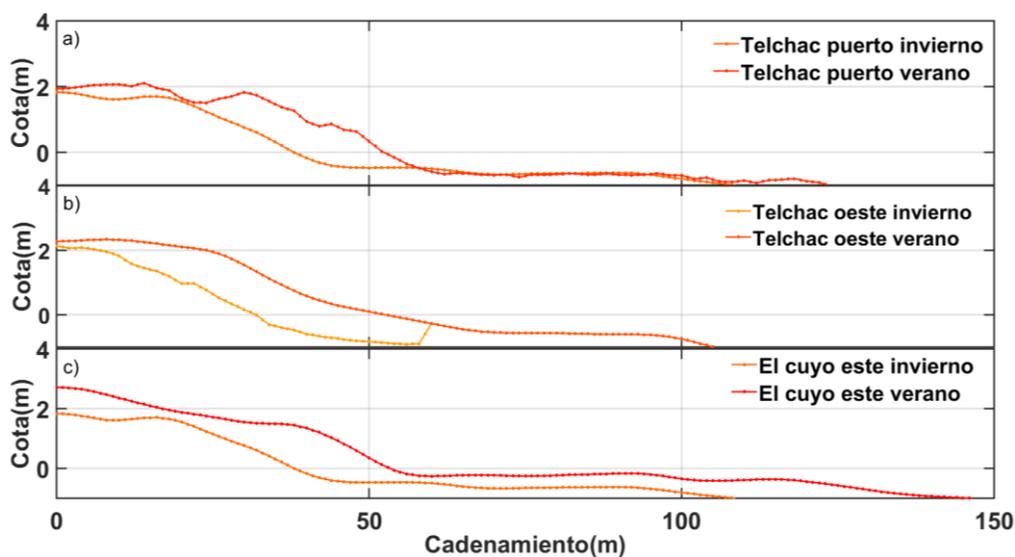


Figura 8.-Cambios estacionales sobre los perfiles de playa.

Tabla I.-Orientación de la playa y coordenadas de cada uno de los perfiles medidos.

ID	Lugar	Orientación	ID	Lugar	Orientación
1	Punta piedra	327	22	Chabihau este	342
2	Sisal oeste	349	23	Santa clara	349
3	Sisal centro	351	24	Dzilam oeste	353
4	Sisal este	343	25	Dzilam centro	345
5	Ciénega oeste	329	26	Dzilam este	351
6	Ciénega centro	333	27	Cerrito oeste	333
7	Carbonera	337	28	Cerrito centro	349
8	Chuburná oeste	344	29	El islote oeste	332
9	Chelem	346	30	El islote este	316
10	Progreso oeste	349	31	Chisahcab	344
11	Progreso Centro	341	32	Chisahcab este	4
12	Progreso este	351	33	Chabihau final	358
13	Chicxulub oeste	348	34	San felipe oeste	331
14	Chicxulub centro	340	35	San felipe	344
15	Chicxulub este	349	36	Ría Lagartos	352
16	Telchac oeste	351	37	Ría lagartos este	11
17	Telchac puerto	2	38	Las Coloradas	359
18	Telchac este	353	39	Las coloradas este	20
19	San Crisanto	350	40	El cuyo oeste	11
20	Chabihau oeste	357	41	El cuyo este	11
21	Chabihau	354	42	El cuyo final	3

10.2 Caracterización de sedimentos

El diámetro del sedimento muestreado varía de 0.22 mm a 0.54 mm (Figura 9), siendo en su mayoría arenas medias, excepto para Las Coloradas este, El Cuyo oeste que presenta arenas gruesas y San Felipe que presenta arenas finas. Esto concuerda con los resultados obtenidos por Sánchez (2009) quien menciona que la costa de Yucatán se constituye de sedimentos con diámetros de 0.2 mm a 0.5 mm.

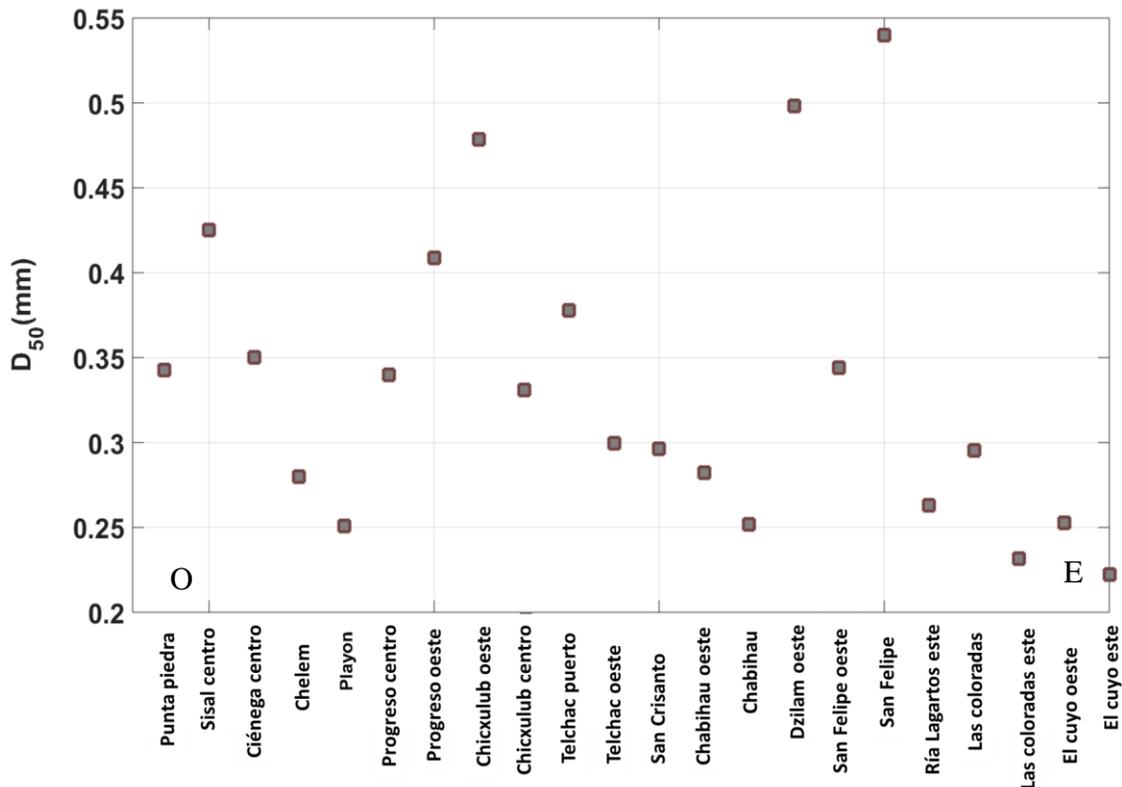


Figura 9.-Distribución de D50 a lo largo de la costa de Yucatán. Modificado de Trejo (2011).

10.3 Caracterización del forzante - clima medio

Los resultados de oleaje obtenidos por parte del CNRM siguen varias de las características del CFSR. Ambas bases de datos (CNRM y CFSR) muestran que la zona frente a Progreso se caracteriza por recibir oleaje de noreste y nor-noroeste principalmente (Figura 11). La dirección nor-noreste fue la más frecuente con presencias mayores a 1.8 % (Figura 11) a comparación de la dirección Nornoroeste la cual se representa por sectores con porcentajes menores a 0.6 %. Estos resultados concuerdan con datos de campo obtenidos por Lopez y Dominguez (2017), quienes a partir de 3 años de registro por mediciones caracterizan el oleaje de la zona. Adicionalmente los resultados de Lopez y Dominguez (2017) mencionan la relación

entre alturas de ola mayores a 2.5 metros y periodos de 10 s. En el caso de los resultados usando el modelo CNRM, estos no cuentan con una presencia notable de olas mayores a 2.5 m (Figura 10). Sin embargo el reanálisis CFSR presenta alturas de ola mayores a 2.5 m y periodos de 10 s, lo que indica una subestimación por parte de los datos del modelo CNRM.

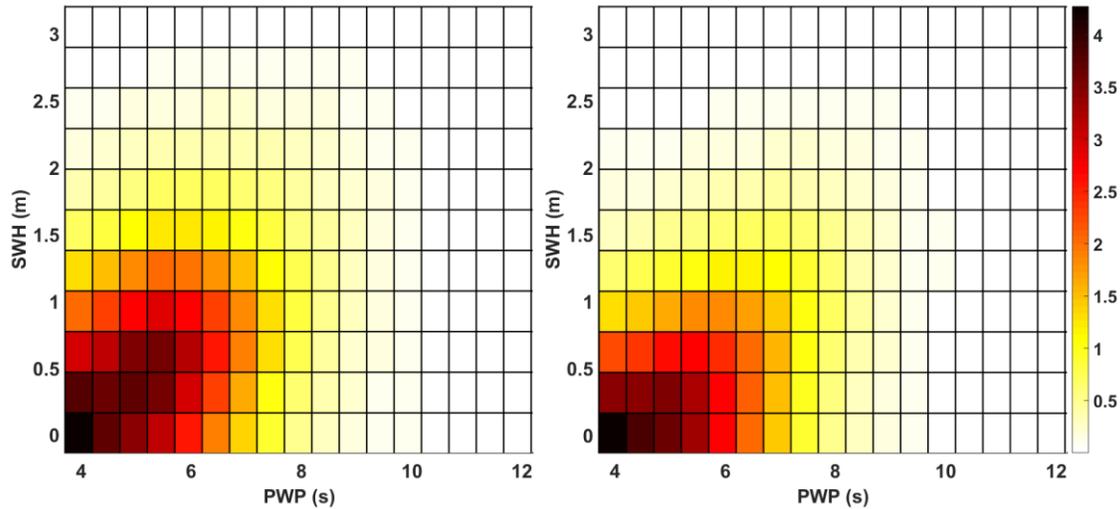


Figura 10.- Probabilidad de ocurrencia de altura significativa (SWH) contra periodo pico (PWP) a partir del modelo CNRM (derecha) y el reanálisis CFSR (izquierda) para el nodo 7.

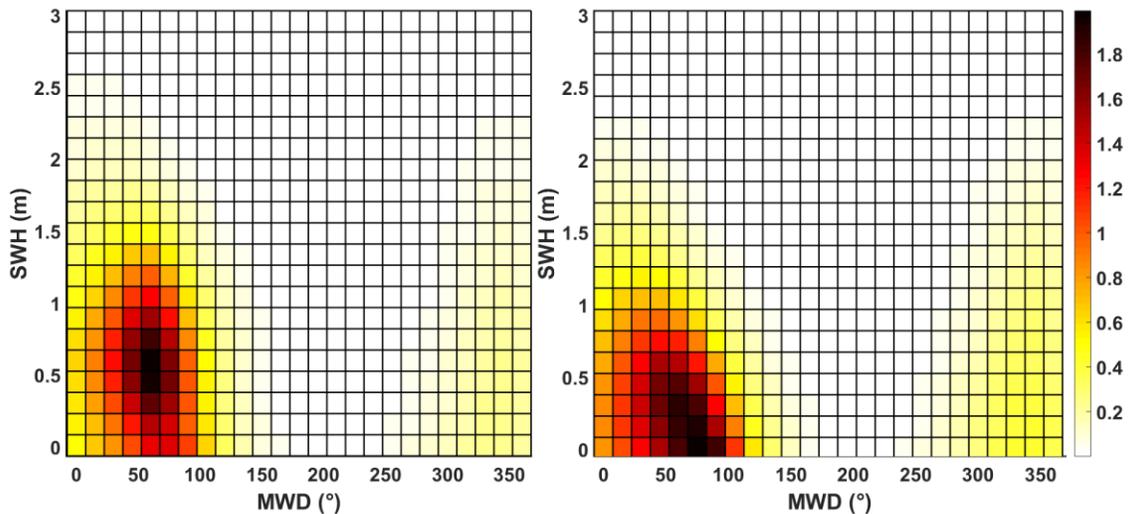


Figura 11.- Probabilidad de ocurrencia de altura significativa (SWH) contra dirección promedio (MWD) a partir del modelo CNRM (derecha) y el reanálisis CFSR (izquierda) para el nodo 7.

Para el comportamiento de los nodos de oleaje a lo largo de la costa el CNRM muestra seguir ligeramente la tendencia del CFSR, sin embargo, el CFSR tiene una

clara dirección predominante para cada nodo propuesto, que no se presenta en el CNRM (Figura 12 y Figura 13). En los primeros 8 nodos el CFSR muestra una clara tendencia del noreste, mientras que en el CNRM esta dirección reinante no es tan clara ya que en el nodo 8 se tiene una dirección con un porcentaje más alto del este que del noreste. Adicionalmente, al llegar al nodo 14 las direcciones en el CFSR son entre noreste y sureste, mientras que en el modelo CNRM la dirección sureste es predominante. A pesar de estas diferencias el modelo CNRM sigue el patrón obtenido por parte del CFSR.

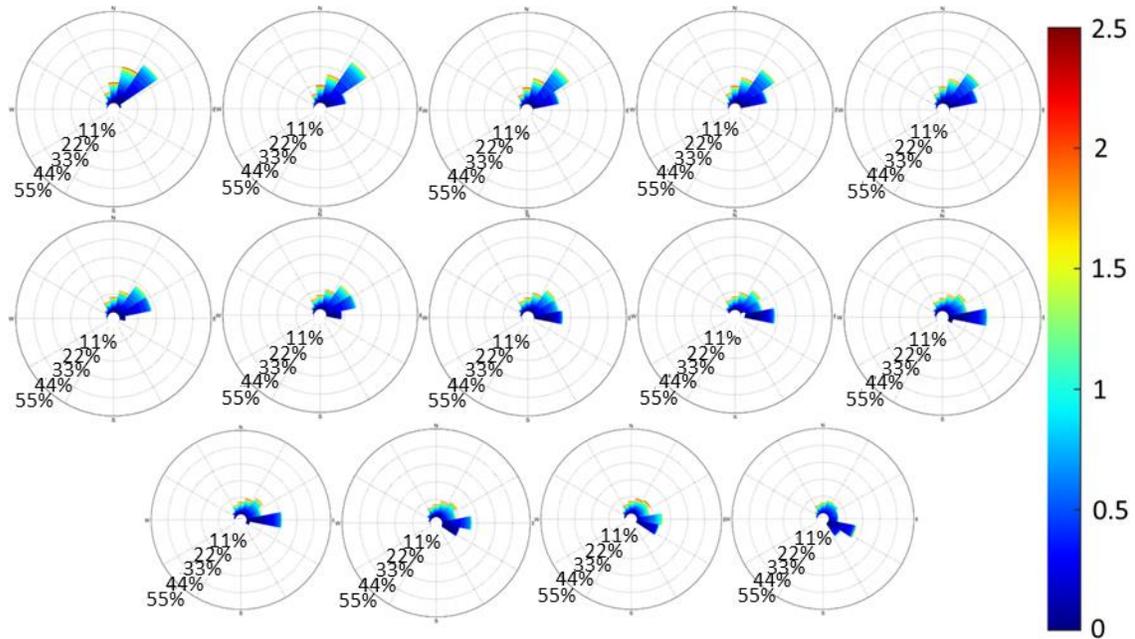


Figura 12.- Rosas de oleaje a partir de datos de CNRM (1980-2005).

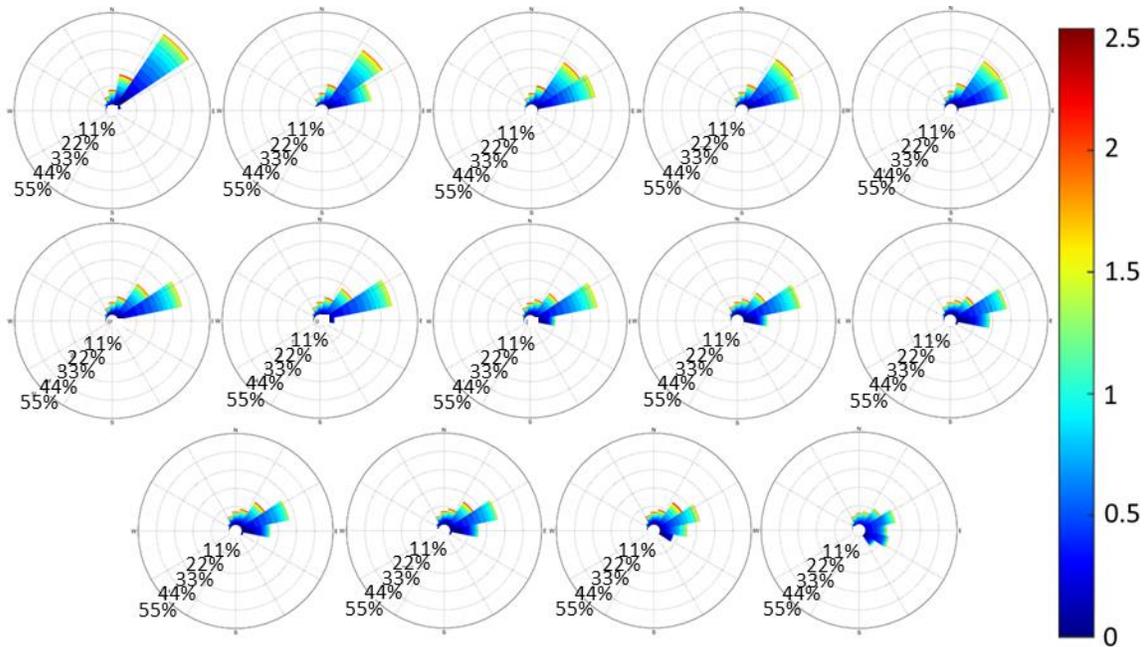


Figura 13.- Rosas de oleaje a partir de CFSR (1980-2005).

