

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

**ESTIMACIÓN DEL CAMPO DE OLEAJE EN LA BAHÍA
DE TODOS SANTOS MEDIANTE EL USO DE UN
MODELO DE PREDICCIÓN DE OLEAJE EN
AGUAS SOMERAS**

TESIS DE LICENCIATURA

Que para obtener el título de
O c e a n ó l o g o
presenta:

Diego Perelló Reina

Ensenada, Baja California, Mayo del 2002.

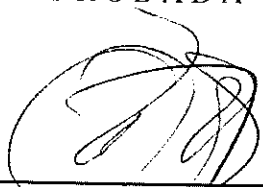
**Estimación del campo de oleaje en la Bahía de Todos
Santos con el uso de un modelo de predicción de
oleaje en aguas someras**

TESIS

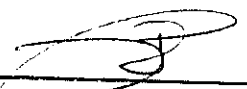
Que presenta:

Diego Perelló Reina

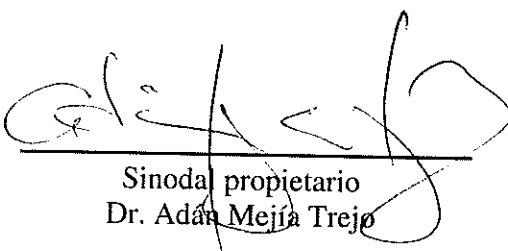
APROBADA POR:



Presidente del Jurado
Dr. Asdrúbal Martínez Díaz de León



Sinodal propietario
M.C. Rafael Hernández Walls



Sinodal propietario
Dr. Adán Mejía Trejo

“Las olas en el mar son sin duda peculiares en muchos sentidos,
y sobre todo aquellas superficiales generadas por el viento.”
Kinsman

AGRADECIMIENTOS

A la sección de Oceanología Física del Instituto de Investigaciones Oceanológicas por su amistad, tiempo, espacio y todas las enseñanzas que me ayudaron a sobrellevar momentos buenos y malos, pues sin ellos esto no hubiera sido posible.

Al Dr. Asdrúbal Martínez Díaz de León por su excelente dirección, consejos, enseñanzas y apoyo incondicional, también por ser quien me enseñó a navegar en las aguas de la academia.

A mis sinodales Dr. Adán Mejía Trejo y M.C. Rafael Hernández Walls por revisar y corregir este trabajo.

A la Facultad de Ciencias Marinas por haber sido un buen hogar, a sus maestros y alumnos.

Al Ocean. Eduardo Gil Silva y al M.C. Rafael Blanco Betancourt por haberme enseñado casi todo lo que sé del trabajo en el campo.

A todas las personas que ayudaron directa o indirectamente en la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

A mi madre, a mi hermana y a mi padre porque nunca se dieron por vencidos conmigo.

A toda mi familia que aunque lejos, siempre estuvieron aquí.

A Laura por aguantarme y apoyarme.

A la generación 52 de oceanólogos que me dieron su apoyo para terminar mis estudios con ellos y las ganas para acabar esto.

A mis broders.

Al océano y en especial a las olas, pues son el principal motor de lo que hago.

ESTIMACIÓN DEL CAMPO DE OLEAJE EN LA BAHÍA DE TODOS SANTOS MEDIANTE EL USO DE UN MODELO DE PREDICCIÓN DE OLEAJE EN AGUAS SOMERAS

RESUMEN

Con el propósito de estimar el campo de oleaje dentro de la Bahía de Todos Santos (BTS), Baja California, se adaptó el modelo numérico de tercera generación para aguas someras SWAN (Simulating WAVes Nearshore) a la Bahía. Para validarlo se instalaron 3 aparatos de medición de oleaje en diferentes partes de la bahía; uno de ellos también midió las condiciones del viento. Se realizaron simulaciones previas a la validación para familiarizarse con el modelo y se determinó su sensibilidad a cambios en los datos de entrada. Las simulaciones realizadas con el modelo para las localidades de los aparatos fueron comparadas con las mediciones in situ. Se realizaron simulaciones en el modo estacionario con propagación de oleaje únicamente y con propagación mas generación. En ambos casos se utilizó como información de entrada al modelo el campo de oleaje proporcionado por la estación de aguas profundas Harvest Buoy, del Coastal Data Information Program. En el caso que incluye generación se utilizó además la información del campo de viento proporcionada por uno de los instrumentos instalados dentro de la Bahía. Los resultados de las comparaciones muestran que el modelo es capaz de simular adecuadamente el campo de oleaje dentro de la bahía, ya que representa correctamente los procesos de propagación, generación y disipación del oleaje, todo esto en una sola corrida, lo que reduce considerablemente el tiempo de cómputo. De las comparaciones entre los datos obtenidos con el modelo y los reportados por los aparatos dentro de la BTS se hicieron correlaciones y pruebas de hipótesis para validar las simulaciones. No se encontró evidencia estadísticamente significativa, al 95% de confianza, para decir que la diferencia entre las medias de cada una de las comparaciones sean diferentes a cero, por lo que se concluye que son iguales. Por lo mencionado anteriormente el SWAN puede considerarse como un laboratorio de oleaje, que con sus debidas consideraciones en la interpretación de los resultados puede usarse en la resolución de problemas reales y necesidades de la zona costera, por lo que constituye una poderosa herramienta para la investigación y docencia que no puede dejar de aprovecharse.

ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN.....	1
2.- OBJETIVOS.....	6
2.1.- GENERALES.....	6
2.2.- PARTICULARES.....	6
3.- ANTECEDENTES.....	7
3.1.- REVISIÓN DE ALGUNOS CONCEPTOS EN LA DESCRIPCIÓN DEL OLEAJE.....	7
3.2.- REVISIÓN HISTÓRICA DE LOS MODELOS DE PREDICIÓN.....	12
3.3.- LAS DIFERENTES APROXIMACIONES DE LOS TÉRMINOS FUENTE.....	19
3.4.- LA ECUACIÓN DE BALANCE DE ACCIÓN DEL OLEAJE.....	21
3.5.- EL MODELO SWAN.....	23
3.6.- LA PREDICCIÓN EN MÉXICO.....	27
4.- DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	30
5.- METODOLOGÍA.....	32
5.1.- LOCALIDADES.....	33
5.2.- TIPOS DE APARATOS.....	35
5.3.- LOS DATOS DE ENTRADA AL MODELO.....	38
5.4.- LAS SIMULACIONES.....	41

6.- RESULTADOS	44
6.1.- CORRELACIONES.....	48
6.2.- SIMULACIONES.....	54
7.- DISCUSIONES	62
8.- CONCLUSIONES	69
9.- RECOMENDACIONES	71
REFERENCIAS	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1a.- Espectro de densidad de energía.....	11
Figura 1b.- Espectro direccional.....	11
Figura 2.- Localización geográfica del área de estudio.....	30
Figura 3.- Localización de los puntos de comparación dentro y fuera de la bahía.....	34
Figura 4.- Series de tiempo de Hs y T promedio tomadas por HB.....	39
Figura 5.- Hs para HB, EC y PB.....	45
Figura 6.- Tprom para HB y PB.....	45
Figura 7.- Tp en HB y EC.....	46
Figura 8.- Tprom en PM y PB.....	47
Figura 9.- Hs en PM y PB.....	48
Figura 10.-. Correlación de la altura significativa entre HB y EC.....	50
Figura 11. Correlación del período del pico espectral entre HB y EC.....	50
Figura 12. Correlación de la dirección del pico espectral entre HB y EC.....	50
Figura 13. Correlación de la altura significativa entre HB y PB.....	51
Figura 14. Correlación de altura significativa entre EC y el modelo.....	52
Figura 15. Correlación del período del pico espectral entre EC y el modelo.....	52
Figura 16. Correlación de la dirección del pico espectral entre EC y el modelo.....	52
Figura 17. Correlación de altura significativa entre PB y el modelo.....	53

Figura 18. Correlación del período promedio entre PB y el modelo.....	53
Figura 19.- Comparación de Hs en 2ª generación con y sin fricción.....	59
Figura 20.- Comparación de TM02 y Tp en 2ª generación con y sin fricción.....	59
Figura 21.- Comparación de Hs en 3ª generación con y sin fricción.....	59
Figura 22.- Comparación de TM02 y Tp en 3ª generación con y sin fricción.....	60
Figura 23.- Comparación de la Hs en 2ª y 3ª generación con y sin triadas.....	60
Figura 24.- Comparación de TM02 y Tp en 2ª y 3ª generación con y sin triadas.....	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.- Diferentes opciones en el SWAN para formular los diferentes procesos físicos que afectan el oleaje.....	26
Tabla 2.- Correlación de los datos de agua profunda como entrada del modelo y los reportados por los aparatos.....	49
Tabla 3.- Resumen de los datos de salida para su comparación.....	51
Tabla 4.- Condensado de datos.....	61

ESTIMACIÓN DEL CAMPO DE OLEAJE EN LA BAHÍA DE TODOS SANTOS MEDIANTE EL USO DE UN MODELO DE PREDICCIÓN DE OLEAJE EN AGUAS SOMERAS

1. INTRODUCCIÓN

IMPORTANCIA DEL OLEAJE Y LA NECESIDAD DE PREDECIRLO

La historia de la investigación del oleaje es relativamente reciente, esta surgió en respuesta al creciente interés comercial por parte de los gobiernos de diferentes países industrializados. Se necesitaba saber qué pasaba en la superficie del océano para poder planear y trazar mejores rutas de navegación, posibles puertos, atracaderos e incluso lugares potenciales que fungieran como fondeaderos. Sin embargo, la predicción de oleaje se inició formalmente durante la Segunda Guerra Mundial como respuesta a la necesidad que tenían las Fuerzas Aliadas de pronosticar las condiciones de la superficie del mar durante su invasión anfibia a Normandía, Francia.