Observando los cambios entre el presente y mitad de siglo para el modelo CNRM a lo largo de la costa (Figura 14, Figura 15 y Figura 16) solo se observó un incremento en el porcentaje de olas del noreste, mientras que las demás características de las rosas de oleaje fueron muy similares. Estas similitudes se ven reflejadas en la Tabla II donde los promedios, valores máximos, mínimos y desviaciones estándares muestran valores casi idénticos, demostrando una mínima diferencia entre ambas bases de datos.

Es importante tomar estas diferencias mínimas con cuidado ya que se puede atribuir a una interpretación errónea debido a la diferencia de años para cada una de las épocas. Es decir, para el clima presente se tienen 35 años de datos, mientras que para mitad de siglo y final de siglo se tienen 18 años, lo cual podría inducir a errores. La diferencia de 12 años entre cada época puede ser estadísticamente relevante y explicar el incremento en el porcentaje observado.

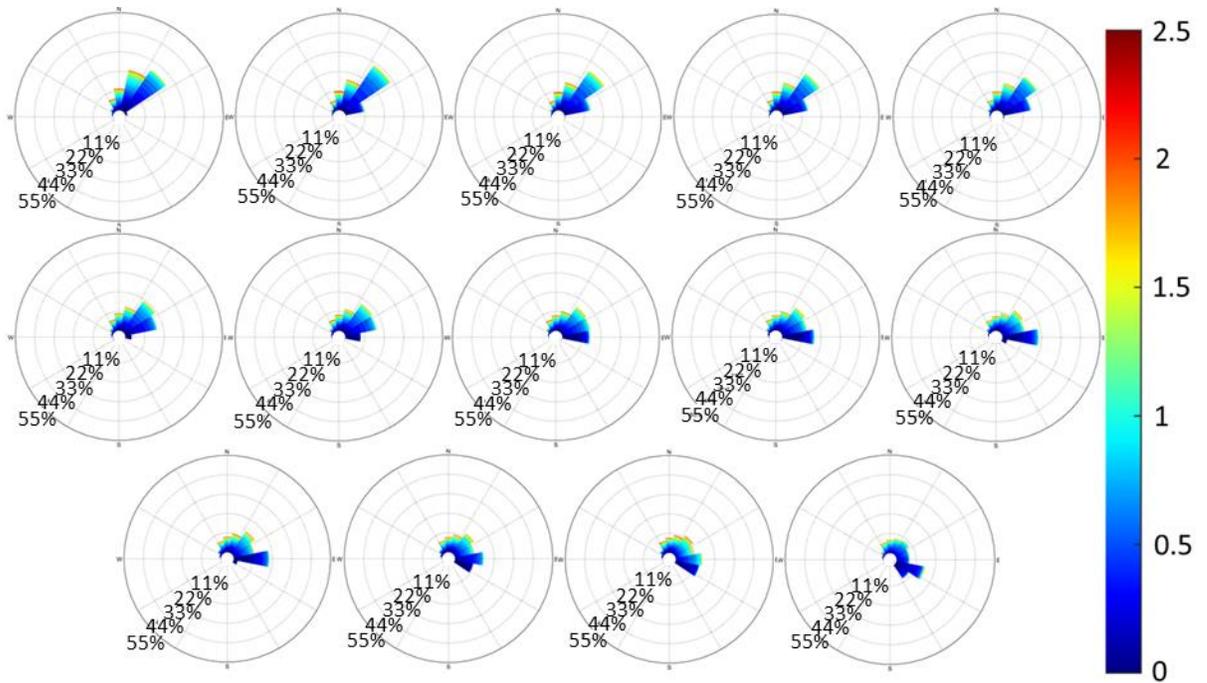


Figura 14.- Rosa de oleaje a partir de CNRM (1970-2005).

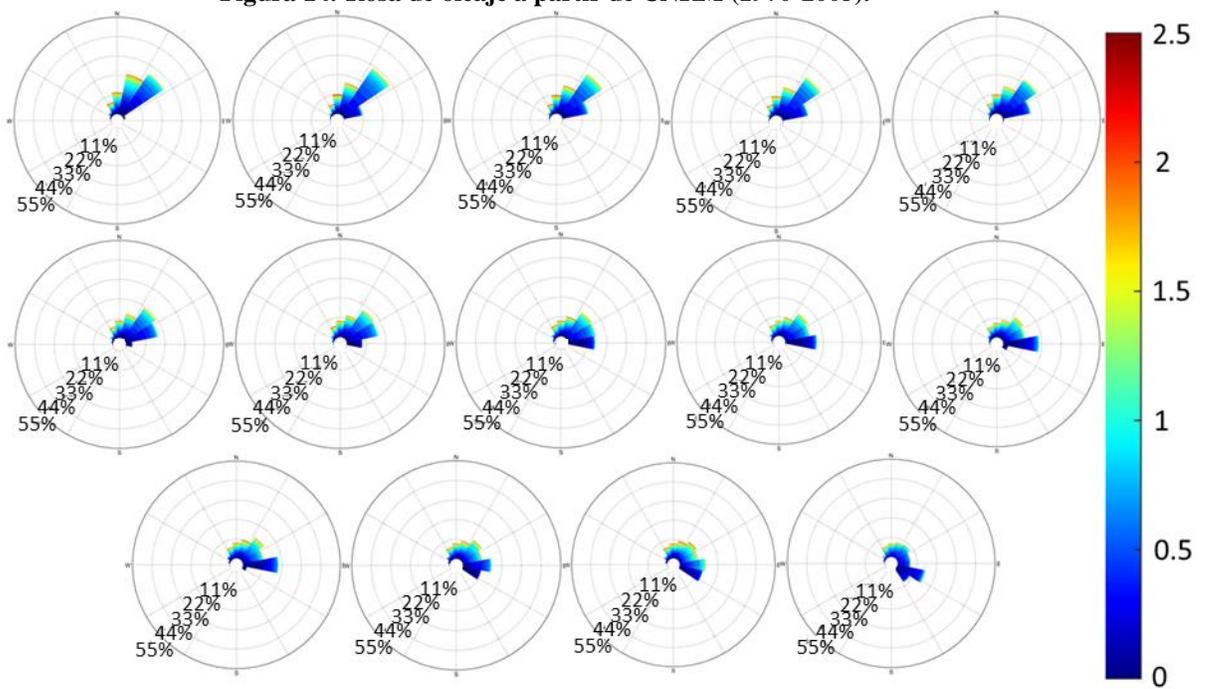


Figura 15.- Rosas de oleaje a partir del CNRM (2026-2044).

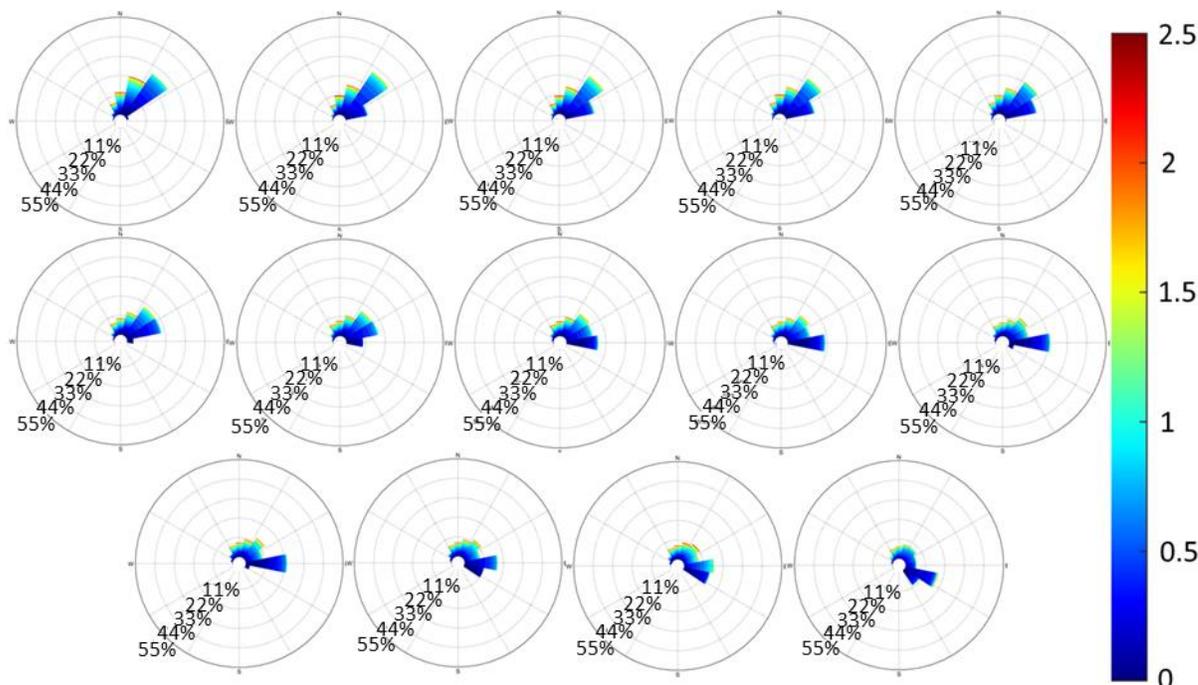


Figura 16.- Rosas de oleaje a partir del CNRM (2081-2099).

Tabla II.- Características del clima medio a mitad de siglo y final de siglo.

	CNRM 2026-2044			CNRM 2081-2099		
	Hs(m)	Periodo pico(s)	Dirección(°)	Hs(m)	Periodo pico(s)	Dirección(°)
<i>Promedio</i>	0.4367	4.5231	83.7096	0.4368	4.5249	83.7205
<i>Mínimo</i>	0.0100	3.9568	0.0108	0.0100	3.9568	0.0108
<i>Máximo</i>	3.5028	13.1078	359.9979	3.5028	13.1078	359.9979
<i>Desv. Std.</i>	0.4699	2.6106	111.6381	0.4699	2.6098	111.6349

10.4 Caracterización del clima bajo condiciones extremas

Los resultados obtenidos a partir del modelo CNRM mostraron que de cada 100 eventos identificados con la metodología descrita para obtener los eventos de *Norte*, 11 fueron eventos categorizados como falsos positivos, mientras que para el reanálisis CFSR 9 eventos fueron catalogados como falsos positivos (tabla III). Estos falsos positivos en la mayoría de los casos fueron asociados a eventos de brisas. Estudios de Zhang *et al.* (2007) muestran que un porcentaje menor a %15 es un valor aceptable de error, por lo tanto la selección definida mostró ser aceptable.

Al comparar ambas bases de datos (reanálisis y modelo) se pudieron observar patrones muy similares respecto a la dirección del oleaje por *Nortes*. En general ambas bases de datos se caracterizaron por eventos del nor-noreste y nor-noroeste, donde el CFSR tuvo una mayor contribución de eventos del nor-noreste que el CNRM. Sin embargo, esta diferencia fue por sectores con porcentajes menores a 5%, siendo muy similar la dirección obtenida en ambas bases de datos.

Al comparar las alturas de ola entre el CNRM y el CFSR se pudo observar como el CFSR se caracterizó por presentar mayores alturas de ola, con la presencia de eventos con alturas de ola mayores a 3 m y periodos mayores a los 8 segundos. Para el modelo CNRM las alturas de ola fueron de hasta 2.5 m, con periodos de hasta 8 s en la mayoría de los casos. Lo anterior muestra características muy similares para ambas bases de datos a pesar de las diferencias encontradas.

Lo anterior se complementa con resultados de Torres-Freyermuth et al., (2017) quienes caracterizan un evento de norte con mediciones en la costa de Sisal, Yucatán. En base a las mediciones determinan que la dirección del oleaje proviene de entre 340 y 45 grados, coincidiendo con nuestros resultados. Si bien el trabajo de Torres-Freyermuth et al. (2017) solo analiza un evento de norte, Heredia-Batún (2018) determina a los *Nortes* con una dirección de entre 330 y 60 grados, similar a lo expresado en este trabajo. Es importante mencionar que Heredia-Batún (2018) considera en su estudio la dirección del oleaje, viento, así como la duración del evento, lo cual explica las diferencias obtenidas, ya que en el presente trabajo se toma en cuenta solamente dirección y rapidez del viento. De lo anterior y a pesar de la escasa evidencia para validar los resultados obtenidos estos fueron similares a trabajos previos.

Tabla IV.- Cantidad de eventos *Norte* identificados.

<i>Modelo</i>	<i>Periodo</i>	<i>Cantidad total de eventos</i>	<i>Cantidad total de eventos contados</i>	<i>Eventos norte contados</i>	<i>Falsos positivos contados</i>
<i>CFSR</i>	1979-2005	519	100	89	11
<i>CNRM</i>	1979-2005	340	100	91	9
<i>CNRM</i>	1970-2005	478	100	91	9
	2026-2044	264	100	90	10
	2081-2100	226	100	92	8

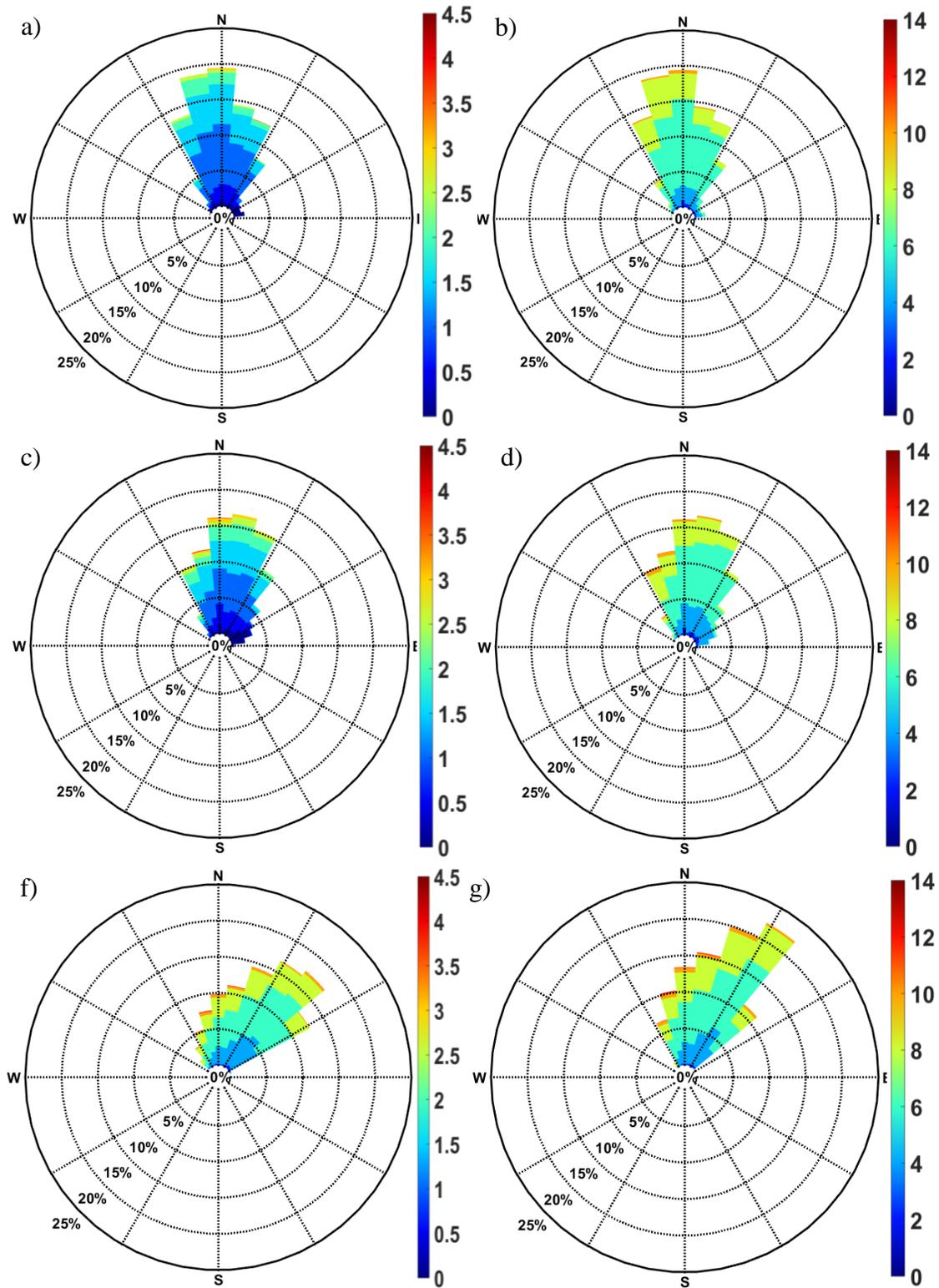


Figura 17.- Rosas de altura de ola (a, b), periodo pico (c, d) y viento (f, g) para *Nortes* a partir de CFSR (a, b y g) y CNRM (c, d y f). Los datos de oleaje provienen del nodo 7.