La predicción del oleaje es importante ya que no se cuenta con suficientes mediciones *in situ*, pues resulta económicamente imposible. Estas mediciones no solo son necesarias, si no de vital importancia para la buena planeación, el diseño y la construcción de obras costeras, ya sean de protección, comerciales o asentamientos humanos cercanos a la línea de costa. Asimismo, es esencial la buena predicción de las condiciones venideras del oleaje para una zona en específico, con el objetivo de evitar pérdidas tanto humanas como materiales, ya

sea en la costa y/o en alta mar, que en ocasiones llegan a ser devastadoras para el desarrollo de la región.

En la zona costera es quizá aún más importante una buena predicción, debido a la creciente tendencia mundial de asentarse frente o cerca del mar. No es raro el caso en el que no se haya tomado en cuenta el oleaje de tormenta, la sobre-elevación del nivel del mar debido al oleaje, a bajas presiones atmosféricas y/o mareas vivas para la realización de alguna actividad en la zona costera, como lo puede ser desde una simple colecta de organismos en la zona intermareal, la realización de perfiles de playa o incluso el plan de construcción de alguna obra marítima.

En respuesta al creciente interés por saber qué es lo que pasa y quizá aún más importante, de lo que va a pasar en la superficie del océano, se han desarrollado una serie de modelos y técnicas para pronosticar o predecir las olas en el mar como resultado del esfuerzo de un campo de viento sobre él.

El grado de sofisticación que pueden alcanzar estos modelos radica en el número y forma de representar los términos fuente considerados. Estos términos representan todos aquellos procesos físicos que transfieren energía para adentro, afuera o incluso entre las diferentes componentes del oleaje, modificando así sus características, y se representan como la sumatoria de

procesos independientes. Estos procesos son los de generación, propagación y disipación del oleaje.

En general, analítica y numéricamente los términos fuente pueden ser representados de diferente manera. Las diferentes formas de hacerlo se debe mas que nada a la capacidad computacional y nos da la diferencia entre los modelos de primera, segunda y tercera generación. Los modelos de primera generación son los más antiguos y simples, basados en mediciones de la tasa de crecimiento del oleaje y con un límite de saturación. Seguidos por los de segunda generación, que incorporaron ciertos adelantos en el cálculo de los resultados, tales como tomar las interacciones no lineales de forma paramétrica y aunque seguían teniendo un límite de saturación como los de primera generación, los de la segunda empezaron a basar la entrada de energía al espectro por el viento en mediciones de flujo. Los más recientes son los de tercera generación, que gracias a las capacidades computacionales actuales, involucran los últimos adelantos teóricos y numéricos de la física que utilizan para representar el oleaje y su evolución. Las aportaciones más importantes fueron el tomar de forma explícita la disipación de la energía del oleaje y el utilizar aproximaciones para sumar la aportación que las interacciones no lineales tienen sobre la evolución del espectro. En los antecedentes se hará mención a ejemplos de cada uno de los diferentes modelos: de primera, segunda y tercera generación, así como sus diferencias.

La predicción del oleaje se puede hacer a escala global o regional, todo depende del detalle que se requiera para una zona en particular y un trabajo en específico. La aplicación de predicciones prácticas de oleaje involucra una mezcla del conocimiento del estado actual del oleaje generado tanto localmente como a distancia (*sea* y *swell*), así como de las variaciones temporales y espaciales de los campos de viento y corrientes, la irregularidad del fondo batimétrico y configuración de las costas y sobre todo de la cantidad de recursos con los que se cuente para lograrlo, ya que es necesario contar con una serie de aparatos que brindan la información necesaria para hacerlo. Predecir oleaje bajo estas condiciones no es fácil, y en la mayoría de los casos inaccesible para los fines prácticos que muchas veces se requiere y que por falta de recursos no se “toma en cuenta”. Por esta razón, es necesario un modelo práctico, rápido y eficaz que represente los procesos físicos que ocurren en la naturaleza de la mejor manera posible (tan bien como se conozcan dichos procesos) y que con la menor cantidad de información y equipo nos proporcione buenos resultados.

Por la forma en que está hecho y los adelantos que involucra en la formulación de los diferentes procesos físicos que modifican las características del oleaje, el modelo numérico de predicción de oleaje: SWAN (Simulating Waves Nearshore. Hoolthuijsen et al., 2000) cumple con los requerimientos necesarios que un modelo numérico debe tener para el inicio de la automatización de una buena, confiable y rápida predicción del campo de oleaje

en las aguas someras, como lo es el caso de la Bahía de Todos Santos, Baja California, México.

Las metas de la investigación en torno al oleaje generado por viento son claras: se necesita ser capaz de predecir el campo de oleaje y sus efectos en el medio ambiente.

Este trabajo pretende instrumentar y hacer operacional un modelo numérico de tercera generación para la buena estimación del campo de oleaje de las aguas someras de la Bahía de Todos Santos. Validándolo con mediciones de oleaje hechas dentro de la Bahía (para comparar los resultados tanto gráficos como numéricos en aguas someras) y fuera de ella (para los datos de entrada de aguas profundas del modelo). De igual forma, el presente estudio procura iniciar una línea de estudio capaz de mantener aparatos confiables en lugares estratégicos para lograr lo antes mencionado: la automatización de la predicción de oleaje en la Bahía de Todos Santos.

2. OBJETIVOS

2.1 GENERALES

- Hacer operativo el SWAN para el caso específico de la Bahía de Todos Santos.
- Validar el SWAN con datos *in situ* dentro de la Bahía de Todos Santos.

2.2 PARTICULARES

- Instalación de al menos dos aparatos con sensores de oleaje que brinden series de tiempo traslapadas de las condiciones del oleaje en diferentes partes de la bahía.
- Análisis de los datos para estipular la similitud de los datos de oleaje tomados fuera de la BTS y los tomados dentro de ella en el periodo de tiempo en el que se realizó la medición.
- Simulación en el SWAN del caso de propagación de energía únicamente.
- Simulación del caso de generación y propagación de energía.
- Comparación de tres casos:
 - Con la influencia de la fricción y sin fricción con el fondo.
 - Con la influencia del viento y sin viento.
 - Para períodos de oleaje cortos (oleaje local) y largos (oleaje lejano) de entrada.
- Reconocimiento de las variables físicas más importantes en la evolución del espectro.

3. ANTECEDENTES

3.1 REVISIÓN DE ALGUNOS CONCEPTOS NECESARIOS EN LA DESCRIPCIÓN DEL OLEAJE

Al golpear el viento sobre la superficie del mar, éste produce una perturbación en él, generando así el oleaje, a esto se le llama un “océano creciente”. Este proceso es el responsable de la generación del oleaje. Si el viento es lo suficientemente intenso y constante, el oleaje seguirá creciendo hasta alcanzar ciertos valores de saturación por frecuencia y llegar a un valor máximo, entonces se presenta un mar “completamente desarrollado”, o sea, cuando las olas ya no son capaces de aceptar más energía del viento. Cuando una ola viaja sobre la superficie del agua, lo que hace es transferir energía, no materia. A este proceso se le llama: propagación del oleaje. La disipación es la parte de los términos fuente que sucede cuando algún proceso resta energía al oleaje. La disipación consta de tres contribuidores principales: las “crestas blancas” o *whitecapping*, que ocurren por un exceso de entrada de energía (no son mas que pequeñas rompientes sobre las crestas de las olas controladas por la pendiente de la misma ola). El segundo contribuyente es la fricción con el fondo y por último la rompiente inducida por el fondo, que es el menos entendido de todos los procesos que afectan al oleaje, ya que involucra demasiados movimientos turbulentos.

Las interacciones no lineales ola-ola son las responsables del intercambio de energía entre componentes de diferentes frecuencias del mismo espectro, y son las responsables de redistribuir la energía entre dichos componentes. En aguas profundas, las interacciones cuádruples (entre cuatro frecuencias) dominan la evolución del espectro (Young, 1999). Este tipo de interacciones transfiere la energía del pico espectral ya sea a las frecuencias mas altas (obligando así al pico espectral a moverse a una frecuencia mas alta) o a las frecuencias mas bajas (obligando al espectro a moverse a una frecuencia mas baja) ya sea si el oleaje esta siendo disipado o no por las “crestas blancas” o *whitecapping*. En contraste con las aguas profundas, la interacción entre diferentes frecuencias en aguas someras se realiza entre tres diferentes frecuencias del mismo espectro (Young, 1999), recibiendo el nombre de triadas. Las triadas transfieren energía de frecuencias bajas a altas, obligando así al pico espectral a disminuir su período (Beji y Battjes, 1993).

De acuerdo a la teoría lineal del oleaje (Airy, 1845), la velocidad de fase o de propagación de una ola es : $C = \omega/k$, donde ω es la frecuencia angular de la ola representada por $\omega = 2\pi/T$, y k es el número de onda, representado por $k = 2\pi/\lambda$, la cual representa la cantidad de progresión de un ciclo desde un origen dado. T representa el período de la ola y λ la longitud de onda

Por otro lado tenemos la relación de dispersión: $\omega^2 = gk \tanh(kd)$, la cual nos hace ver la estrecha relación entre el número de onda (k), la frecuencia relativa (ω) y la profundidad (d). Sustituyendo esta relación en la ecuación de la velocidad de fase, tenemos: $C^2 = \frac{g}{k} \tanh(kd)$, la cual es también llamada frecuentemente como la "celeridad". Donde g es la aceleración de la gravedad y nos indica que la velocidad de fase varía con la profundidad, el período y la longitud de onda. Para unos valores dados de longitud y período, una ola se propagará más rápido en aguas profundas que en aguas someras. De igual forma, olas con longitudes de onda y/o períodos más grandes se propagarán más rápido que olas con períodos o longitudes más cortas. Entonces, si tenemos un grupo de olas de diferentes períodos y longitudes propagándose fuera del área en que fueron generadas, es fácil deducir que al paso de un tiempo éstas tenderán a separarse en grupos más pequeños de acuerdo a sus diferentes períodos, ya que irán viajando a diferentes velocidades. Y se podría decir que las olas más largas llegarían antes a un lugar lejano, seguidas por olas cada vez más pequeñas hasta llegar a dispersarse por completo.

La relación entre la altura de una ola y la cantidad de energía por unidad de área que contiene esta dada por: $E = 1/8 \rho_a g H^2$, donde ρ_a es la densidad del agua de mar, g es la gravedad y H es la altura de ola, es a lo que se le llama energía específica (Dean y Dalrymple, 1991 y muchos otros).

Para facilitar la descripción de las características del oleaje, se hace uso de una variable bidimensional llamada espectro de densidad de energía o amplitud, la cual representa la cantidad de energía del oleaje en un punto en el eje X , por cada una de las frecuencias que lo componen en el eje Y (figura 1a). Ahora bien, si se trata de un espectro direccional entonces estaremos hablando de una variable tridimensional que representa la cantidad de energía, frecuencia y dirección del oleaje en un punto dado. Con esta representación se tiene toda la información relevante del oleaje para un punto en una sola variable (figura 1b). Los círculos concéntricos representan la escala de frecuencia que disminuye hacia el centro y éstos están segmentados por líneas punteadas (separadas cada 30 grados) que indican las diferentes direcciones, correspondiendo 0° al Norte geográfico. La escala de color representa la cantidad de energía del oleaje, que se ve en la mancha sobre los círculos. Esta mancha puede cambiar de forma, color y lugar.

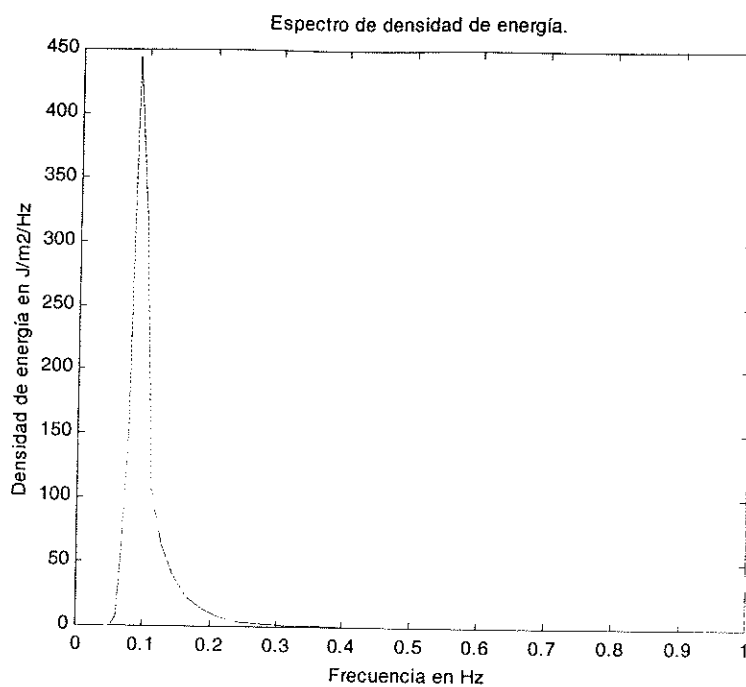


Figura 1a espectro de densidad de energía.

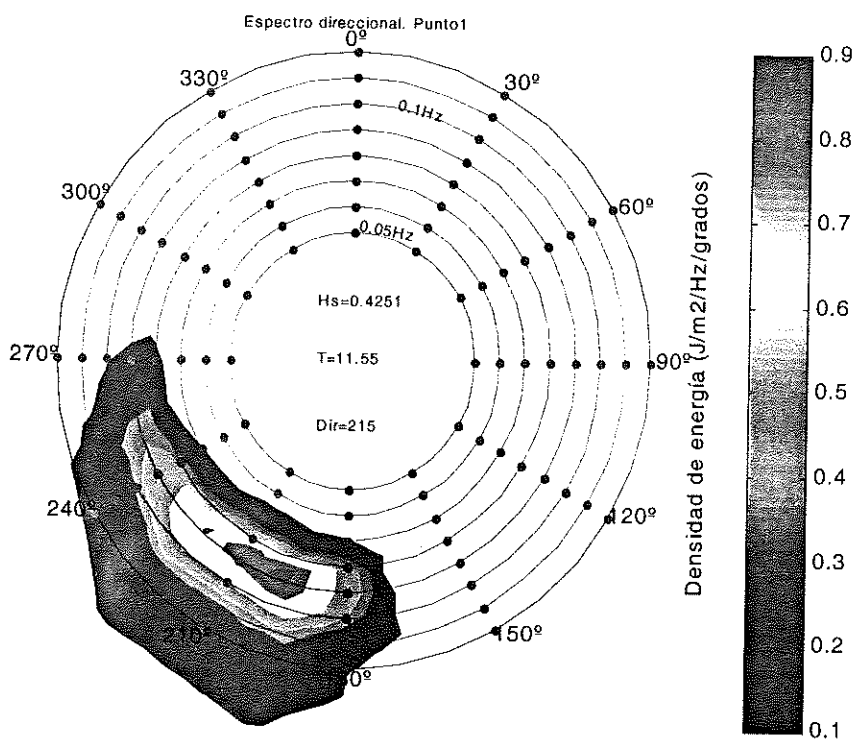


Figura1b espectro direccional de energía.

Hay que tomar en cuenta que estas variables representan las condiciones del oleaje en un solo punto, sin embargo, al ser capaces de obtener el espectro para una serie de puntos sucesivos, podemos darnos una idea de la evolución del oleaje que pase por una cierta zona y bajo ciertas condiciones. Si durante esta evolución se observa un cambio en la coloración de la mancha, esto significaría un aumento (debido a la generación de oleaje) o disminución de energía (por disipación), si se observa un acercamiento de la mancha al centro de los círculos, o hacia fuera, se debe al cambio de frecuencia del oleaje, provocado por ejemplo por la interacción del oleaje con corrientes de agua. Si la mancha cambia de lugar se advertiría un cambio en la dirección de procedencia del oleaje, por ejemplo debido a la refracción. Al máximo de energía se le llama el pico espectral y tiene un solo valor de energía, período y dirección, aunque para el mismo espectro pueda existir más de un pico espectral, haciéndolo bimodal o incluso multimodal (con varios picos).