La rosa de viento para el clima presente se caracterizó por una dirección dominante del noreste, con magnitudes de viento de 6 m/s a 10 m/s (figura 18-g). Estos vientos generan un clima de oleaje con una dirección del noroeste y alturas de ola de hasta 1.5 m con periodos mayormente de 6 s a 8 s.

Para el clima futuro, a mitad de siglo (2026-2044) la rosa de viento muestra una dirección más marcada del noreste a comparación del clima actual, así como un incremento en eventos del noroeste con magnitudes similares a las del clima actual, entre 6 m/s y 10 m/s. Estos vientos resultaron en un aumento en cantidad de eventos de oleaje del noroeste, eventos con alturas de ola entre 1 m y 1.5 m, así como un aumento en periodos entre 6 s y 8 s.

Para final de siglo (figura 18 e y f) la rosa de viento mostro una mayor cantidad de eventos del noroeste con una rapidez entre 6 m/s a 10 m/s. Estos vientos resultaron en olas con direcciones del sector este y alturas de ola menores que el periodo actual y el de mitad de siglo. Las alturas de ola para fin de siglo son de hasta 1 m de altura, con la presencia de periodos entre 2 s y 6 s. Este cambio tan drástico para final de siglo se atribuye a que las fechas concuerdan con alturas muy bajas (Figura 20).

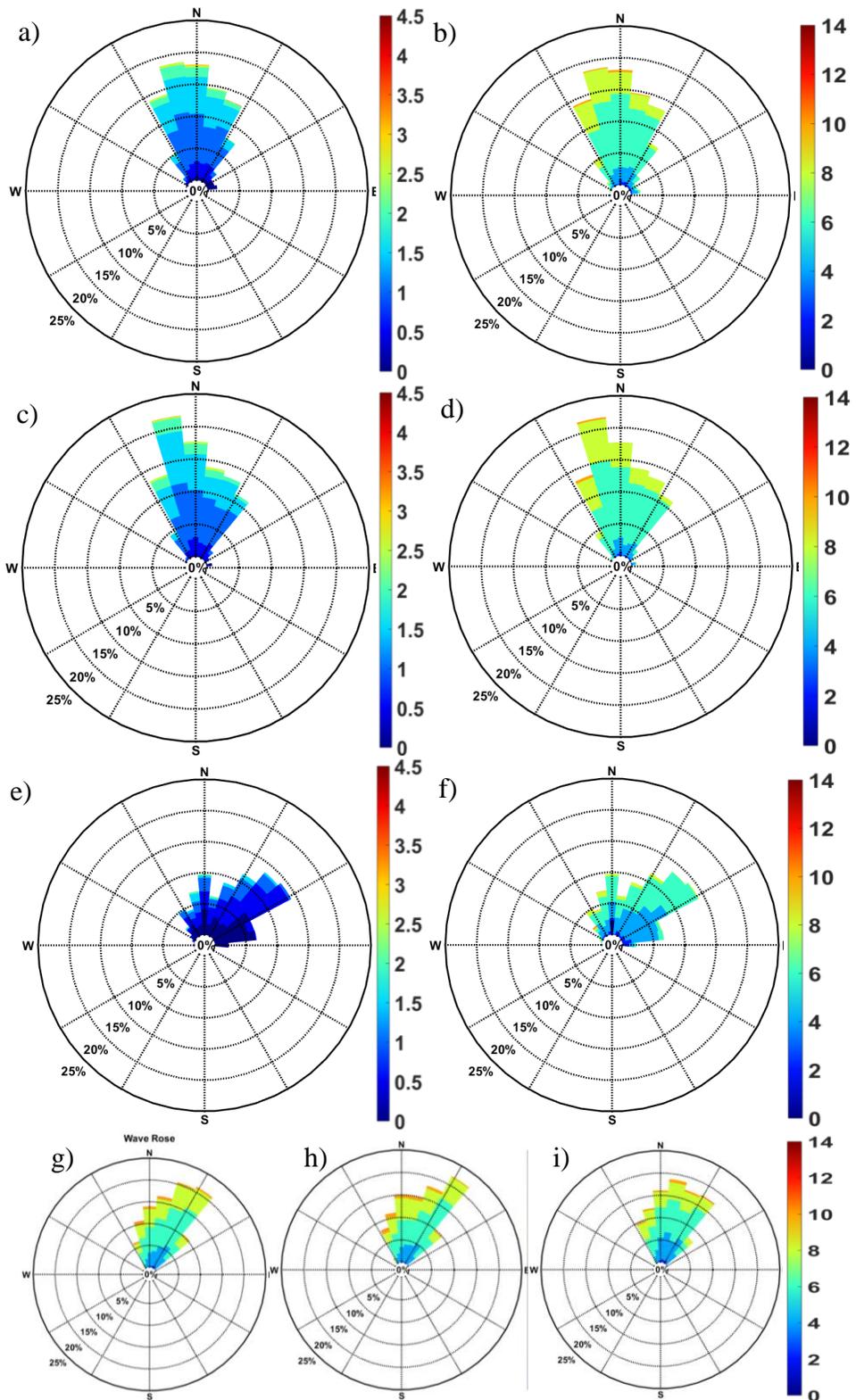


Figura 19.- Rosas de altura de ola (a, c, e) y periodo pico (b, d, f) para *Nortes* a partir del modelo CNRM para presente (sección superior), mitad de siglo (sección media) y final de siglo (sección inferior). Los incisos g, h y i corresponden a datos de viento para presente, mitad de siglo y final de siglo respectivamente. Los datos de oleaje provienen del nodo 7.

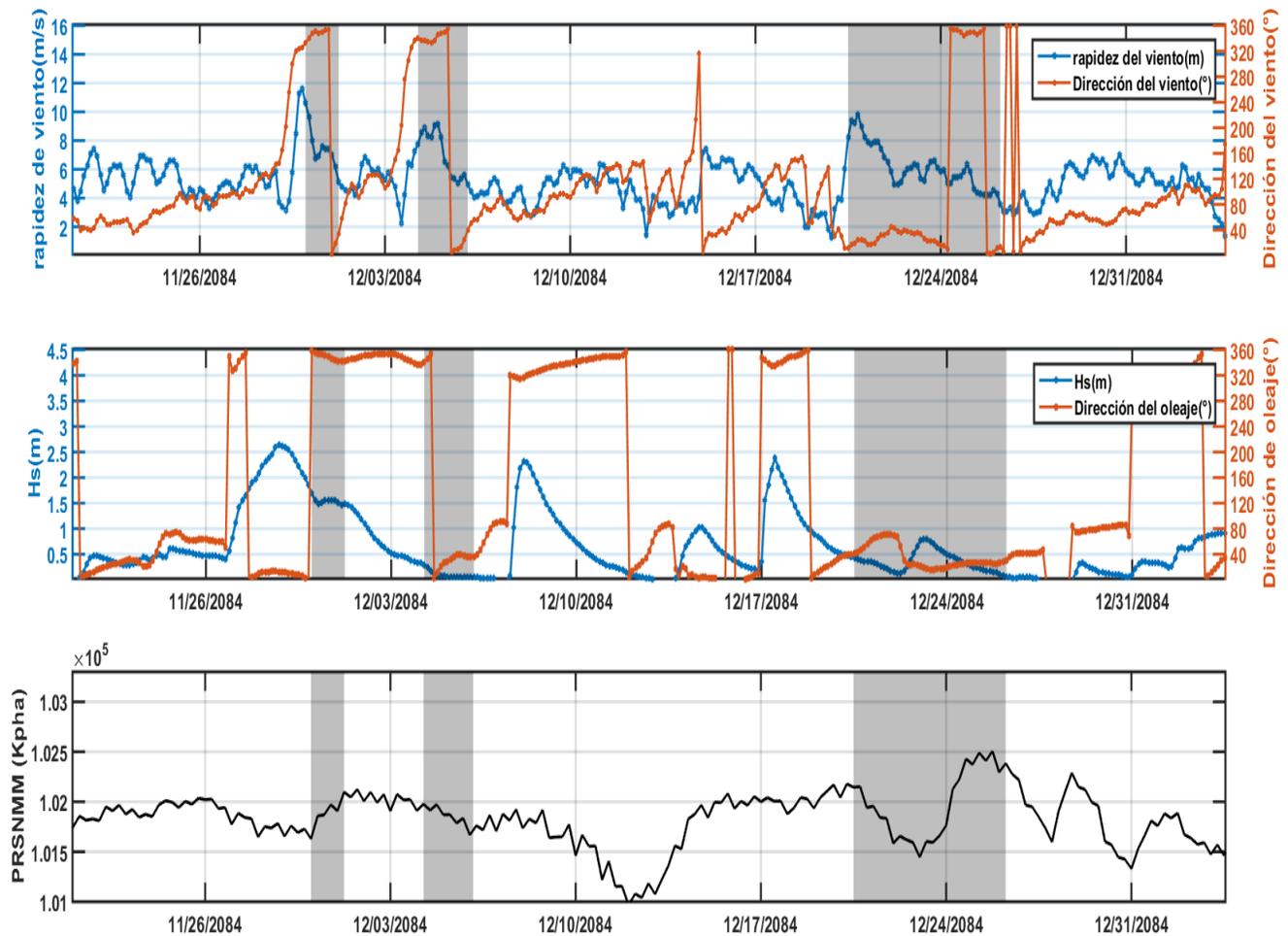


Figura 20.- Serie de tiempo para clasificación de *Nortes* para final de siglo.

El clima presente caracterizado con el CFSR muestra una mayor cantidad de eventos *Norte* (20.76 eventos/año) que el modelo CNRM (13.60 eventos/año), sugiriendo una subestimación a partir del modelo CNRM. Reding (1992) encuentra un promedio de 16.1 eventos/año, tomando en cuenta eventos entre 1979 y 1990. Las diferencias respecto a Reding (1992) al tomar el mismo lapso de tiempo son de 6 eventos/año, para el CFSR (21.98 eventos/año) y 2.5 eventos/año para el CNRM (13.63 eventos/año). Estas diferencias se atribuyen a que Reding (1992) considera temperatura en su método variando del método implementado en este trabajo. Lo anterior muestra una subestimación por parte del modelo CNRM ante los resultados del reanálisis CFSR y resultados de Reding.

Los resultados a futuro a partir del modelo CNRM mostraron un decremento en la cantidad de eventos promedio por año a lo largo de las distintas épocas. Para presente (1970-2005) se obtuvieron 15.93 eventos/año mientras que para mitad de siglo (2026-

2044) se obtuvieron 13.89 eventos/año. Estos 13.89 eventos/año disminuyeron para final de siglo a 11.89 eventos/año, concordando por lo obtenido por Appendini *et al.*, (2018) quien observa una disminución en eventos norte para la costa de Yucatán.

La duración promedio para el clima presente de oleaje con base al modelo CNRM mostró valores muy cercanos al CFSR, donde el CNRM obtuvo un promedio de duración de 31.27 horas por evento, mientras que para el CFSR 33.26 horas por evento. Para mitad de siglo, el CNRM mantiene una duración similar al clima actual, pero para el fin de siglo se observa un aumento de casi 4 horas (de 33.19 hrs a 37.75 hrs). Lo anterior es muy cercano a resultados de Appendini *et al.*, (2018) quien menciona una duración de 36.9 horas para presente, 37.3 horas para mitad de siglo y 36 horas para final de siglo basado en el mismo modelo.

Tabla IV.- Cantidad de eventos Norte y duración promedio.

<i>Modelo</i>	<i>Periodo</i>	<i>Cantidad total de eventos</i>	<i>Promedio de eventos anuales</i>	<i>Duración promedio de eventos (hrs)</i>
<i>CFSR</i>	1979-2005	519.00	20.76	31.27
<i>CNRM</i>	1979-2005	340.00	13.60	33.26
<i>CNRM</i>	1970-2005	478.00	15.93	33.08
	2026-2044	264.00	13.89	33.19
	2081-2100	226.00	11.89	37.75

10.4.1 Huracanes

De los análisis de correlación entre los ajustes y los datos del modelo GFDL y reanálisis NCEP se observó una menor correlación para el periodo pico que para altura significativa. A pesar de mostrar una menor correlación para el periodo pico los ajustes en su totalidad fueron aceptables, con correlaciones entre 0.955 a 0.986 y de 0.979 a 0.994 para periodo pico y altura de ola significativa, respectivamente.

Los resultados obtenidos a partir del modelo GFDL muestran algunas diferencias en periodo pico al compararse con los eventos derivados del reanálisis NCEP (Tabla VI). Los periodos obtenidos a partir del modelo GFDL, muestran ser 4 s más largos que el obtenido usando el reanálisis NCEP, mostrando una sobrestimación por parte del

modelo GFDL. Este caso es contrario para la altura significativa, ya que tanto el modelo GFDL como el reanálisis NCEP muestran alturas similares.

Los resultados a futuro obtenidos a partir del modelo GFDL mostraron diferencias en altura de ola y periodo pico (Tabla VI). En altura significativa se obtuvo un aumento de 0.5 m para todos los percentiles 90, 95 y 99. En el caso del periodo pico estos cambios dependieron del percentil, ya que para el percentil 90 se observó un aumento de 0.5 s, mientras que para el percentil 95 el cambio permaneció estable y en el percentil 99 disminuyó 0.7 s. Lo reportado difiere con los resultados obtenidos por Fan *et al.* (2013), donde bajo el escenario A1B denota un decremento del 20 % en la altura de ola. Esta diferencia se puede atribuir principalmente a la diferencia de escenarios implementados ya que Fan *et al.* (2013) utilizan el escenario A1B y en este trabajo se utiliza el escenario RCP 8.5. Además los resultados de Fan *et al.* (2013) provienen de 8 distintos modelos, mientras que en el presente trabajo proviene de uno solo, por lo cual los resultados obtenidos en el presente proyecto deben ser tomados con cautela.

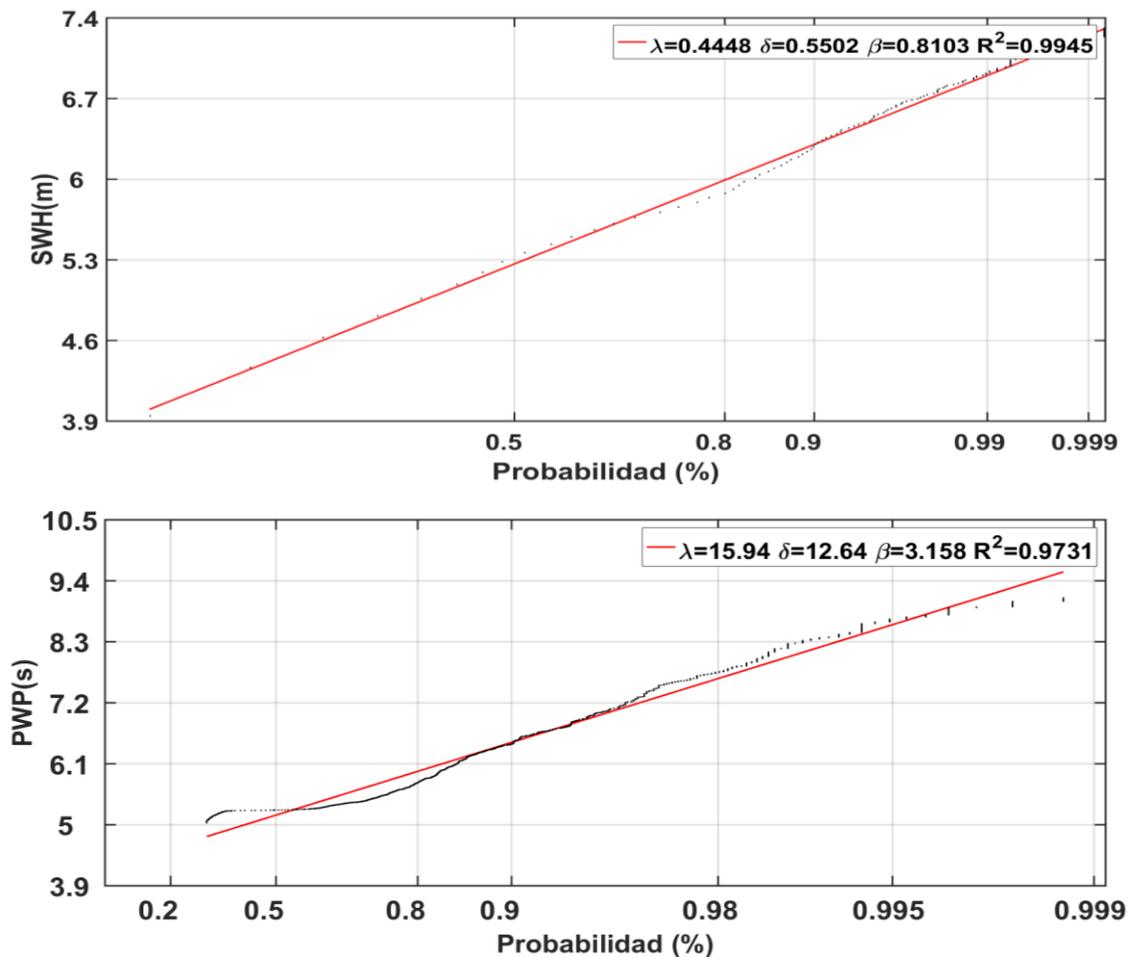


Figura 21.- Ajustes de Weibull para altura significativa (figura superior) y periodo pico (figura inferior) para NCEP para el clima presente.