3.2 REVISIÓN HISTÓRICA DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN

Si la historia de la investigación y observación del oleaje en el océano es relativamente corta (primeras observaciones: Airy, 1845; Stokes, 1847), la historia de la predicción del oleaje es aún mas reciente: Sverdrup y Munk, (1947) proveen el primer método empírico de predicción de la altura y período significantes.

Muy al principio, las técnicas consistían en métodos manuales que requerían de la habilidad de un buen “pronosticador de oleaje”. Pero debido a la necesidad de hacerlo en áreas tan grandes como el océano mismo, el deseo de quitar la subjetividad inherente de los métodos manuales y el aumento exponencial de las capacidades computacionales, se llevaron a cabo grandes adelantos en el desarrollo de los modelos numéricos. En un principio, éstos se desarrollaron como “modelos empíricos”, los cuales se basaban en fórmulas teóricas o empíricas para obtener la altura significativa y el período del oleaje. Una característica de los modelos empíricos es que utilizan una base de datos de altura, período y dirección de oleaje para una localidad en particular y un intervalo de tiempo regular, y a los cuales se les puede llamar: modelos climáticos de oleaje. Con ellos se puede generar la climatología del oleaje de manera estadística para ese lugar en específico. La desventaja de este tipo de modelos es que se necesita una serie de tiempo de cinco a veinte años (Bishop y Donelan, 1987). Entre mayor sea la serie de datos mayor será la precisión de los resultados del modelo, incluso hay quienes recomiendan que, para poder hacer una extrapolación razonable de los resultados obtenidos hasta llegar a tener las condiciones de diseño de estructuras costeras u oceánicas, es necesario contar primero con una serie de datos, si es posible, de al menos treinta años o más (Resio y Cardone, 1983). Esto muchas veces no es posible, ya que en la mayoría de los casos resulta muy problemático, ya sea por falta de recursos o por falta de accesibilidad al lugar.

La aplicación de los conceptos espectrales para la descripción de las olas en el océano por Pierson y Marks (1952), marcó el inicio de una nueva era en la predicción de oleaje sobre el mar. Para 1955 ya se habían incorporado estos conceptos en un método práctico de predicción de oleaje, el cual facilitaba el proceso y la interpretación de dicha predicción (Ris, 1997).

Otro importantísimo paso en la predicción del oleaje fue el uso de computadoras digitales en el proceso de la predicción de oleaje, las cuales fueron utilizadas por Gelci y colaboradores en 1957 para brindar resultados objetivos en el pronóstico de la climatología del oleaje. Su trabajo inició la era de los “modelos numéricos” de predicción de oleaje y aunque desde entonces hasta ahora ha ocurrido una evolución bastante significativa, su trabajo fue la base de los modelos que integran la ecuación de acción de transporte. Sin embargo para esa época, no se sabía, o se sabía muy poco de los ya mencionados términos fuente.

Para mediados del siglo XX, era difícil e impráctico añadir la contribución que las interacciones no lineales ola-ola tienen en la evolución del campo de oleaje. Esto impulsó el desarrollo de los “modelos paramétricos”, en donde se tomaban por asumidas las interacciones no lineales con la forma del espectro representado por un número limitado de parámetros. Hoy día, las dos versiones de modelos empíricos más usados son el modelo JONSWAP (Joint North Sea

Wave Project, descrito por Hasselmann et al., 1973) y el SMB (Sverdrup-Munk-Bretschneider, resumido por CERC en 1977).

Debido a la diversificación entre los diferentes tipos de modelos que existen para explicar lo que ocurre en la superficie del océano, hoy día los modelos pueden dividirse en dos clases generales: los modelos que *resuelven la fase*, los cuales predicen la amplitud y la fase de olas individuales, y los que *promedian la fase*, los cuales predicen promedios de cantidades tales como el espectro o sus propiedades integradas (Young, 1999), por ejemplo: la altura significativa (H_s), el período del pico espectral (T_p) o promedio ($\bar{T}$) e incluso algunos la dirección espectral (θ) tanto promedio como la del pico.

Los modelos que *resuelven la fase* son generalmente usados bajo condiciones de oleaje rápidamente cambiantes (en el orden de una longitud de onda o menos), esto es cuando el promedio de las propiedades de la ola varían rápidamente. En este tipo de modelos se reconstruye la elevación de la superficie del mar en tiempo y espacio con una buena precisión. Sin embargo, es raro el caso en que se represente la generación (efecto del viento sobre la superficie del mar) y disipación (rompiente en aguas profundas y efectos no lineales) del oleaje. Además, son "computacionalmente muy demandantes (por unidad de área del dominio computacional), por lo que solo deben de usarse cuando sean estrictamente requeridos" (Battjes.1994. Tomado de Young, 1999). La

resolución tanto temporal como espacial que requieren para hacer sus cálculos, va en el orden de una fracción de período y longitud de onda respectivamente. Su gran ventaja es que en ellos sí se representan los efectos de la difracción.

En los modelos que *promedian la fase* se asume que las propiedades del oleaje varían lentamente (en la escala de algunas longitudes de onda), la superficie del mar es descrita en función del espectro de densidad de energía o acción (mas adelante se tratarán con mas detalle las diferencias). A diferencia de los modelos que *resuelven la fase*, en este tipo de modelos se describe la cinemática del oleaje de forma tanto Lagrangeana (siguiendo la trayectoria de rayos), Euleriana (siguiendo la evolución del espectro en una malla), o una combinación de ambas, evitando así el problema de patrones de rayos de ola caóticos (superposición entre rayos). Otra ventaja del uso de modelos formulados sobre una malla, es el hecho de poder representar la generación, propagación, disipación, así como los llamados efectos no lineales de las interacciones ola-ola.

En su inicio, los modelos que *promedian la fase* obtenían cantidades "simples" como la altura significativa o el período pico (modelos de *primera generación*), dentro de los cuales podemos mencionar al modelo japonés MRI (Uji, 1975). En este tipo de modelos la transferencia de energía del viento a la superficie del mar era lineal, y cada componente del espectro crecía

independientemente hasta llegar a un punto de saturación (Phillips, 1958) que dependía de la frecuencia. Sin embargo, para esa época ya se habían propuesto nuevas teorías de generación de oleaje, por ejemplo la teoría de Phillips y la de Miles, pero era inadecuado y difícil incorporarlas en los modelos de predicción debido a la falta de capacidad de memoria y velocidad computacionales.

En 1967, Barnett y Wilkerson encontraron experimentalmente que el pico espectral de un "océano creciente" era mayor al valor de saturación correspondiente a esa frecuencia, por lo que se estaban subestimando los valores de la energía por banda de frecuencia del espectro. A esto se le llamó *overshoot*; los modelos de primera generación no eran capaces de representar este fenómeno.

Una década mas tarde se desarrollaron los modelos de *segunda generación*, que basados en los trabajos experimentales de Mitsuyasu en 1968, Hasselmann y colaboradores en 1973 y de Snyder y colaboradores en 1981, trataron de remediar esta situación usando una formulación parametrizada de la manera de crecer del espectro en lugar de limitar dicho crecimiento a un valor arbitrario, reproduciendo así el fenómeno de *overshoot*. Sin embargo, este tipo de modelos no podían representar ni simular apropiadamente el rápido crecimiento de oleaje bajo condiciones cambiantes del campo de viento (por ejemplo durante huracanes, ciclones de pequeña escala o frentes atmosféricos).

De igual manera tenían graves dificultades en el tratamiento de la transición de oleaje local a oleaje lejano (*sea y swell*). Para el caso de los modelos de segunda generación, los problemas más importantes eran numéricos mas que físicos (Young, 1999).

Las técnicas para sobrellevar estas dificultades fueron sugeridas por el grupo SWAMP (Sea Wave Modelling Project, 1985), los cuales propusieron el desarrollo de los modelos de *tercera generación*, donde se solucionaba el problema del crecimiento del espectro mediante la integración de la ecuación básica de transporte del espectro sin restricciones iniciales en la forma misma del espectro, integrando así, las interacciones cuádruples de las olas de manera explícita. En el primer intento por incorporar la forma exacta de dichas interacciones se concluyó que para aplicaciones prácticas era mejor no hacerlo, pues requería de muchísimo tiempo de cómputo (Hasselmann, 1981). Es por eso que, históricamente, se reconoce al modelo WAM (Wave Modelling, del grupo WAMDI, 1988) como el primer modelo en incorporar estas técnicas, siendo éste, el modelo de tercera generación prototipo en la predicción de oleaje en aguas profundas.

3.3 LAS DIFERENTES APROXIMACIONES DE LOS TÉRMINOS FUENTE

Los primeros modelos de tercera generación utilizaban esencialmente los mismos términos fuente que los de segunda generación, pero con algunas diferencias significativas en los detalles mismos de dichos términos fuente. En general, los modelos de predicción de tercera generación deben tener una solución completa del término de interacción no lineal (las cuádruples o triadas, según sea el caso). Debido a que esta condición hace que el cálculo para obtener una buena solución a tal término sea computacionalmente muy tardado e inconveniente en cualquier modelo de oleaje que pretenda ser operacional y funcional, se han desarrollado una serie de técnicas para mejorar el tiempo de cómputo basadas en métodos paramétricos u otras aproximaciones (Young y Van Vledder, 1993).

Hoy día, una de las aproximaciones mas usadas para el caso de las interacciones cuádruples es el método de Hasselmann denominado: Aproximación de Interacción Discreta (AID) (Hasselmann et al., 1985), la cual ha obtenido muy buenos resultados describiendo los parámetros esenciales de la evolución del espectro (Komen et al., 1994). Aunque este método no deja de ser una aproximación, es mucho más preciso que haciéndolo con los métodos paramétricos (Young, 1999).

El primer intento en describir las interacciones no lineales entre tres diferentes frecuencias, o triadas para aguas someras, en términos de un término fuente espectral de energía fue hecho por Abreu y colaboradores en 1992. Sin embargo, el verdadero adelanto vino con el trabajo de Eldeberky y Battjes (1995), los cuales modificaron el trabajo de Madsen y Sørensen (1993) y fundaron las bases para lo que poco después se denominaría Aproximación Discreta de Triadas (ADT) para olas co-lineales, al considerarse únicamente la parte dominante de dichas interacciones. Este modelo ha sido verificado con observaciones de olas de cresta larga y frecuencias al azar rompiendo sobre barras sumergidas (Beji y Battjes, 1993). También fue verificado en 1994 por Arcilla y colaboradores sobre una playa de barra (digamos la barra de una laguna costera), probando así que con dicha aproximación se obtienen buenos resultados en la transferencia de energía del pico primario del espectro a armónicos superiores, esto es, en el momento de la generación de oleaje. La última versión de este método para calcular las interacciones triadas del oleaje es la Aproximación Juntada de Triadas (AJT), la cual es una adaptación a la Aproximación Discreta de Triadas (ADT) y fue derivada por Eldeberky en 1996. Esta es la expresión utilizada por el SWAN para representar la contribución de las triadas en la evolución del espectro (Holthuijsen, 2000).

Actualmente, los modelos que predicen la evolución del espectro direccional lo hacen tanto temporal como espacialmente, resolviendo tan solo

una ecuación: la ecuación de balance de densidad de energía, misma que integra los conceptos anteriormente mencionados como los procesos de generación, propagación y disipación del oleaje, así como los términos fuente (Young, 1999). No obstante, la sofisticación de la representación de dicha ecuación puede variar significativamente, haciendo la verdadera diferencia entre uno y otro modelo.

Algunos modelos de predicción son capaces de incluir los efectos que las corrientes de agua tienen sobre el oleaje, y por lo tanto utilizan la ecuación de balance de densidad de acción en lugar de la de energía, ya que en presencia de corrientes, la densidad de acción si es conservada, mientras que la densidad de energía no (Whitham, 1974).

3.4 LA ECUACIÓN DE BALANCE DE ACCIÓN DEL OLAJE

La ecuación de balance de acción es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma}.$$

Donde $N = N(\sigma, \theta)$, representa al espectro de densidad de acción de oleaje en dos dimensiones: la frecuencia relativa (σ) y la dirección (θ), y es igual al espectro de densidad de energía dividido entre σ : $N = E(\sigma, \theta)/\sigma$ (para facilitar la

visualización de las diferentes representaciones del oleaje, esto es, entre tomar en cuenta la densidad de acción o de energía); $\frac{\partial}{\partial t} N$ representa la razón de cambio de dicho espectro a través del tiempo, o término local; $\frac{\partial}{\partial x} C_x N$ representa la razón de cambio de dicho espectro en la dirección x y velocidad de propagación C_x , por lo que el siguiente término: $\frac{\partial C_y N}{\partial y}$, será lógicamente la razón de cambio del espectro en dirección y y velocidad de propagación C_y . Por consiguiente, si juntamos ambos términos de la ecuación tenemos la razón de cambio del espectro de densidad de acción del oleaje en el espacio x, y , a lo que se les llaman los términos advectivos. El cuarto término de la ecuación: $\frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N$, representa el cambio de la frecuencia relativa debido a variaciones en la configuración de la batimetría y las corrientes, con velocidad de propagación C_σ en el espacio de la frecuencia relativa: σ . El quinto término: $\frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N$, representa la razón de cambio de la dirección de la ola, tomada como una línea ortogonal a la cresta de la ola, inducida tanto por corrientes como por variaciones en el fondo, y a lo que se le conoce como refracción. El término $S (=S(\sigma, \theta))$, al cual está igualada la ecuación, es el término fuente, que como se había mencionado anteriormente, es la sumatoria de todos aquellos procesos independientes que dan o quitan energía al espectro, $S=S_{in}+S_{ds}+S_{nl}$. Donde S_{in} representa la transferencia de energía del viento a la superficie del agua. S_{ds} representa la

disipación, que a su vez consta de: $S_{ds,w}$ que es la disipación debido a las “crestas blancas”, $S_{ds,b}$ disipación debido a la fricción con el fondo y $S_{ds,br}$ representa la disipación por rompiente debido al someramiento. S_{in} representa las interacciones no lineales entre diferentes componentes del espectro.

Ahora bien, teniendo ya un panorama más amplio y detallado de algunos conceptos importantes en la descripción del oleaje y lo que son los modelos de predicción de oleaje, sus tipos y diferencias, la evolución a la que han sido sujetos y la tendencia que llevan, se puede hablar más específicamente del modelado numérico de las olas. Aunque ya se ha hablado de él en páginas anteriores, a continuación se hace una presentación más completa de lo que es el SWAN y cómo puede operar, más adelante se muestra como se utilizó en este trabajo.

3.5 EL MODELO SWAN

Éste es un modelo numérico de tercera generación de predicción de oleaje utilizado para obtener estimaciones realistas de los diferentes parámetros del oleaje en zonas costeras, estuarios y lagos, a partir de condiciones dadas de batimetría, viento y corrientes. SWAN es el acrónimo de *Simulating WAVes Near-shore*, y está basado en la ecuación de balance de acción (o en la

ecuación de balance de energía en la ausencia de corrientes) con fuentes y sumideros.

Conceptualmente, es una extensión del modelo de tercera generación de predicción de oleaje en aguas profundas: WAM, donde se hace uso de la forma Euleriana de seguir la evolución del espectro, esto es de manera microscópicamente, por así decirle, ya que de esta manera se observa la evolución del espectro en una malla que representa cierta área y en donde se calculan diferentes soluciones a la ecuación de balance de acción en cada uno de los diferentes cruces de la malla. Aunado a esto, el SWAN incorpora los últimos adelantos en cuanto a los cálculos de los procesos de generación y disipación de oleaje en aguas profundas (con algunas adaptaciones para acoplarlos a la zona costera) y someras, así como en la forma de calcularlos.

En este modelo se representan los procesos de propagación, generación y disipación de oleaje, caracterizados por:

♦ Propagación:

- Propagación rectilínea a través del espacio geográfico.
- Refracción debido a las variaciones espaciales de la batimetría y corrientes.
- Someramiento debido a variaciones en la batimetría y corrientes.
- Bloqueo y reflexión debido a corrientes opuestas.

- Transmisión de la energía del oleaje a través de, bloqueo o reflexión contra obstáculos.

♦ Generación y disipación:

- Generación por viento.
- Disipación por rompiente en aguas profundas (*whitecapping*).
- Disipación debido a la rompiente inducida por someramiento.
- Disipación debido a la fricción con el fondo.
- Interacciones ola-ola (triadas y cuádruples).
- Obstáculos.

Su más grande limitación es el hecho de no incluir el proceso de difracción, ya que este proceso no es conservativo. Por lo anterior, es importante mencionar que al no incluir este proceso, los resultados del campo de oleaje dados por el SWAN no serán precisos en las proximidades de obstáculos y por supuesto no dentro de puertos, ya que en estos lugares la difracción es el proceso más importante en la evolución del espectro. Sin embargo, al sacar promedios del espectro entre punto y punto de la rejilla (malla) donde se hacen los cálculos, se llega a un momento y espacio en el que los efectos de la difracción ya no son observables, es decir, que ya no afectan en la evolución del espectro, por lo que seguimos teniendo una muy cercana idea de lo que pasa en la zona costera.

El SWAN puede ser operado en primera, segunda o tercera generación, para ver las diferencias en la formulación de los diferentes procesos se hace referencia a la Tabla 1, tomada de la versión larga del manual de operación del SWAN Cicle III versión 40.11.