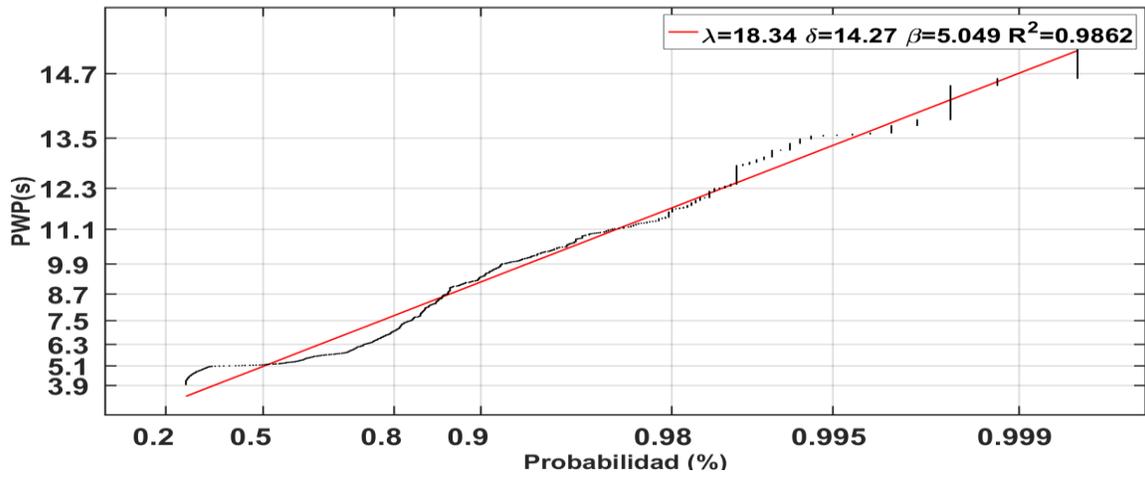
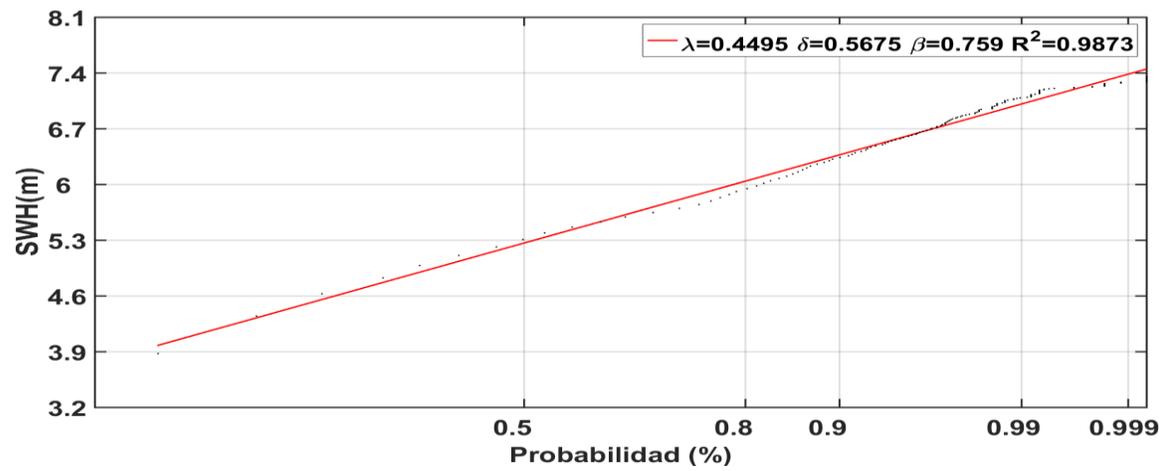


Figura 22.-Ajustes de Weibull para altura significativa (figura superior) y periodo pico (figura inferior) para GFDL para el clima presente.

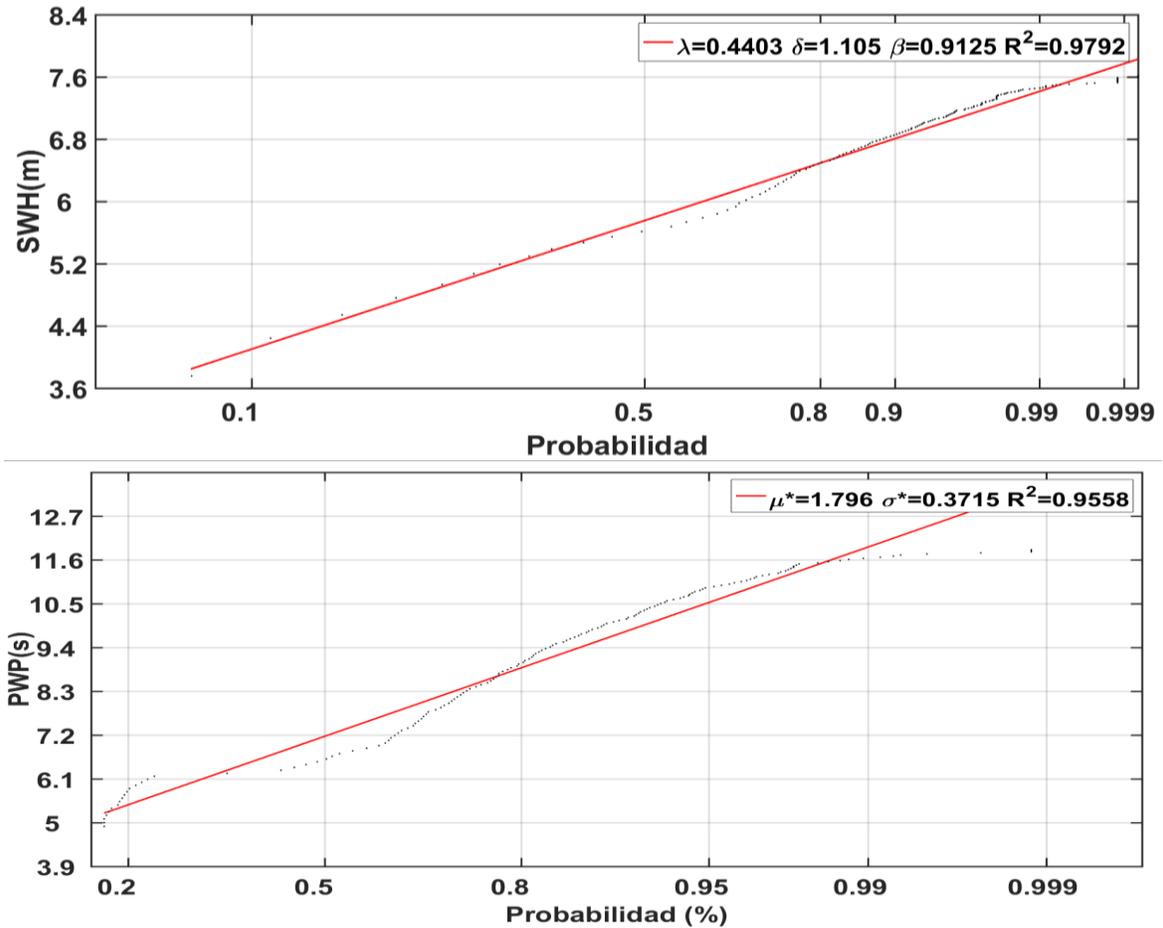


Figura 23.- Ajuste logarítmico normal para altura de ola (figura superior) y periodo pico por Weibull para GFDL (figura inferior) para el clima futuro.

Tabla VI.- Percentiles seleccionado para GFDL Y NCEP.

Modelo	Percentil	Presente		RCP 8.5	
		SWH(m)	PWP(s)	SWH(m)	PWP(s)
GFDL	90	6.3	9.1	6.8	9.7
	95	6.6	10.5	7.1	10.5
	99	6.9	12.5	7.4	11.8
NCEP	90	6.3	6.5	-	-
	95	6.6	7.1	-	-
	99	6.9	8.1	-	-

10.5 Calibración y validación del modelo de transporte litoral

La Tabla VIII muestra los resultados de transporte neto obtenidos a partir de cada una de las configuraciones propuestas (ver sección 6.4). La primera simulación consideró la misma configuración utilizada por Appendini *et al.* (2012), con una descripción espectral por Battjes y Janssen, además de un tamaño de grano de 0.35 mm, obteniendo un transporte neto de $-105,200 \text{ m}^3/\text{año}$. Es importante mencionar que Appendini *et al.* (2012) obtienen un transporte de $-35,000 \text{ m}^3/\text{año}$, sin embargo, en este estudio se toman en cuenta 30 años y no los 12 años de los autores haciendo cambiar las condiciones y por lo tanto lo hace el transporte obtenido.

La segunda configuración propuesta tomo en cuenta una descripción por Rayleigh y sedimento uniforme, obteniendo un transporte neto de $-25,530 \text{ m}^3/\text{año}$. Debido a que es difícil encontrar una playa con sedimento uniforme las propiedades del sedimento fueron cambiadas para tener sedimento no uniforme, obteniendo un transporte neto longitudinal de $-29,460 \text{ m}^3/\text{año}$ en la tercera simulación. La cuarta simulación tomo en cuenta un orden de solución mayor provocando un aumento en el transporte longitudinal ($38,360 \text{ m}^3/\text{año}$), mientras que al no tomar en cuenta rizaduras el transporte fue menor ($25,500 \text{ m}^3/\text{año}$). De las configuraciones mencionadas anteriormente se utilizó la tercera ya que se ajusta a lo reportado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (Tabla VIII) y los valores establecidos por Appendini *et al.* (2012). Las diferencias entre el trabajo de Appendini *et al.* (2012) y este trabajo se atribuyen que Appendini *et al.* (2012) utiliza una descripción espectral por Battjes y Janssen mientras que este estudio utilizo una distribución Rayleigh. Además de esto hay que añadir que la cantidad de años utilizados por Appendini *et al.* (2012) son solo 12 años, mientras que en el presente estudio se utilizan 35 años de datos. Cabe mencionar que el usar 35 años de datos hace más confiable los resultados ya que en este tipo de estudios se recomienda utilizar al menos 30 años de datos (Arguez y Vose, 2011).

Al comparar los resultados obtenidos con datos de oleaje del re análisis CFSR (Tabla VIII) y el modelo CNRM se obtuvo una diferencia de aproximadamente de $10,000 \text{ m}^3/\text{año}$ tomando en cuenta el mismo lapso de tiempo.

Tabla VIII.- Configuraciones propuestas.

<i>Sim.</i>	<i>Rugosidad (m)</i>	<i>Spect.</i>	<i>D50 (mm)</i>	<i>Propiedades del sedimento</i>	<i>Dens. (gr/cm³)</i>	<i>Coef. de grad.</i>	<i>Temp. de agua</i>	<i>Vel. de caída (m/s)</i>	<i>Orden de solución -stokes</i>	<i>Rizadura</i>	<i>Transporte neto anual (m³)</i>
1	0.03	Battjes and Janssen	0.35	Uniforme	2.58	-	-	0.06	1	Si	-105,000
2	0.03	Rayleigh	0.35	Uniforme	2.58	-	-	0.06	1	Si	-25,500
3	0.03	Rayleigh	0.35	Gradual	2.58	0.36	25		1	Si	-29,500
4	0.03	Rayleigh	0.35	Uniforme	2.58	-	-	0.06	5	Si	-38,400
5	0.03	Rayleigh	0.35	Uniforme	2.58	-	-	0.06	1	No	-25,500

Tabla VIII.- Comparación de transporte neto anual por medio de CFSR y CNRM.

<i>Modelo</i>	<i>Lapso (años)</i>	<i>Transporte neto anual (m³/año)</i>
<i>CFSR</i>	1980-2005	-41,730.000
<i>CNRM</i>	1980-2005	-31,380.000
<i>CNRM</i>	1970-2005	-29,460.000
<i>Secretaria de Comunicaciones y Transportes</i>	2012	-30,000.000

10.6 Análisis de sensibilidad

10.6.1 Selección del Perfil de playa

Los resultados de transporte neto anual a partir de los perfiles de invierno y verano mostraron variaciones. El promedio del transporte neto anual para verano (Figura 24) resultó ser menor que el obtenido para los perfiles de invierno (Figura 24 y tabla IX), sin embargo esta variación fue menor a los 2,000 m³/año. Las mayores diferencias obtenidas fueron respecto a los perfiles de invierno, como en el perfil San Crisanto, con -44,960 m³/año, seguido del perfil Dzilam oeste con -40,980 m³/año. A pesar de tener los mayores valores de transporte neto anual estos valores no sobrepasaron una diferencia de 10,000 m³/año respecto a si se tomaron en verano o invierno.

En general los perfiles de invierno evidenciaron un mayor transporte al ser comparados con los de verano (tabla X), lo cual se atribuye al cambio en la pendiente de la playa, siendo más abrupta en los perfiles de invierno (Figura 6- b).

Los valores de desviación estándar fueron valores entre -1,322 m³/año y -2,047 m³/año para las temporadas de verano e invierno respectivamente y una varianza de 1,698 m³/año en general (Tabla XI). Lo anterior indica una mayor variación entre los perfiles de invierno a comparación de los de verano.

Debido a que en la campaña de invierno no se completaron todos los sitios de muestreo se seleccionó la campaña de verano para realizar el análisis estadístico. Los resultados estadísticos concordaron con los resultados de desviación estándar ya que al aplicar un análisis t-student se obtuvo una t de -1.33 y una t crítica de 2.07 mostrando que no hay diferencias significativas para los resultados obtenidos por los perfiles de verano.

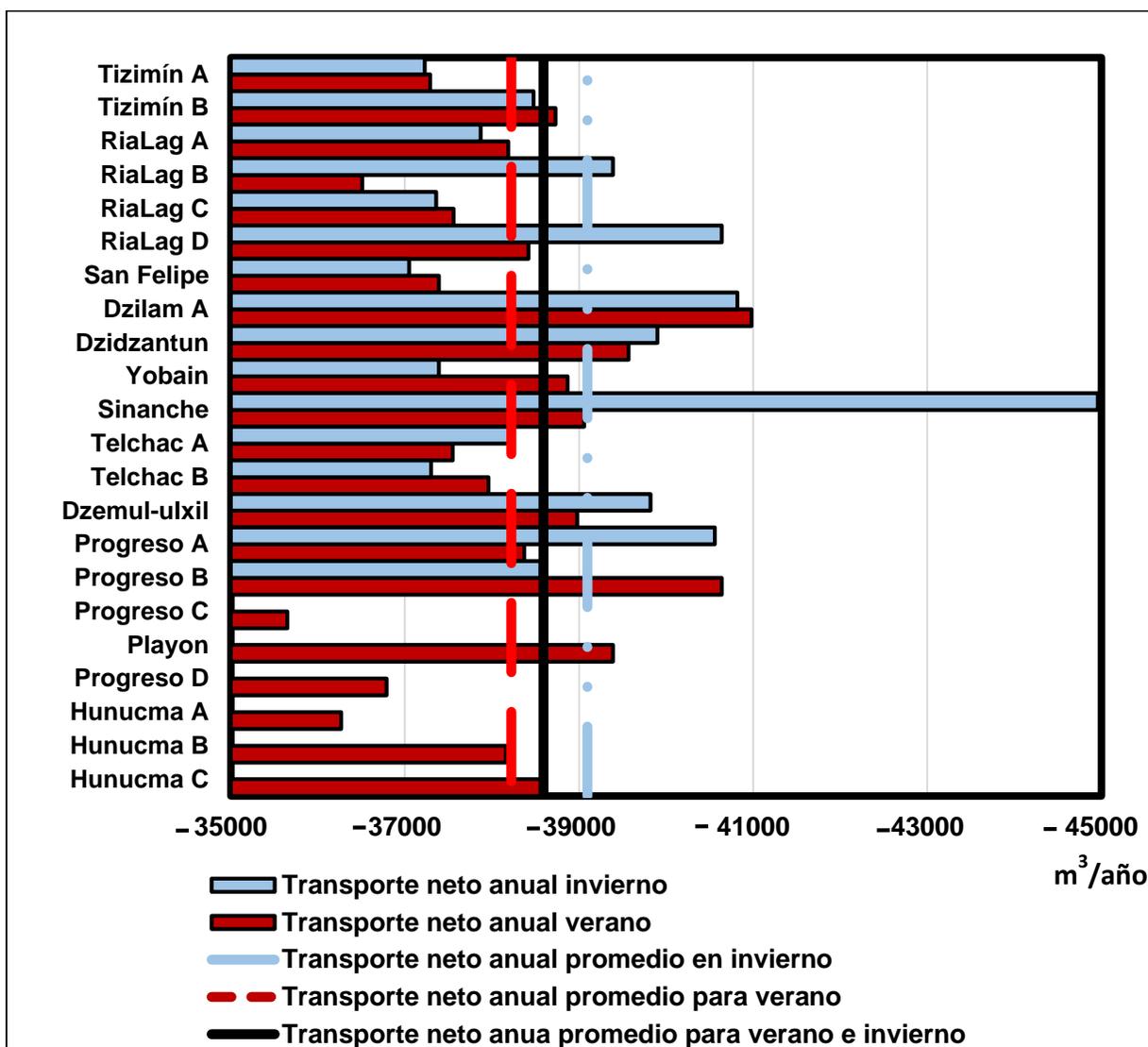


Figura 24.- Transporte neto anual para verano e invierno.

Tabla XI.- Valores máximos, mínimos y promedios para perfiles de invierno y verano.

	<i>Transporte neto anual verano (m³)</i>	<i>Transporte neto anual invierno (m³)</i>	<i>Transporte neto anual para ambas campañas (m³)</i>
<i>Máximo</i>	-40980	-44960	-44960
<i>Mínimo</i>	-35650	-2047.73	-35650
<i>Promedio</i>	-38222.73	-39096.88	-38590.79
<i>Desviación estándar</i>	-1322.02	-2047.73	-1698

Los resultados de correlación para verano mostraron que los perfiles propensos a ser seleccionados para representar la costa yucateca (Figura 25) fueron Chicxulub Centro (R=0.98891), Chicxulub oeste (R=0.99387), Telchac oeste (R=0.99237) y Telchac Puerto (R=0.99134). Finalmente se escogió el perfil de Chicxulub oeste como el perfil característico, al tener la mayor correlación entre todos.

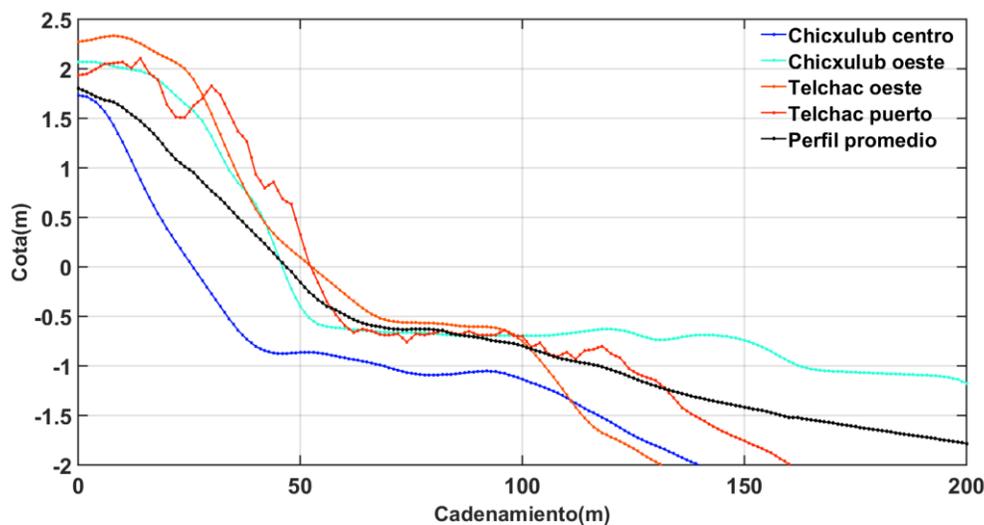


Figura 25.-Perfiles cercanos al perfil promedio en verano. El perfil promedio está delimitado por la línea negra.

10.6.2 Selección de tamaño de grano

La variación del transporte neto anual en función del tamaño de grano de las distintas localidades mostró poca variación. Los rangos de transporte neto obtenidos fueron entre los -29,400 m³/año y los -33,700 m³/año, dando un rango de 4,300 m³/año. Lo anterior fue remarcado por el análisis de Wilcoxon, donde estas variaciones mostraron un valor t de 52 y un valor crítico de 36. Así, las diferencias no fueron estadísticamente significativas y se pudo elegir el tamaño correspondiente a la moda los tamaños de grano muestreados, el cual fue 0.34 mm (Figura 26).

Los resultados de transporte neto anual obtenidos muestran una tendencia en disminuir el transporte sedimentario mientras el tamaño de grano aumenta hasta llegar a un tamaño de grano de 0.35 mm, concordando con O'Donoghue y Wright, (2004). Al seguir aumentando el tamaño de grano el transporte aumenta lo cual se explica con resultados de O'Donoghue y Wright, (2004) y Dohmen-Janssen, (1999) quienes mencionan como la velocidad orbital puede cambiar la relación (de proporcional a inversamente proporcional) entre tamaño de grano y la cantidad de sedimento transportado. Por lo tanto el tamaño de grano y su rugosidad pueden cambiar la velocidad orbital y también cambiar la cantidad de sedimento transportado. Lo anterior cual se cumple para el modelo ya que para un tamaño de grano de 0.22 mm con rugosidad de 0.026 mm (Figura 26-b) se obtiene un transporte de $-29,000 \text{ m}^3/\text{año}$ mientras que al cambiar a una rugosidad de 0.0165 mm se obtiene un transporte de $-33,700 \text{ m}^3/\text{año}$ (Figura 26-a). De igual manera la tendencia al mantener una rugosidad constante provoca incremento en el transporte sedimentario desde los 0.3 mm (Figura 26-b), mientras que al tomar en cuenta la rugosidad correspondiente para cada tamaño de grano se observa claramente este incremento de transporte sedimentario hasta un tamaño de 0.41 mm. De lo anterior el tamaño de grano y su rugosidad infieren un cambio sobre la hidrodinámica de fondo la cual puede modificar la tendencia (sea proporcional o inversamente proporcional) entre el transporte sedimentario y el tamaño de grano.

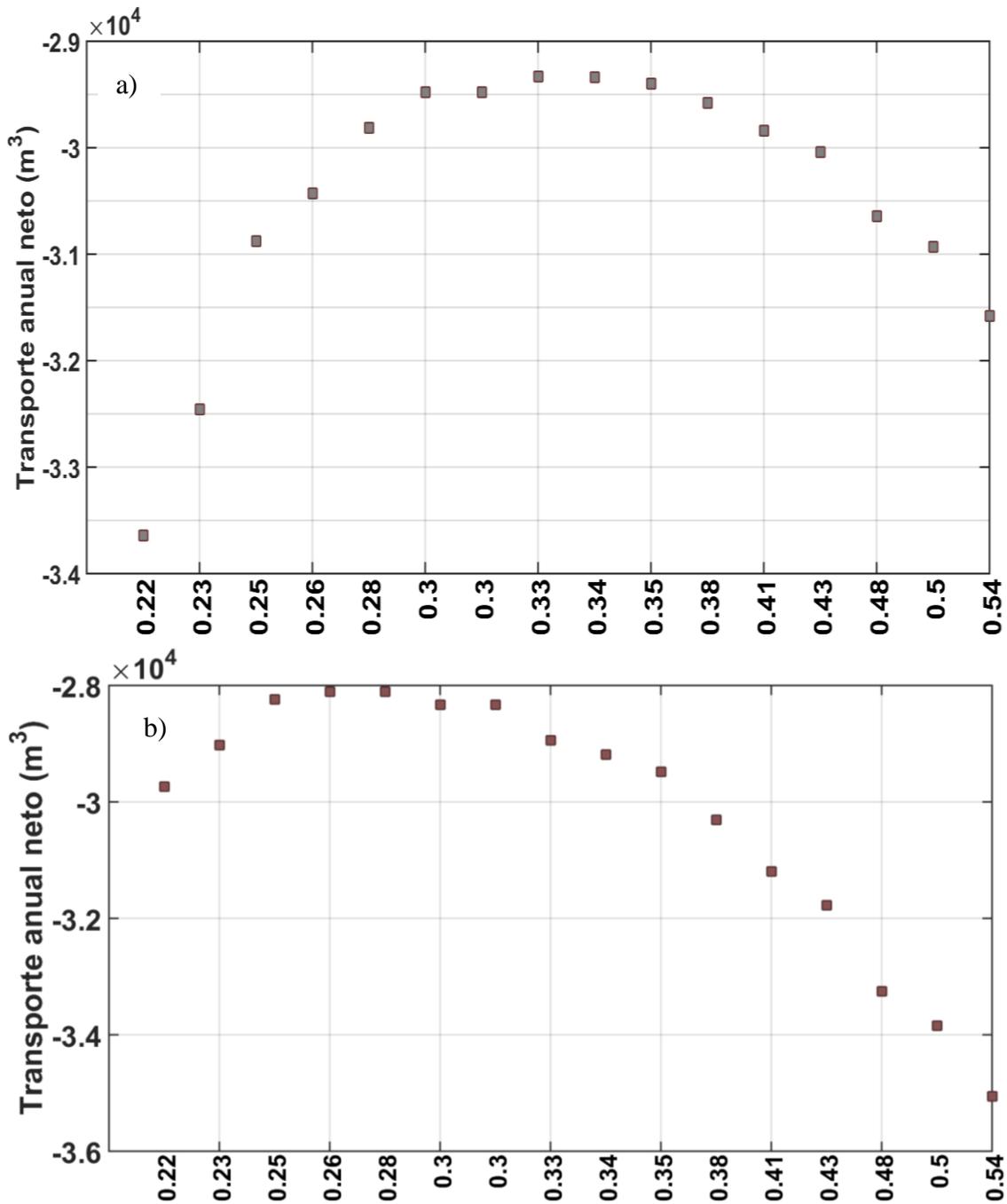


Figura 26.-Transporte anual neto en función de los tamaños de grano y rugosidad para el perfil seleccionado. El inciso a) muestra el transporte tomando en cuenta la rugosidad para cada tamaño de grano mientras que el b) lo muestra con una rugosidad constante de 0.026 mm.

10.6.3 Selección de nodo de oleaje

Los resultados del análisis de sensibilidad para los nodos de oleaje mostraron como el transporte litoral es modulado principalmente por la dirección del oleaje. El primer nodo mostro tener en su mayoría olas provenientes del norte y nor-nordeste resultando

en el menor transporte en dirección oeste con una tasa anual de $-17,000 \text{ m}^3/\text{año}$. Posteriormente en los nodos 2, 3 y 5 la dirección reinante del noreste para el oleaje resulto un mayor transporte litoral con rangos entre los $-41,000 \text{ m}^3/\text{año}$ y los $-34,000 \text{ m}^3/\text{año}$. Por último, los nodos 4 y 6 en adelante mostraron rangos entre los $-31,000 \text{ m}^3/\text{año}$ a $-28,000 \text{ m}^3/\text{año}$. El comportamiento de los nodos 4 y 6 en adelante se atribuye a que a partir del nodo 6 el oleaje en dirección este-sureste incrementa, esto en combinación con la orientación este-oeste de la costa provoca que las olas del este y sureste no aporten al transporte sedimentario, dando como resultado un comportamiento muy similar para el resto de los resultados de transporte sedimentario. Al no aportar al transporte de sedimento la diferencia se reduce y por lo tanto solo el oleaje que venga de una dirección entre 280° y 80° aporta cambios al transporte sedimentario. Sin embargo, estas variaciones mostraron no ser significativas para los resultados de transporte litoral obtenidos ya que el análisis Wilcoxon mostro un valor crítico de 26 y un valor t de 43. De lo anterior las variaciones no fueron consideradas significativas y se procedió a la selección del nodo de oleaje con base a la máxima correlación.

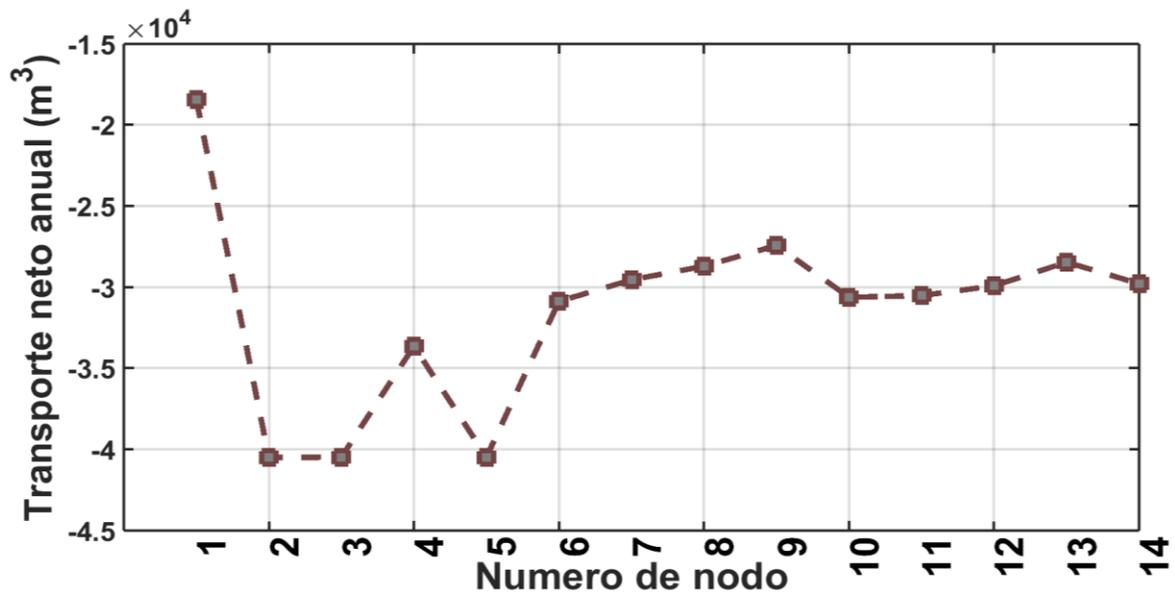


Figura 27.- Transporte neto en función de nodos propuestos.

Los resultados de correlación para cada uno de los nodos propuestos muestran como el nodo 7 obtuvo la mayor correlación. Para el clima presente y para los datos del re análisis los nodos 5 a 9 obtuvieron la mayor correlación acumulada (Tabla IXII), siendo mayor para el nodo 7 con un valor de 0.8734. De igual manera para los datos a futuro el nodo 7 tuvo los mayores valores de correlación con 0.8780, para mitad de siglo (2026-2044) y para final de siglo (2081-2099). Tomando en cuenta lo anterior el nodo 7 fue el utilizado para las simulaciones posteriores.

Tabla IXII.- Correlación acumulada para los nodos propuestos.

<i>Nodo</i>	CNRM 1970-2005	CNRM 2026-2044	CNRM 2081-2099	CFSR 1980-2015
	Correlación	Correlación	Correlación	Correlación
1	0.7631	0.7680	0.7680	0.7264
2	0.8033	0.8123	0.8123	0.7335
3	0.8278	0.8361	0.8361	0.7632
4	0.8458	0.8528	0.8528	0.7819
5	0.8626	0.8680	0.8680	0.8035
6	0.8707	0.8755	0.8756	0.8207
7	0.8734	0.8780	0.8780	0.8272
8	0.8727	0.8774	0.8774	0.8267
9	0.8683	0.8732	0.8732	0.8218
10	0.8513	0.8568	0.8568	0.7976
11	0.8413	0.8472	0.8471	0.7791
12	0.8301	0.8368	0.8368	0.7638
13	0.7853	0.7985	0.7985	0.7313
14	0.7666	0.7767	0.7767	0.6877

10.7 Comportamiento del transporte longitudinal con clima medio

La Figura 28 muestra que las principales diferencias entre las tasas de transporte neto del modelo CNRM y del reanálisis CFSR se obtienen al utilizar orientaciones del perfil de playa entre 310° y 70°. La diferencia al usar orientaciones entre 310° y 70° va de los 4,000 m³/año hasta los 20,000 m³/año. Estas diferencias en transporte implicaron diferencias al obtener una orientación de equilibrio (orientación un transporte neto de 0 m³/año) tanto para el modelo CNRM con 15°, como el reanálisis CFSR con 35°, obteniendo una diferencia de 20° en la orientación en equilibrio. Esta diferencia por parte del re análisis CFSR se atribuye a la dirección del oleaje del noreste tan marcada en el nodo 7, utilizado en este análisis. En el caso del modelo CNRM se tiene una mayor diversidad de direcciones de oleaje sin que se presente una dirección predominante, causando un menor transporte. Por lo tanto ambas bases de datos presentaron diferencias en transporte sedimentario para mismas orientaciones y diferencias al obtener la orientación de equilibrio, lo cual tiene implicaciones importantes para la implementación de medidas de manejo de sedimentos en la costa.