Tabla 1. Diferentes opciones en el SWAN para formular los diferentes procesos físicos que afectan el oleaje. (Tomada del manual de operación del SWAN).

		Modo de generación del SWAN		
		1ª	2ª	3ª
Crecimiento linear por viento	Cavaleri & Malanotte-Rizzoli (1981) modificado	x	x	
	Cavaleri & Malanotte-Rizzoli (1981)			x
Crecimiento exponencial por viento	Zinder et al., (1981) modificado	x	x	
	Janssen (1989, 1991)			x
Whitecapping	Holthuijsen & de Boer (1988)	x	x	
	Janssen (1991), Komen et al., (1994)			x
Interacciones cuádruples	Hasselmann et al. (1985)			x
Interacciones triadas	Eldeberky (1996)	x	x	x
Rompiente inducida por el fondo	Battjes & Janssen (1978)	x	x	x
Fricción con el fondo	Hasselmann et al., JONSWAP (1973)	x	x	x
	Collins (1972)	x	x	x
	Madsen et al., (1988)	x	x	x
Transmisión en obstáculos	Seelig (1979)	x	x	x

Algunas de sus ventajas con respecto a otros modelos, es que puede calcular el bloqueo, transmisión y reflexión de la energía del oleaje al encontrarse con algún obstáculo, así como el aumento del nivel medio del mar

inducido por el oleaje (set-up). Puede ser corrido en modo estacionario o no estacionario, en coordenadas cartesianas o esféricas y en modalidad uni o bi-dimensionales. Para la última versión del SWAN (40.11), la extensión del área de estudio ya no es una limitante (en la versión anterior sí lo era), pues al ser una extensión del modelo WAM para aguas profundas, puede usarse en cualquier escala que sea relevante para la generación de olas de gravedad generadas por el viento, tan grandes como el océano mismo. Sin embargo, se aconseja que se tome en cuenta la escala de longitud en términos del detalle que se quiera obtener en los resultados.

Para mayor información acerca de las capacidades, funcionamiento y/o formulación de sus resultados se hace referencia al manual de operación del SWAN Cicle III versión 40.11, (2000) y/o a la siguiente página de Internet: www.swan.ct.tudelft.nl .

3.6 LA PREDICCIÓN EN MÉXICO.

En México, el uso de los diferentes métodos y modelos de predicción de oleaje no es raro. El Golfo de México ha recibido mayor interés en el campo de la estimación del campo de oleaje mediante el uso de modelos de predicción debido a su importancia económica y comercial, es ahí en donde se encuentran la mayoría de las plataformas petroleras y puertos importantes. Históricamente,

las rutas de navegación más importantes llegaban o salían de puertos localizados en el Golfo de México, además, hoy día el 55% de los puertos de México se encuentran en esa región del país. En 1983, Resio y Cardone acoplaron varios modelos de predicción para aguas profundas y someras, para generar el inicio de una serie de datos necesarios para el diseño de obras en el mar y la línea de costa en el sur del Golfo de México (Resio y Cardone, 1983). Con esto se pretendía, mas específicamente, ver los efectos que tenían los llamados "nortes" y huracanes en las costas. Mientras tanto, la NWS (National Waveforecast Station) había estado usando un modelo desarrollado por el Laboratorio de Desarrollo Tecnológico, en Washington, D.C., el cual relacionaba empíricamente la altura y período del oleaje con la velocidad del viento, área sobre la cual sopla el viento y duración del mismo. Sin embargo se encontró que dicho modelo no era lo suficientemente preciso ni consistente.

También para mediados de la década de los ochenta se predecía rutinariamente las condiciones del oleaje para el Golfo de México con los modelos de predicción global: GSOWM (Fleet Numerical Oceanography Center Global Spectral Ocean-Wave Model) y NOW (NOAA Ocean Model) (Chao, 1988). La desventaja de este tipo de predicción era que no se tenía una buena resolución espacial (sobre todo en zonas costeras) debido a su carácter de predictores globales. Para mejorar esta situación, Chao formuló a finales de la

década de los ochenta, un modelo de oleaje regional tanto para las aguas profundas como las someras del Golfo de México.

De igual forma, se han estado probando y aplicando diferentes modelos de predicción en diferentes centros e institutos para diferentes objetivos. Algunos trabajos que se pueden mencionar son las tesis de maestría de Delgado-González (1988), con el título: Aspectos direccionales del oleaje en San Felipe, B.C. Padilla-Hernández (1993): Predicción de oleaje mediante el modelo numérico de densidad espectro-angular. Ponce de León (1994): Sensibilidad del modelo WAM a la variabilidad del viento. Y las mas recientes, las de Puig-Donnelly, (1999). Estudio numérico de la transformación de energía por interacciones no lineales. El cual utilizó el WAM para determinar la influencia de las interacciones no lineales en la evolución del espectro. Y la tesis de Vega Puente (1999): Análisis numérico del ancho del espectro direccional del oleaje en regiones cercanas a la costa. Quien experimentó con el modelo SWAN para explicar el papel de los mecanismos físicos en la evolución del espectro en escenarios ficticios.

4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La Bahía de Todos Santos (BTS) se encuentra localizada entre los $31^{\circ} 40'$ y $31^{\circ} 56'$ N y los $116^{\circ} 36'$ y $116^{\circ} 50'$ W (figura 2), al noroeste de la Península de Baja California, a 110 kilómetros al sur de la frontera de México con los Estados Unidos de Norteamérica y en la cabecera del Municipio de Ensenada.

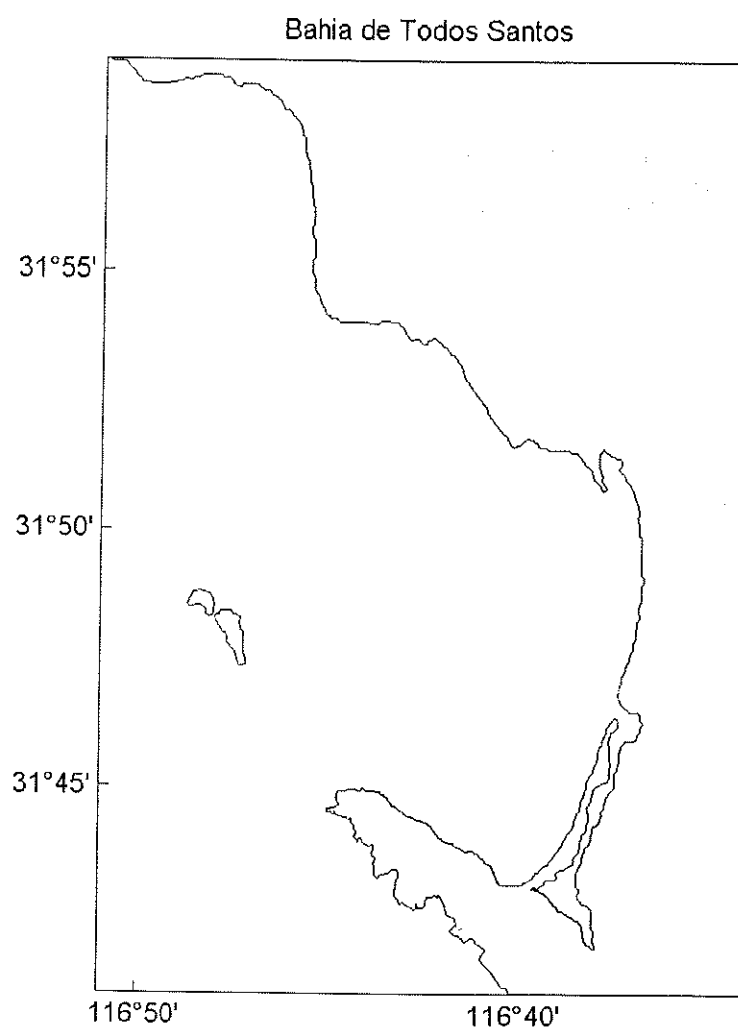


Figura 2. Localización geográfica del área de estudio.

Al norte, la bahía limita con Punta San Miguel, al noroeste con Punta Morro, al este con una extensa playa de arena, al sureste con el Estero de Punta Banda y al sur la Península de Punta Banda, al oeste se encuentran las Islas de Todos Santos. Estos límites naturales le proporcionan una forma geométrica trapezoidal, con un área aproximada de 24,090 ha. de 18 km de largo por 15 km de ancho, dejando así una sola entrada al oleaje en esta época del año, entre Punta San Miguel y la isla norte de Todos Santos. La batimetría se presenta en forma de abanico, con profundidades de más de 250 metros hasta llegar a la playa con pendientes suaves en la mayor parte de la bahía (exceptuando el lado sur; ver Figura 3). El fondo esta constituido de arena en la parte este de la bahía y de conglomerados y clastos grandes al norte y sur de la misma. La climatología del oleaje y viento de la bahía presenta variaciones estacionales, caracterizadas durante las estaciones verano-otoño con olas bajas y primavera-invierno con olas altas y vientos más fuertes.

5. METODOLOGÍA

Este capítulo trata lo concerniente a la realización misma del trabajo, a lo que fue necesario hacer para su elaboración y a los problemas que se enfrentaron antes y durante su desarrollo. También se mencionará de forma breve lo que se espera en los resultados y sienta las bases para algunos de los temas a tratar en las discusiones.

La selección de los puntos de comparación de los datos reales con los resultados del modelo se realizó de acuerdo a la forma en que se esperaba que arribara el oleaje a la costa dentro la bahía, ya que éste es modificado por las características propias de la batimetría de la BTS. En estos puntos se instalaron aparatos que miden las características del oleaje que pasa sobre o debajo de ellos (mas adelante se verán las diferencias entre los aparatos). Fue necesaria la obtención de datos de agua profunda que no estuvieran afectados por las características de la bahía y con los cuales hacer las simulaciones en el modelo. También fue necesario realizar un análisis de estos datos, así como de los reportados por los aparatos dentro de la bahía y adquirir los datos que mejor representaran las condiciones que se querían simular, facilitando de esta manera la validación del modelo. Las simulaciones se realizaron con el modelo numérico de tercera generación: SWAN. De estas simulaciones se obtendrán los procesos físicos más importantes en la evolución del espectro.

5.1 LOCALIDADES

Como fue mencionado en la descripción del área de estudio, la batimetría de BTS se presenta en forma de abanico, creando así un campo de divergencia general del oleaje. De acuerdo a la teoría de refracción del oleaje, con una batimetría que presente estas características se puede esperar una divergencia de los rayos ortogonales a las crestas del oleaje. Si la energía en un segmento de ola se conserva y este segmento aumenta de longitud (por consiguiente también la separación entre los rayos), es obvio pensar que la energía por unidad de longitud disminuirá al acercarnos a la costa. Con esto se puede esperar cierta tendencia en los datos reportados por los aparatos y de manera general se presentará una divergencia de la energía del oleaje en la bahía. Consecuentemente, y con base a lo anterior, se situaron tres puntos dentro de la BTS que permitieran la obtención de diferentes características del oleaje dentro de la bahía (figura 3). También se situó un punto fuera de ella para representar las condiciones del oleaje fuera de la influencia de la bahía (condiciones de agua profunda). A este punto se le identificará como el punto número uno, ya que es por ahí por donde pasa primero el oleaje; la profundidad en este punto es superior a 250 metros. Este punto se encuentra localizado en la esquina superior izquierda del mapa que conforma el área de estudio. El punto número dos se encuentra localizado en el lado norte de la BTS, frente a Punta Morro (PM), a los $116^{\circ} 41.019' W$, $31^{\circ} 51.037' N$ y a una profundidad de 21 metros. El punto

número tres esta al este de la bahía frente a la playa El Ciprés (EC), a los $116^{\circ} 37.615$ W, $31^{\circ} 48.629'$ N y una profundidad de 16 metros. El punto número cuatro esta localizado al sur de la bahía, al lado de Punta Banda (PB), a los $116^{\circ} 39.797'$ W, $31^{\circ} 44.192'$ N y a una profundidad de 12 metros. En los puntos localizados dentro de la BTS se colocaron diferentes aparatos que proporcionan los parámetros más importantes del oleaje y de viento.

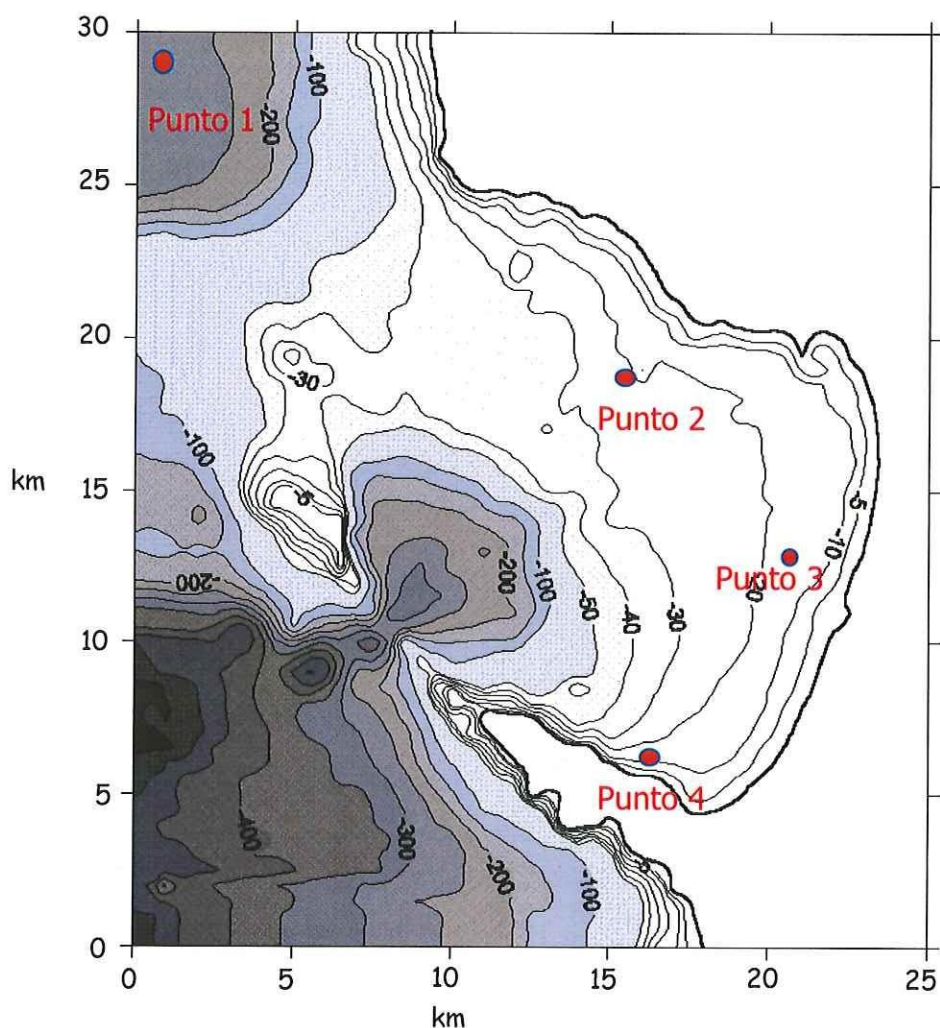


Figura 3. Localización de los puntos de comparación dentro y fuera de la bahía.

5.2 TIPOS DE APARATOS

Se utilizaron tres diferentes aparatos para la obtención de los parámetros del oleaje dentro de la BTS, los cuales sirvieron para compararlos con los resultados del modelo y hacer su validación.

En el punto número dos (PM) se instaló una boya meteorológica. Esta boya es fabricada por la compañía Aanderaa Instruments y es una Boya de Monitoreo Costero modelo CMB 3280. Esta equipada con sensores de altura y período del oleaje, dirección y velocidad de la corriente, temperatura del agua y la mayoría de los parámetros meteorológicos importantes. Para mayor información acerca del funcionamiento, instalación y/o mantenimiento de esta boya, se hace referencia al manual de operación de la Boya de Monitoreo Costero 3280, Descripción Técnica TD 180, (1999); este manual puede ser obtenido en la Internet, en la siguiente dirección: www.aanderaa.com.

En el punto número tres se instaló un ADP (Acoustic Doppler Profiler) a 116 metros de profundidad, el cual es capaz de calcular el espectro direccional del oleaje pasando sobre él. El ADP, de la compañía SonTek, pertenece a un grupo de instrumentos conocidos como ADCP's (acoustic Doppler current profilers), los cuales miden la velocidad del agua usando el principio físico conocido como el efecto Doppler. A mediados de los 90, la introducción del ADP

expandió el uso de los ADCP's a aguas someras, reduciendo los costos y mejorando la toma de datos en zonas costeras, estuarios, lagos y ríos. El nivel del agua y el espectro de energía del oleaje son tomados por el sensor de presión RTP (Resonant Pressure Transducer), que haciendo uso de métodos estándares de la teoría linear simple, estima los valores del espectro y sus propiedades integradas. La compra del ADP incluye el software necesario para el tratamiento de los datos, así como su visualización y almacenaje. Al combinar el espectro de energía del oleaje y las velocidades de la corriente sobre el aparato, el software de postprocesado de los datos incluye una parte capaz de calcular el espectro direccional del oleaje con el que se puede obtener la dirección del pico espectral. Para mayor información acerca del funcionamiento, instalación y/o mantenimiento de este aparato, se hace referencia al manual de operación del ADP™ (Acoustic Doppler Profiler) Firmware versión 7.1 (2001) y que también se puede obtener de la Internet, en la siguiente dirección: www.sontek.com.