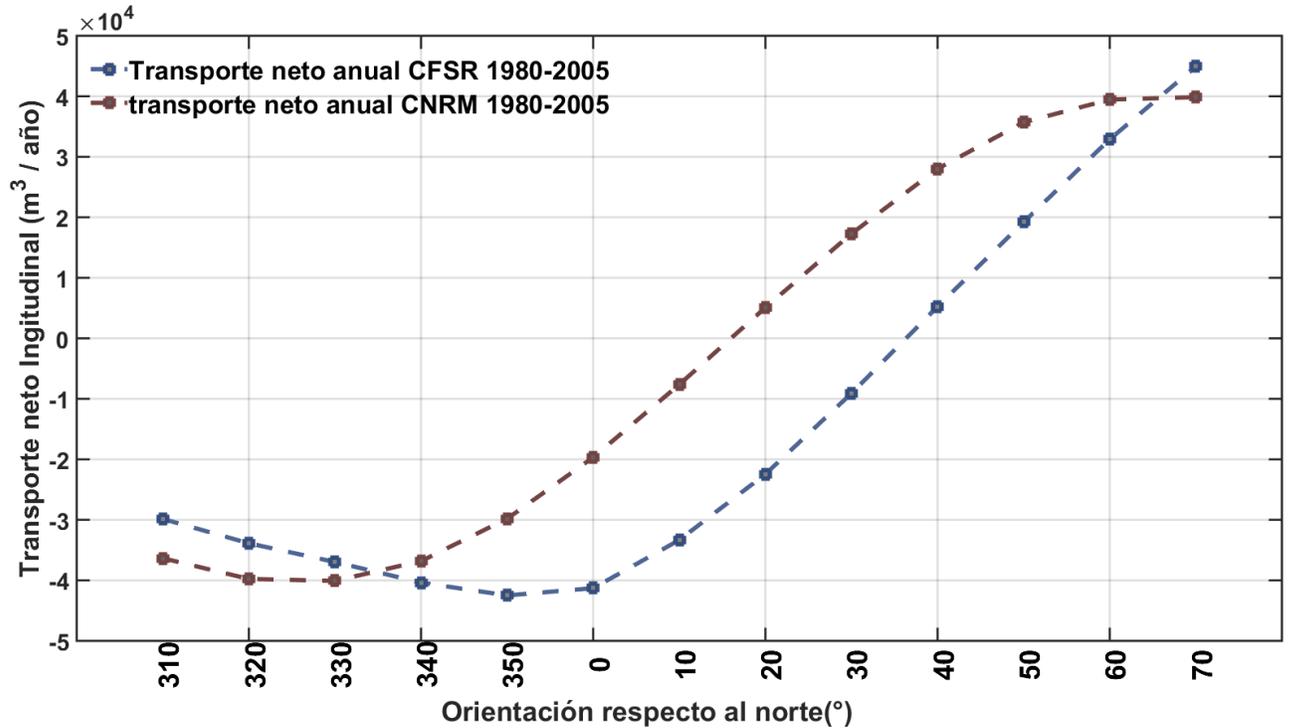


Figura 28.-Transporte neto anual en función de la orientación del perfil de playa.

Los resultados de transporte neto anual mostraron que para el clima presente (Figura 29-a) el transporte se caracteriza por una dirección hacia el oeste con valores entre los $-7,520 \text{ m}^3/\text{año}$ y $-38,900 \text{ m}^3/\text{año}$. Los resultados obtenidos difieren de lo reportado por Appendini *et al.* (2012), quienes obtienen tasas de transporte de $-70,000 \text{ m}^3/\text{año}$ para la localidad de Sisal, mientras que los obtenidos reportan una tasa de $-30,100 \text{ m}^3/\text{año}$. Estas diferencias se repiten para la zona de Dzilam en la cual se reporta una tasa de $-37,000 \text{ m}^3/\text{año}$ mientras en este trabajo se obtuvo una tasa de $-28,000 \text{ m}^3/\text{año}$. Estas diferencias se atribuyen a la configuración utilizada por Appendini *et al.* (2012), quienes utilizan una descripción espectral por Batjjes y Jansen además de utilizar, un perfil distinto al empleado para este trabajo. Adicionalmente, en este estudio se utilizaron 35 años de datos de oleaje en lugar de los 12 años de datos modelo Wavewatch III, siendo que Arguez y Vose (2011) muestran que cualquier trabajo debe contemplar mínimo 30 años de registros.

Para la zona este del área de estudio se obtuvieron resultados diferentes a los reportados por Batún (2018) quien estima una tasa de transporte de $-19,000 \text{ m}^3/\text{año}$ para la zona de San Felipe y $-27,000 \text{ m}^3/\text{año}$ para la zona de Ría Lagartos, mientras que en este trabajo se obtiene una tasa de $-33,500 \text{ m}^3/\text{año}$ para la zona de San Felipe y $-27,600$ para la zona de Ría lagartos. Las zonas de El Cuyo este y oeste tienen reportado un transporte de $-24,000 \text{ m}^3/\text{año}$ mientras que el presente trabajo reporta una tasa de -

7,520 m³/año. Las diferencias se atribuyen al uso de distintas orientaciones entre ambos trabajos

Comparando el transporte neto anual para el clima presente contra el de mitad de siglo (Figura 29 a, b) se pudo observar un ligero aumento de volumen transportado anualmente hacia el oeste, siendo del orden de -1,000 m³/año a 2,000 m³/año. Lo anterior se atribuye a los escasos cambios en el clima marítimo futuro respecto al presente (Figura 14, Figura 15 y Figura 16). De mitad de siglo a final de siglo los cambios en el transporte neto anual fueron mucho menores (cerca de 0 m³/año en varios casos), lo cual se debe a que no hay diferencias significativas en ambos periodos (Figura 15 y Figura 16 y Tabla II). Lo anterior ha sido ya reportado por Rojas (2017) quien bajo el escenario RCP 8.5 observa cambios en el transporte longitudinal a futuro de 0 a 80 m³/año.

Analizando los gradientes en el transporte neto, se obtuvieron los resultados de la Figura 29, que indican que la mayor parte de la zona de estudio es potencialmente erosiva (Punta Piedra, Sisal, Ciénega este y centro) (Figura 1) y solo una zona es potencialmente de equilibrio (El Cuyo oeste). Lo anterior difiere de lo reportado por Appendini *et al.* (2012), donde el autor reporta la zona de Punta Piedra como una zona en estado estable. Las diferencias entre el trabajo de Appendini *et al.* (2012) y este trabajo se atribuyen a la cantidad de orientaciones del perfil de playa tomadas en cuenta, ya que en el presente trabajo se toman 42 secciones mientras que para el estudio de Appendini *et al.* (2012) la costa fue dividida en 22 secciones. A futuro los cambios en la dirección del oleaje no se vieron fuertemente afectados por lo cual el estado de cada una de las zonas se mantuvo tal como los resultados para presente lo marcan.

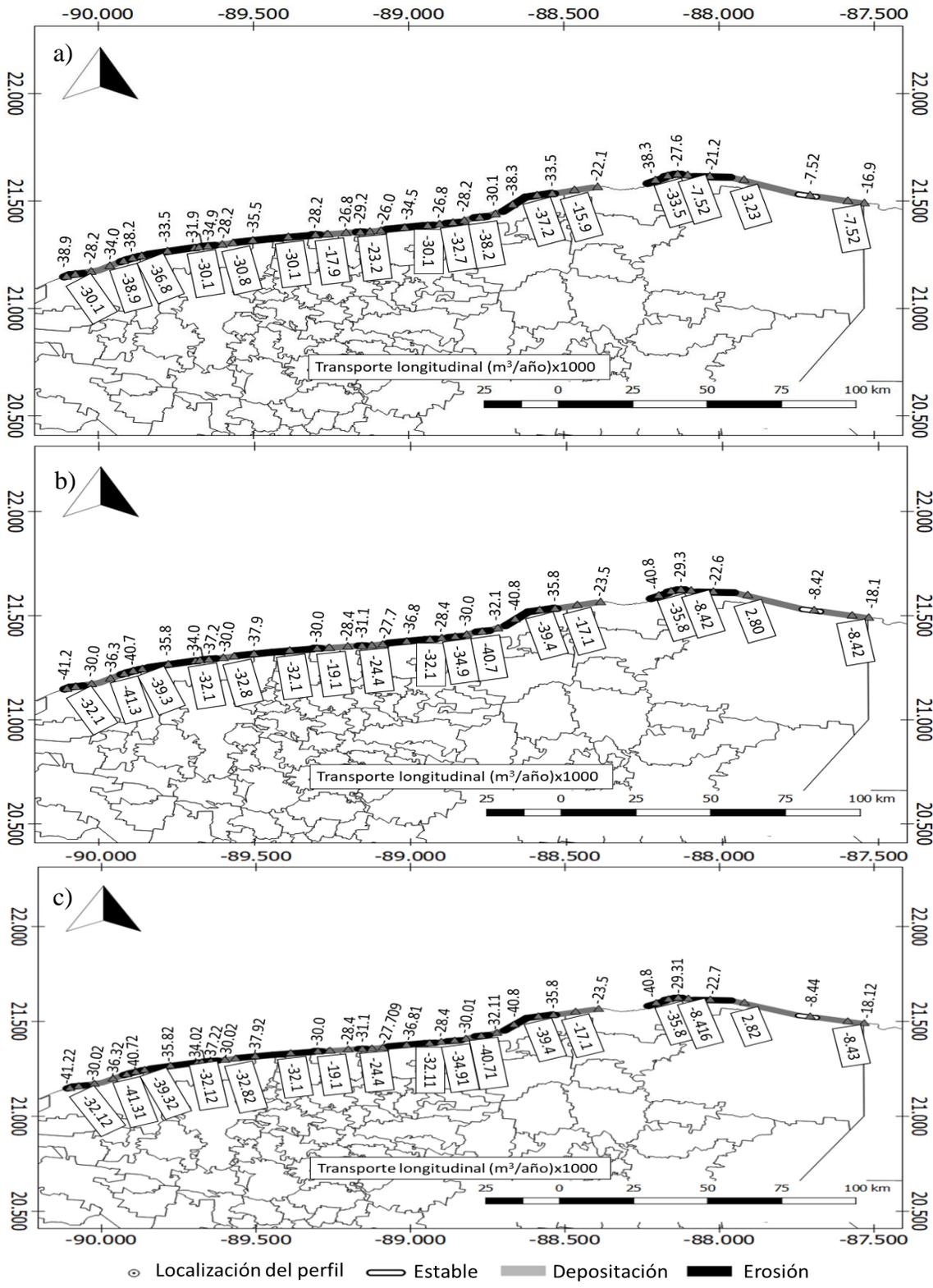


Figura 29.- Transporte neto obtenido a lo largo de la costa para presente (a), mitad de siglo (b) y futuro (c).

10.8 Comportamiento del transporte longitudinal con clima extremo

Los resultados de transporte generado por *Nortes* a partir del CFSR y CNRM reportaron magnitudes de transporte muy similares. Los resultados a partir del CFSR mostraron un transporte neto anual de $-872.10 \text{ m}^3/\text{año}$ mientras que el CNRM $-525.2 \text{ m}^3/\text{año}$ siendo muy similares. Esta similitud se atribuye a las similitudes de ambos modelos para el clima presente.

Comparando el clima actual contra los resultados a futuro usando el modelo CNRM, los resultados son muy similares. De presente a mitad de siglo el transporte en dirección oeste presenta diferencias mínimas, siendo de $-150 \text{ m}^3/\text{año}$, mientras que de mitad de siglo a final de siglo el transporte disminuye de $-574.70 \text{ m}^3/\text{año}$ a $-274.90 \text{ m}^3/\text{año}$. Lo anterior muestra como el transporte a final de siglo muestra un patrón similar al registrado en el presente.

Durante todos los periodos, el transporte neto mantiene una dirección hacia el oeste (Figura 32). En cuanto al transporte obtenido por cada evento de *Norte*, tenemos que el transporte neto es al oeste, sin embargo existen componentes de transporte hacia el este, como lo muestra la figura 30. Los resultados obtenidos en este estudio contradice lo obtenido por las mediciones que se han realizado en el LIPC, las cuales muestran que durante *Nortes* el transporte de sedimentos es hacia el este. Es importante mencionar que efectivamente durante *Nortes* hay una componente considerable de transporte al este (figura 31) por lo cual el transporte neto durante los eventos disminuye considerablemente y se acerca a cero transporte. Las diferencias con lo medido se pueden deber a efectos locales que no están reproducidos en el modelo utilizado en este trabajo, como puede ser el efecto de las barras sumergidas que se presentan en la zona. Sin embargo, no se considera que exista un error en el modelo, ya que si se observa la rosa de oleaje durante *Nortes* y se considera la orientación de la playa, la resultante de transporte debe ser hacia el oeste, confirmando así la importancia de los rasgos locales en la zona de estudio

Tabla X.-Transporte neto anual generado por *Nortes*

<i>Nodo</i>	<i>Modelo</i>	<i>Periodo</i>	<i>Tansporte neto anual(m³/año)</i>
7	<i>CFSR</i>	1979-2005	-872.10
7	<i>CNRM</i>	1979-2005	-525.2
7	<i>CNRM</i>	1970-2005	-494.70
7		2026-2044	-547.70
7		2081-2100	-274.90

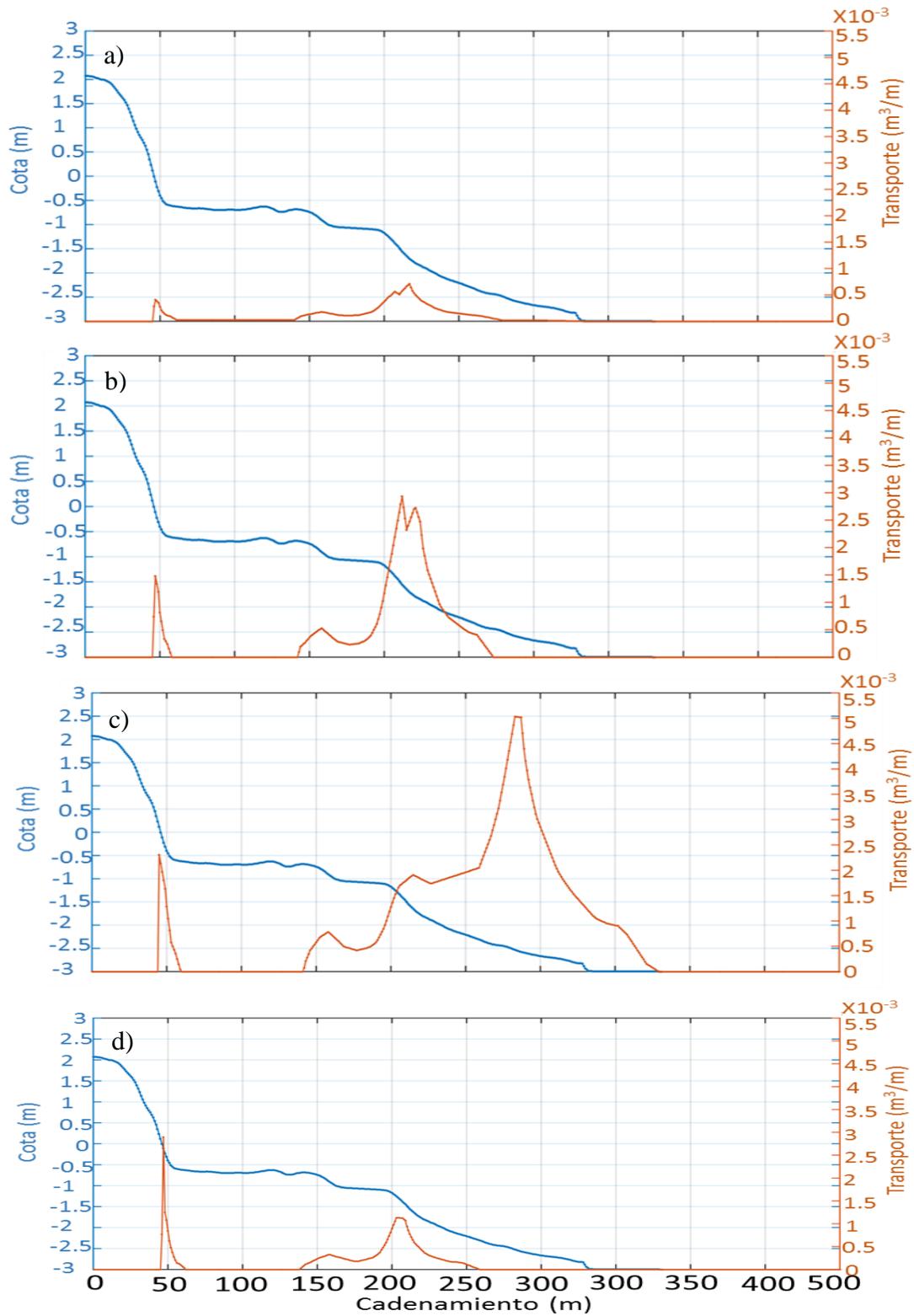


Figura 32.-Transporte positivo a lo largo del perfil seleccionado para el modelo CFSR (a), CNRM presente (b), CNRM mitad de siglo (c) CNRM final de siglo (d).

10.9 Comportamiento transversal del perfil de playa con clima extremo

Las Figura 33, Figura 34, 32, 33 y 34 muestran como los eventos de tormenta considerados en las estimaciones del cambio del perfil de playa para el clima actual y futuro provocan el retroceso de la playa (cadenamiento 35 a 50) y el avance de las barras sumergidas (cadenamiento 150 a 200). Este comportamiento se repitió para todos los percentiles (Figura 33), lo cual se debió a las mayores alturas de ola por parte del reanálisis, siguiendo el comportamiento establecido por van Rijn et al., (2003).

Las diferencias sobre el perfil de playa al recibir el evento de oleaje extremo para el clima presente y futuro fueron mínimas. Lo anterior se puede observar en la Figura 34 donde en la zona más cercana a la playa (cadenamiento 38 a 42) las diferencias en profundidad entre presente y futuro fueron del orden de 0.02 m a 0.05 m. En el caso de la última barra (Figura 342), las diferencias entre recibir el evento de oleaje extremo para condiciones en el clima presente fueron casi nulas para el percentil 90, más para el percentil 95 y 99, con diferencias del orden de 0.02 m a 0.05 m. Esta similitud entre presente y futuro se debe a que bajo el escenario RCP 8.5 la altura de ola aumenta en 0.5 m para todos los percentiles, mientras los pedidos picos del oleaje reportaron diferencias similares en magnitud. El periodo del oleaje por parte del percentil 90 aumento 0.6 s, mientras que para el percentil 95 se mantuvo constante y para el percentil 99 disminuyo 0.6 s. Estos cambios al parecer no fueron suficientes para generar un cambio mayor de 0.05 m al comparar presente contra futuro.

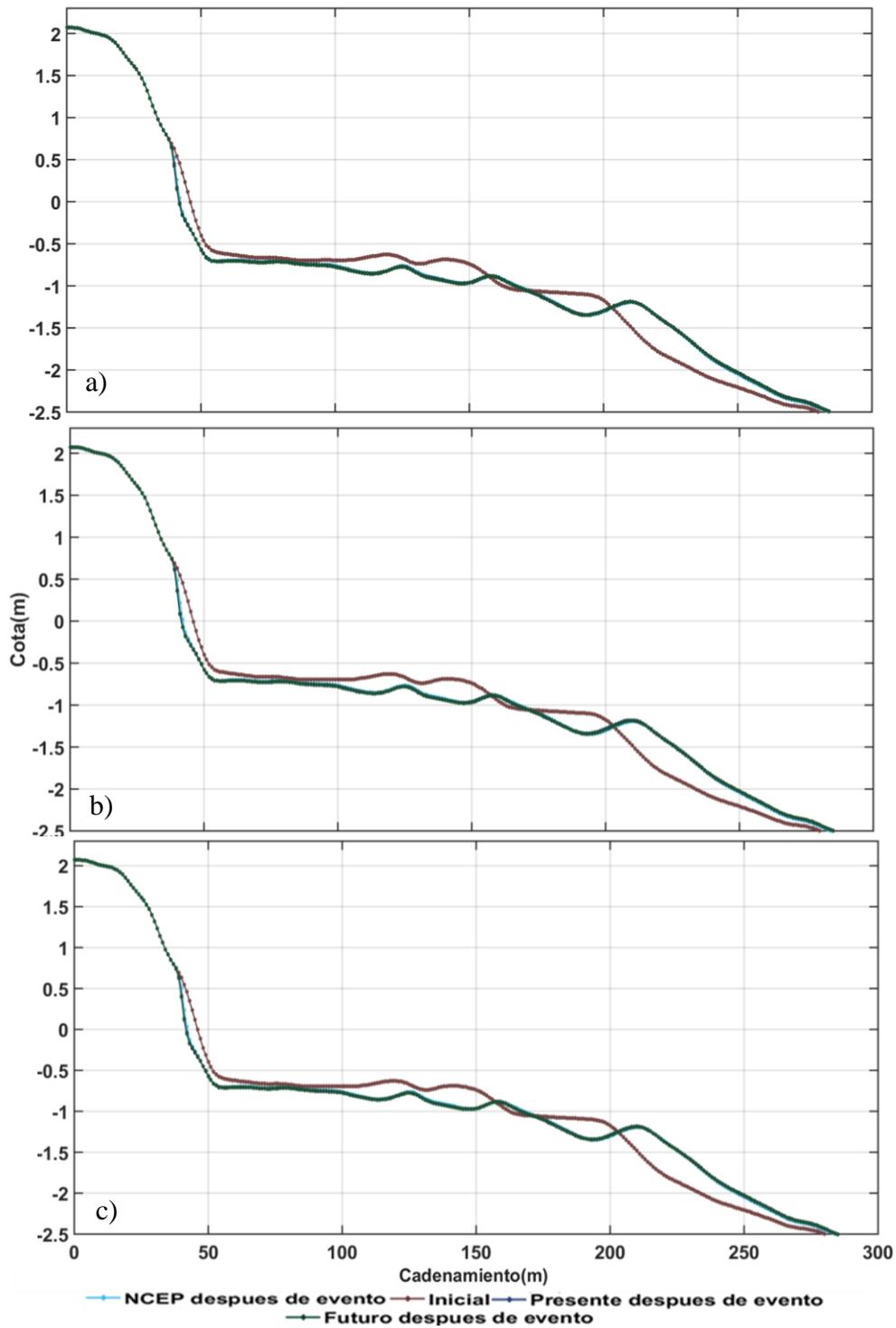


Figura 33.- Evolución del perfil después del evento, con percentil 90(a), 95(b) y 99(c) sobre zonas afectadas.

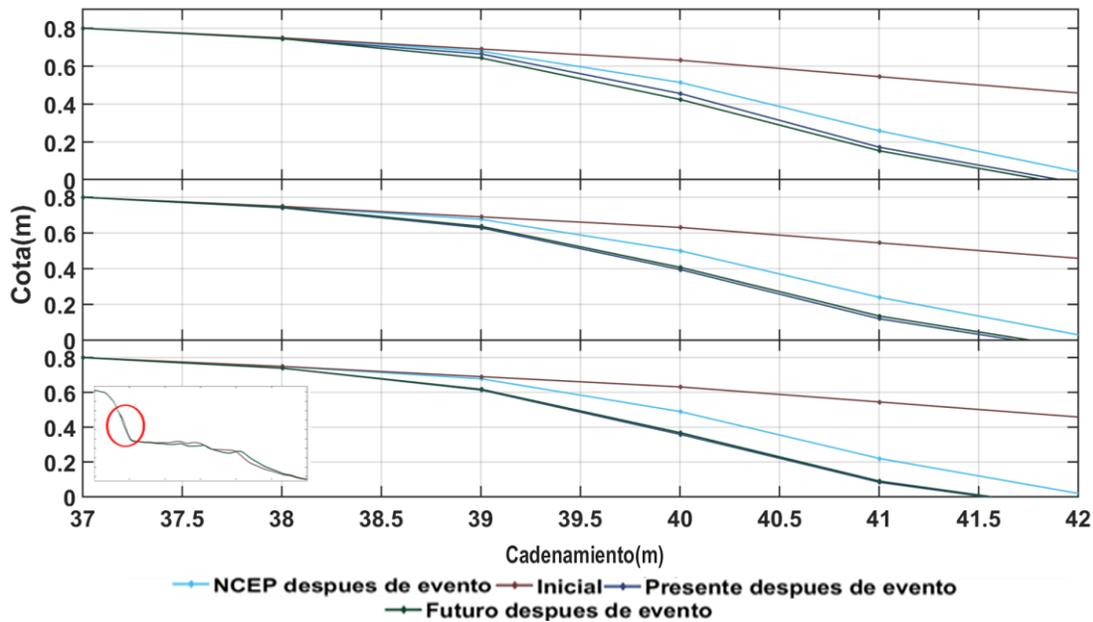


Figura 34.- Evolución del perfil después del evento, con percentil 90 (figura superior), 95 (figura intermedia) y 99 (figura inferior) sobre las zonas afectadas.

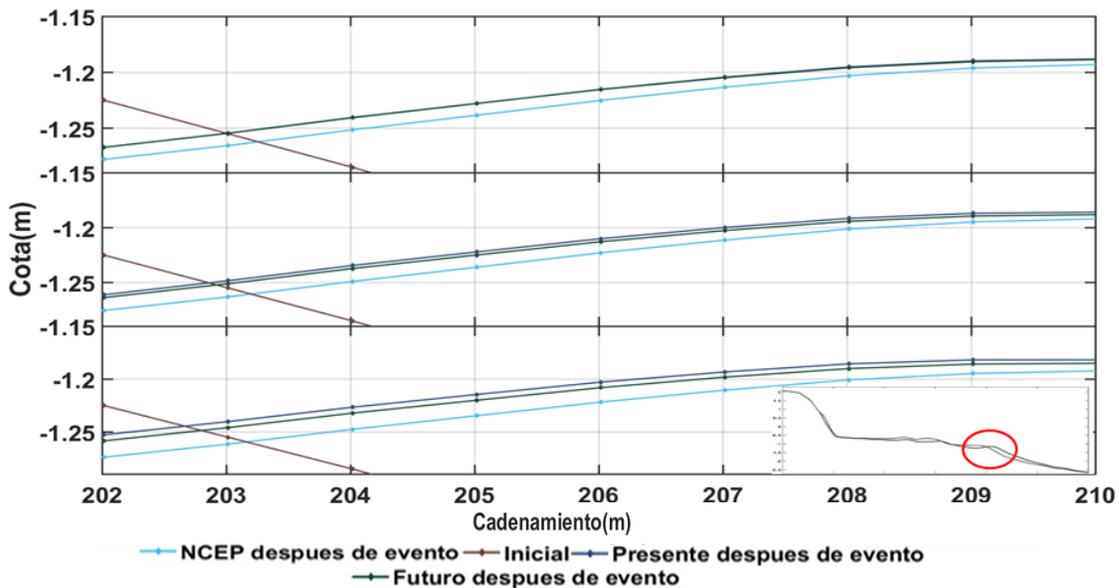


Figura 35.- Evolución del perfil después del evento, con percentil 90 (figura superior), 95 (figura intermedia) y 99 (figura inferior) sobre las zonas afectadas.

Para el caso considerando un aumento sobre el nivel medio del mar mostraron una mayor erosión sobre la parte de la cara de la playa (cadenamiento 0 a 50). Esta diferencia se puede observar en las figuras 31 y 32 donde los escenarios sin aumento en el nivel del mar muestran un proceso de erosión a una cota de 0.75 m mientras que con el aumento del nivel del mar el proceso erosivo empieza a los 0.95 m (figura 34). lo anterior marca

una diferencia de zonas erosionadas al incluir aumento del nivel del mar, sin embargo no hay grandes diferencias en las tasas de retroceso entre los periodos actual y futuro considerando aumento en nivel del mar.

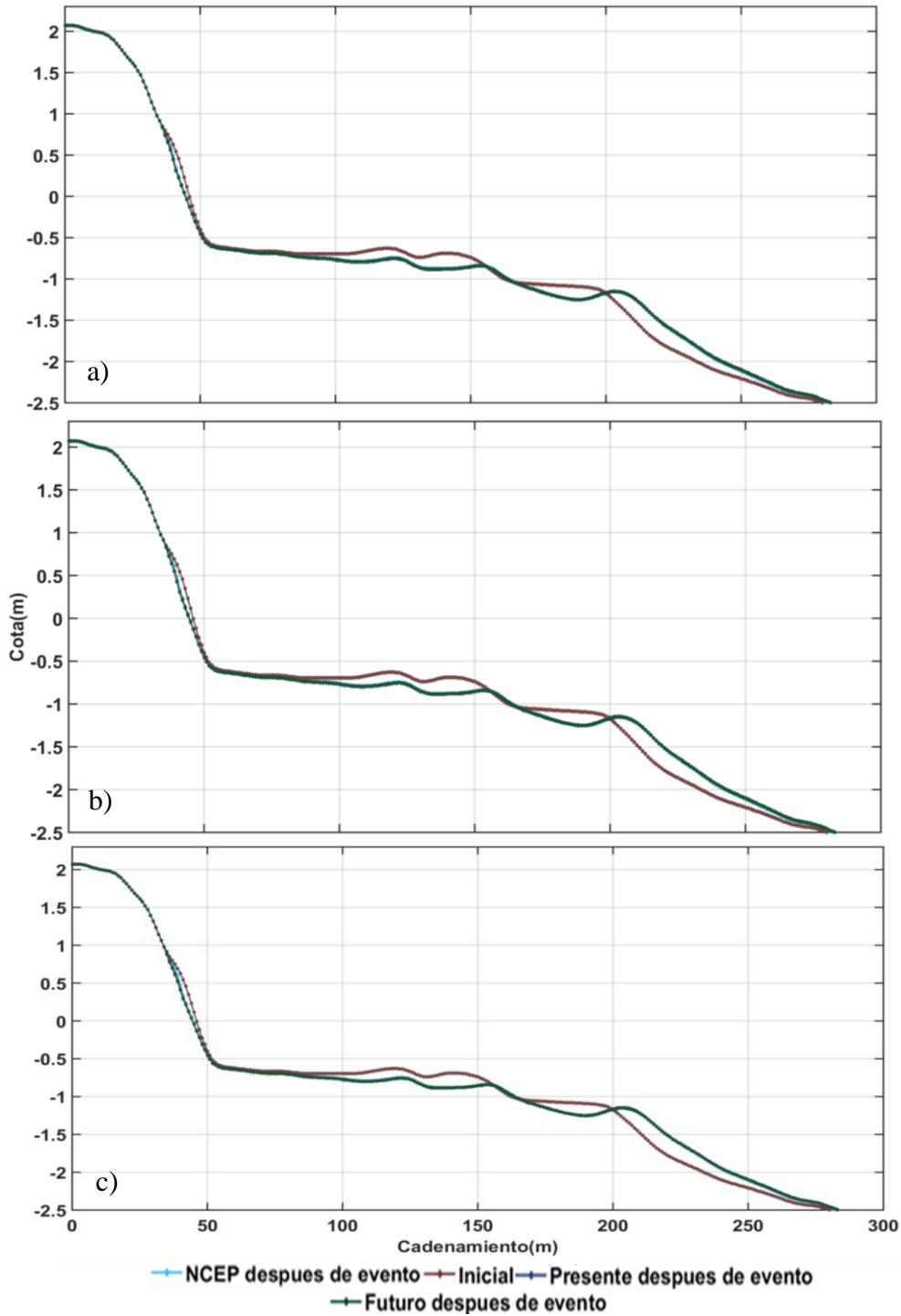


Figura 363.- Evolución del perfil después del evento, con percentil 90(a), 95(b) y 99(c) sobre las zonas afectadas asumiendo un cambio en el nivel del mar.

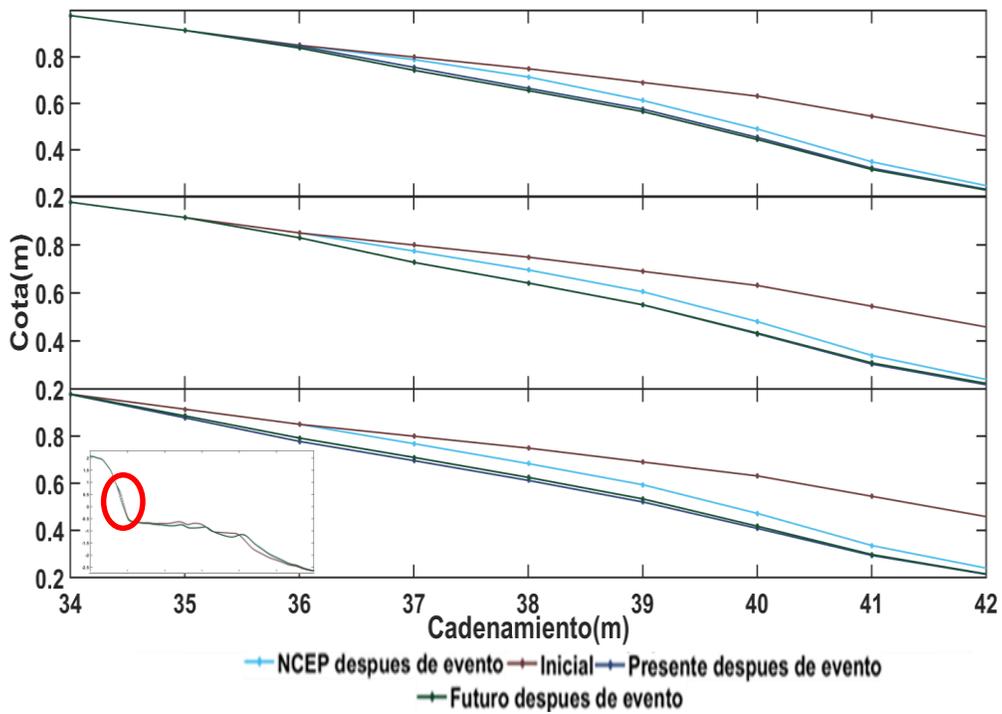


Figura 374.- Evolución del perfil después del evento, con percentil 90 (figura superior), 95 (figura intermedia) y 99 (figura inferior) sobre las zonas afectadas asumiendo un cambio en el nivel del mar.

9. Conclusiones

En este trabajo se estudió el efecto del cambio climático sobre la dinámica litoral en Yucatán, concentrándose en el efecto que tendrá el clima medio y extremal a futuro. Para lograr este objetivo fue necesario utilizar forzamientos y receptores para el modelo de transporte sedimentario.

El receptor principal es el perfil de playa el cual modula la cantidad de transporte sedimentario según su forma. Los resultados mostraron que durante verano los perfiles presentan una pendiente más suave que en invierno, así como una playa de mayor anchura. Otro receptor es el sedimento, el cual se clasificó como arenas medias en su mayoría. En el caso de los forzantes solo se consideró fue el oleaje dividido en clima medio y extremal para presente y futuro en ambos casos. Para el clima medio el oleaje mostró tener características muy similares a presente y futuro a lo largo de la costa. En cuanto al clima extremal este se conformó por *Nortes* y huracanes. Los eventos de *Norte* mostraron un decremento en cantidad y un aumento en su duración a futuro, mientras que en el caso de los datos de oleaje por huracanes estos mostraron un aumento de 0.5 m a futuro.

Al analizar el efecto de los forzantes y receptores sobre el transporte sedimentario se pudo observar que las variaciones fueron no significativas, por lo que fue posible caracterizar el transporte sedimentario a presente y futuro utilizando un solo perfil un solo dato de tamaño de grano y un solo nodo de oleaje. Los resultados de transporte sedimentario mostraron ser en dirección oeste y al tomar en cuenta sus gradientes estos mostraron un potencial estado erosivo en la mayoría de la costa yucateca. La cantidad de sedimento transportado anualmente se mantuvo muy similar a futuro mientras que el estado para cada una de las zonas se mantuvo constante para la costa de Yucatán.

En el caso del transporte sedimentario por clima extremal los *Nortes* se caracterizaron por generar un transporte litoral en dirección oeste, manteniéndose similar en el clima futuro. Para el caso de los huracanes, donde estos generaron un retroceso de las barras sumergidas tanto para el clima presente y futuro, sin embargo, ambos casos mostraron un comportamiento muy similar. Lo anterior muestra como el efecto del cambio climático tendrá efectos mínimos en la costa de Yucatán.

10. Bibliografía

Alvarez Enrique, Esteban Luis, Mendoza Edgar Cuando la restauración de playas depende de dejar la naturaleza en paz. Axis Ingeniería. <http://axisima.com/cuando-la-restauracion-de-playas-depende-de-dejar-la-naturaleza-en-paz-caso-san-bruno-yucatan-mexico/>

Angel, M., & Rangel, T. (2016). Impacto de Tormentas en la Zona Costera del Estado de Yucatán QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE : A : (January). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2563.5925>

Appendini, C. M., Hernández-Lasheras, J., Meza-Padilla, R., & Kurczyn, J. A. (2018). Effect of climate change on wind waves generated by anticyclonic cold front intrusions in the Gulf of Mexico. *Climate Dynamics*, 51(9–10), 3747–3763. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4108-4>

Appendini, C. M., Pedrozo-Acuña, A., Meza-Padilla, R., Torres-Freyermuth, A., Cerezo-Mota, R., López-González, J., & Ruiz-Salcines, P. (2017). On the Role of Climate Change on Wind Waves Generated by Tropical Cyclones in the Gulf of Mexico. In *Coastal Engineering Journal* (Vol. 59). <https://doi.org/10.1142/S0578563417400010>

Appendini, C. M., Salles, P., Mendoza, E. T., López, J., & Torres-Freyermuth, A. (2012a). Longshore Sediment Transport on the Northern Coast of the Yucatan Peninsula. *Journal of Coastal Research*, 285(6), 1404–1417. <https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-11-00162.1>

Appendini, C. M., Salles, P., Mendoza, E. T., López, J., & Torres-Freyermuth, A. (2012b). Longshore Sediment Transport on the Northern Coast of the Yucatan Peninsula. *Journal of Coastal Research*, 285, 1404–1417. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00162.1>

Appendini, C. M., Torres-Freyermuth, A., Salles, P., López-González, J., & Mendoza, E. T. (2014). Wave climate and trends for the Gulf of Mexico: A 30-yr wave hindcast. *Journal of Climate*, 27(4), 1619–1632. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00206.1>

Arguez, A., & Vose, R. S. (2011). The definition of the standard WMO climate normal: The key to deriving alternative climate normals. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(6), 699–704. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS2955.1>

Arora, V. K., Boer, G. J., Friedlingstein, P., Eby, M., Jones, C. D., Christian, J. R., ... Wu, T. (2013). Carbon-concentration and carbon-climate feedbacks in CMIP5 Earth

system models. *Journal of Climate*, 130208091306008. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00494.1>

BATÚN, I. A. H. (2018). INFLUENCIA DE NORTES EN LA DINÁMICA LITORAL DE LAS COLORADAS, YUCATÁN.

Chawla, A., Diaz, D., Tolman, H. (2013) Validation of a thirty year wave hindcast using the Climate Forecast System Reanalysis winds. *Ocean Modelling*.

Christian M. Appendini Albrechtsen. (2018). Extreme waves and climate change in the Gulf of México.

Colle, B. A., & Mass, C. F. (1995). The Structure and Evolution of Cold Surges East of the Rocky Mountains. *Monthly Weather Review*, Vol. 123, pp. 2577–2610. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1995\)123<2577:tsaeoc>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1995)123<2577:tsaeoc>2.0.co;2)

Cox, a T., Cardone, V. J., & Swail, V. R. (2011). On the use of the climate forecast system reanalysis wind forcing in ocean response modeling. 12th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting & 3rd Coastal Hazards Symposium, 20, Paper G3.

Dastgheib, A., Reyns, J., Thammasittirong, S., Weesakul, S., Thatcher, M., & Ranasinghe, R. (2016). Variations in the Wave Climate and Sediment Transport Due to Climate Change along the Coast of Vietnam. *Journal of Marine Science and Engineering*, 4(4), 86. <https://doi.org/10.3390/jmse4040086>

Dohmen-Janssen, C. M. (1999). Grain size influence on sediment transport in oscillatory sheet flow: Phase lags and mobile-bed effects. *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering*, 99(4), 1–246.

Fernández, R. D. C. (2012). Estudio Integral de la Hidrodinámica y Transporte de Sedimentos en Chelem, Yucatán (Tesis de Maestría). 96.

Figuroa-Espinoza, B., Salles, P., & Zavala-Hidalgo, J. (2014). On the wind power potential in the northwest of the Yucatan Peninsula in Mexico. *Atmosfera*, 27(1), 77–89. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(14\)71102-6](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(14)71102-6)

Friedlingstein, P., & Prentice, I. C. (2010). Carbon-climate feedbacks: A review of model and observation based estimates. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2(4), 251–257. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2010.06.002>

García De Fuentes, A., Koh, M. X., Ávila, J. I. E., Gil, A. M., Dolores, M., Montejano, C., ... México, M. (2011). La costa de Yucatán en la perspectiva del desarrollo turístico

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Retrieved from www.conabio.gob.mx

Gold-bouchot, G. (2016). Variabilidad de los vientos en la Península de Yucatán : Contribuciones relativas de patrones sinópticos y locales (brisas marinas). (October).

Gulev, S. K., & Grigorieva, V. (2004). Last century changes in ocean wind wave height from global visual wave data. *Geophysical Research Letters*, 31(24), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2004GL021040> *Journal of Climate*, 26(21), 8269–8288. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00658.1>

Krasnopolsky, V. M. (1995). for retrieving surface wind speeds from the special sensor microwave imager Estimating Surface Wind Speeds From the. *Journal of Geophysical Research*, 100(95), 33–45.

Liu, Z. (2001). Sediment Trasnsport. Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning Instituttet for Vand, Jord og Miljøteknik. Aalborg Universitet.

López-Méndez, J. V. (2008). Análisis del evento meterológico del 2007 relacionado con la inundación de Tabasco. *Monthly Weather Review*, 136, 1174–1200.

Manuel, K. E. E., Avela, S. A. I. R., Ivant, E. M. V, & Isi, C. A. R. (2006). a Statistical Deterministic Approach To Hurricane. *Society*, (March), 1–5. <https://doi.org/10.1175/BAMS-87-3-Emanuel>

Medellín, G., & Torres-Freyermuth, A. (2019). Morphodynamics along a micro-tidal sea breeze dominated beach in the vicinity of coastal structures. *Marine Geology*, 417(February), 106013. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.106013>

Medellín, G., Mariño-Tapia, I., & Euán-Ávila, J. (2015). The Influence of a Seawall on Postnourishment Evolution in a Sea-Breeze-Dominated Microtidal Beach. *Journal of Coastal Research*, 316(March 2016), 1449–1458. <https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-13-00194.1>

Medellín, G., Torres-Freyermuth, A., Tomasicchio, G. R., Francone, A., Tereszkievich, P. A., Lusito, L., ... López, J. (2018). Field and numerical study of resistance and resilience on a sea breeze dominated beach in Yucatan (Mexico). *Water (Switzerland)*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/w10121806>

Meyer-Arendt, K. J. (1993). Shoreline changes along the north Yucatan coast. *Coastal Zone: Proceedings of the Symposium on Coastal and Ocean Management*, 103–117.

Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0027309737&partnerID=40&md5=b57df6758502487c4b82361ae2e11b5d>

Müller, G. V., Repinaldo, C. R. R., & Araneo, D. C. (2018). Extreme cold events in South America analyzed from a GFDL model perspective: comparison between CMIP3 and CMIP5 climate scenarios. *Theoretical and Applied Climatology*, 134(1–2), 453–466. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2286-3>

O'Donoghue, T., & Wright, S. (2004). Flow tunnel measurements of velocities and sand flux in oscillatory sheet flow for well-sorted and graded sands. *Coastal Engineering*, 51(11–12), 1163–1184. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.08.001>

Ojeda, E., Appendini, C. M., & Mendoza, E. T. (2017). Storm-wave trends in Mexican waters of the Gulf of Mexico and Caribbean Sea. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(8), 1305–1317. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1305-2017>

Pang, X., Panee, J., Liu, X., Berry, M. J., Chang, S. L., & Chang, L. (2013). Regional variations of antioxidant capacity and oxidative stress responses in HIV-1 transgenic rats with and without methamphetamine administration. *Journal of Neuroimmune Pharmacology*, 8(3), 691–704. <https://doi.org/10.1007/s11481-013-9454-8>

Pérez, E. P., Magaña, V., Caetano, E., & Kusunoki, S. (2014). Cold surge activity over the Gulf of Mexico in a warmer climate. *Frontiers in Earth Science*, 2(August), 1–10. <https://doi.org/10.3389/feart.2014.00019>

Reding, P. J. (1992). The Central American cold surge: An observational analysis of the deep southward penetration of North American cold fronts. (December 1992), 177.

Reguero, B. G., Menéndez, M., Méndez, F. J., Mínguez, R., & Losada, I. J. (2012). A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. *Coastal Engineering*, 65, 38–55. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.03.003>

Rhein, M., & Rintoul, S. R. (2013). *Climate Change 2013 ipcc*.

Rodrigo, J., & Pérez, G. (2017). *Caracterización Multidisciplinaria De La Zona Costera De Sisal, Yucatán*.

Rodríguez.J.J, & Windevoxel.N.J. (1998). Análisis regional de la situación de la zona marina costera Centroamericana. 103. Retrieved from [http://www.infoiarna.org.gt/media/file/areas/marino/documentos/interna/\(3\) Análisis de la situación marina costera.pdf](http://www.infoiarna.org.gt/media/file/areas/marino/documentos/interna/(3) Análisis de la situación marina costera.pdf).

Rojas, R. (n.d.). Assessing the impact of climate change on longshore sediment transport along the central Dutch coast using statistical downscaling.

Ruiz-Salcines P., (2013): Campos de viento para hindcast de oleaje: reanálisis, paramétricos y fusión. M.E. thesis. Universidad de cantabria

Saha, S., et al. (2010) The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. Bulletin of American Meteorological Society, 91, 1015-1057.
<http://dx.doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>

Salinas, J. A. G. Colorado, M. E. Maya, and M. J. Montero, 2016: Global ensemble models for the tropical área. The international Conference on Regional Climate CORDEX 2016.

Sánchez-Rey, Wilmer (2017). EVALUACIÓN DEL PELIGRO A LA INUNDACIÓN INDUCIDA POR EVENTOS EXTREMOS DE TORMENTA EN EL NORTE DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN. TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE: DOCTOR EN INGENIERÍA.

Schultz, D. M., Bracken, W. E., & Bosart, L. F. (1998). Planetary- and synoptic-scale signatures associated with Central American cold surges. Monthly Weather Review, 126(1), 5–27. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<0005:PASSSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<0005:PASSSA>2.0.CO;2)

Schwinger, J., Tjiputra, J. F., Heinze, C., Bopp, L., Christian, J. R., Gehlen, M., ... Totterdell, I. (2014). Nonlinearity of ocean carbon cycle feedbacks in CMIP5 earth system models. Journal of Climate, 27(11), 3869–3888. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00452.1>

Secretaria de Fomento Turistico. (2019). TURÍSTICA EN YUCATÁN Enero 2019.

Semedo, A., Weisse, R., Behrens, A., Sterl, A., Bengtsson, L., & Günther, H. (2013). Projection of global wave climate change toward the end of the twenty-first century.

Stopa, J., Cheung, K. (2014) Intercomparison of Wind and Wave Data from the ECMWF Reanalysis Interim and the NCEP Climate Forecast System Reanalysis. Ocean Modelling.

Tohme, R. A., Holmberg, S. D., Bressmann, T., Lirio, D. R., Román, J. S., Solís, R. G., ... Héritier, F. (2007). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis Suranjana. *Japanese Accounting Today*, 2, 1–146. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>

Torres-Freyermuth, A., Medellín, G., Mendoza, E. T., Ojeda, E., & Salles, P. (2019). Morphodynamic response to low-crested detached breakwaters on a sea breeze-dominated coast. *Water (Switzerland)*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/w11040635>

Torres-Freyermuth, A., Puleo, J. A., DiCosmo, N., Allende-Arandía, M. E., Chardón-Maldonado, P., López, J., ... Candela, J. (2017). Nearshore circulation on a sea breeze dominated beach during intense wind events. *Continental Shelf Research*, 151(October), 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.10.008>

Uc-Sánchez, E., 2009. Efectos de los cambios de la playa, sobre los hábitats bentónicos en el puerto de Progreso, Yucatán. Conkal, Mexico: Instituto Tecnológico de Conkal, 72p.

De Almeida Afonso, P. Un, D. D. E., Bypass, S. D. E., En, D. E. A., Puerto, E. L., & Sisal, D. E. (2015).

van Rijn, L. C., Wasltra, D. J. R., Grasmeyer, B., Sutherland, J., Pan, S., & Sierra, J. P. (2003). The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. *Coastal Engineering*, 47(3), 295–327. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00120-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00120-5)

Zhang Z., Zhang W., Zhai J., Yan Chen Q. (2007) .Evaluation of Various Turbulence Models in Predicting Airflow and Turbulence in Enclosed Environments by CFD: Part 2—Comparison with Experimental Data from Literature.