En el punto número cuatro se utilizaron los datos del sensor de presión Wave and Tide Recorder WTR 9 de la compañía Aanderaa Instruments, el cual es un instrumento de alta precisión capaz de medir los parámetros de oleaje basándose en mediciones de la presión hidrostática de la columna de agua sobre él. Para mayor información acerca del funcionamiento, instalación y/o mantenimiento de este aparato, se hace referencia al manual de operación del

sensor de presión WTR 9 Descripción Técnica TD 194, (2001) y que también se puede obtener de la Internet, en la siguiente dirección: www.aanderaa.com.

Estos aparatos proporcionan datos reales de las condiciones del oleaje para el momento de la medición, generando series de tiempo de estos datos. La etapa de traslape en la que midieron estos datos (del 29 de noviembre del 2001 al 22 de diciembre del mismo año) se uso para obtener los valores a comparar con los resultados del modelo y realizar su validación, por lo que se les puede llamar datos de validación o comparación.

Del sensor de presión se obtiene la altura significativa (H_s ; el promedio del tercio de olas más grande) y el período promedio de cruces por cero ($TM02$), el cual corresponde al período promedio de los cruces ascendentes de la ola por un cierto *datum*, por ejemplo el nivel medio del mar (n.m.m.). Del ADP se obtiene la altura significativa y el período y dirección del pico espectral (H_s , T_p y θ_p). De la boya meteorológica se extrajeron los datos de la intensidad y dirección del viento (u y θ_u para el momento en que se realizaron cada una de las simulaciones. Estos datos sirvieron para poder generar el oleaje local en el modelo (modo de generación) y tratar de igualar los datos tomados en la bahía por los aparatos en ocasiones en las que se estuviera generando oleaje local. De esta boya también se obtiene la altura significativa y el período promedio de crestas ($TM24$), el cual representa el período de cada una de las olas que pasan

debajo de la boya, resultando en un número mayor de olas con las cuales promediar (sobre todo en el caso en el que se presenta oleaje local). Las implicaciones de este problema son tratadas en las discusiones.

5.3 LOS DATOS DE ENTRADA AL MODELO

A los datos de entrada del modelo, correspondientes a los parámetros del oleaje en aguas profundas, se les llama condiciones iniciales. Estos datos se adquirieron de la Internet (www.cdip.ucsd.edu), y fueron tomados de las series de tiempo adquiridas por la boya localizada en la plataforma de Harvest (figura 4), frente a las costas de California, E.U.A, con coordenadas geográficas: $34^{\circ} 27.467$ N $120^{\circ} 46.820$ W, y una profundidad de 548 metros. (figura 4d). Esta boya es atendida y mantenida por el programa estadounidense: Coastal Data Information Program (CDIP), y es una boya direccional, o sea que proporciona H_s , T_p y θ_p en el punto en el que se encuentra (estos datos son obtenidos ya tratados y listos para usarse).

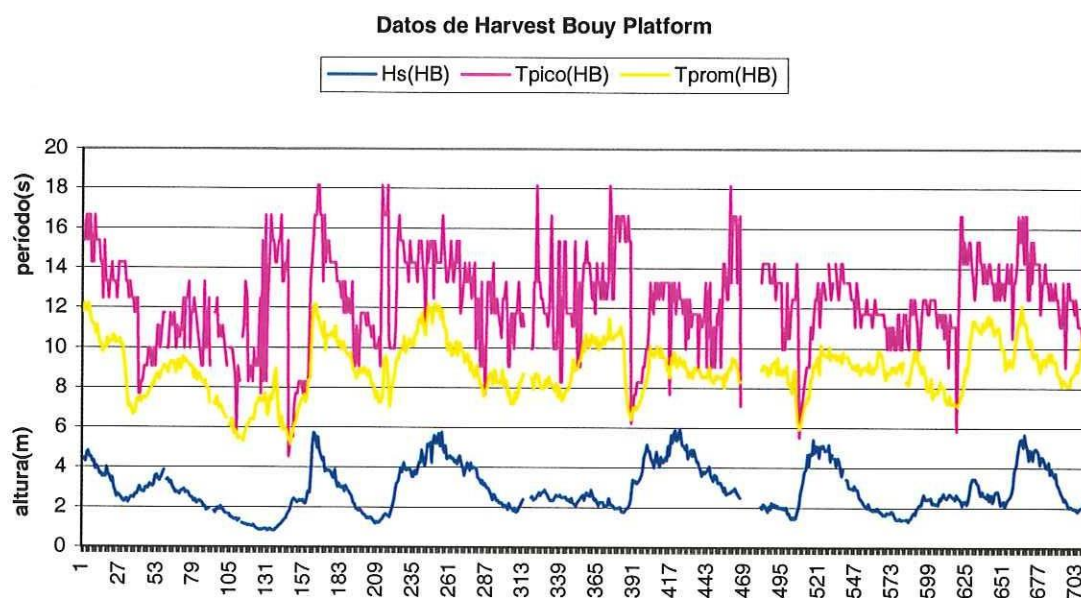


Figura 4. Series de tiempo de Hs, Tprom y Tp tomadas por la boya de Harvest.

En realidad esta no es la boya más cercana a la entrada de la bahía. El programa estadounidense: National Data Buoy Center (NDBC) tiene una boya no direccional fuera de las costas de Tijuana que se encuentra aún más cerca de la BTS que la boya anteriormente mencionada, la del CDIP. Sin embargo al ser una boya no direccional, no cuenta satisfactoriamente con los requerimientos necesarios para solucionar el problema de los datos de entrada al modelo numérico (las condiciones iniciales), ya que como se mencionó con anterioridad, uno de los parámetros más importantes en la descripción del oleaje es precisamente su dirección.

Fue necesario realizar un análisis previo de los datos para encontrar las situaciones en donde se pudiera explicar el oleaje que estuviera llegando a la

costa, con tan solo un “swell” entrando por el lado noroeste de la bahía, entre la isla norte de Todos Santos y Punta San Miguel (situación característica de invierno). Sería conveniente que se realizaran pruebas posteriores para el caso característico de verano: oleaje entrando por el lado suroeste de la bahía, entre Punta Banda y la isla sur de Todos Santos, y para el caso en el que se encuentran dos diferentes “swells” entrando por el lado suroeste y noroeste de la bahía, situación que puede encontrarse en algunos días de verano. Este trabajo no trata estos periodos de tiempo debido a la falta de datos en los aparatos para compararlos con el modelo. Sin embargo, los resultados preliminares en la simulación de estos casos, indica que concuerdan con las observaciones antes hechas.

También fue necesario encontrar días de fuertes vientos intensos en los que no se pudiera representar el oleaje que llega a la costa con tan solo propagar el que entró a la bahía, por lo que fue necesario implementar el modo de propagación y generación. Para lograr esto, y bajo ciertos conocimientos teóricos del tema, se hizo una selección de los datos que pudieran representar estas condiciones, por ejemplo un día con oleaje de período corto y mucha energía correspondiendo a fuertes vientos (o sea, que se está generando oleaje en ese lugar).

5.4 LAS SIMULACIONES.

Para hacer las simulaciones, se utilizó el modelo numérico de oleaje: SWAN Cycle III, versión 40.11. El modelo fue corrido en modo estacionario (sin el término temporal, lo que reduce la ecuación de balance de acción del oleaje), bidimensional y en coordenadas cartesianas, utilizando una malla computacional georeferenciada (matriz numérica en donde se realizaron los cálculos) de 25 por 30 kilómetros, correspondiendo al área de la Bahía de Todos Santos. A esta malla computacional se le superpuso una malla con los valores del fondo batimétrico (figura 3). Estos valores fueron digitalizados anteriormente de un portulano expedido por el gobierno estadounidense para la zona de la BTS y Punta Banda, en la península de Baja California, y cuya base de datos, ya interpolada, es del dominio público. Esta matriz de batimetría consta de cincuenta por sesenta puntos lo cual equivale a una resolución espacial de 500 x 500 metros aproximadamente. Las condiciones de frontera (condiciones a las que estuvo sujeta la evolución del espectro) se introdujeron mediante un archivo de comandos, en donde se especificó la velocidad y dirección del viento y las condiciones del oleaje entrante a la bahía representadas por un espectro de oleaje.

Este espectro puede ser introducido al modelo de dos maneras: la primera es darle los puros valores estadísticos con alguna función que defina la

forma de ese espectro, tanto en frecuencia como en dirección; para la realización de este trabajo, esta función fue representada por el espectro de JONSWAP. La segunda es darle el espectro mismo, esto es, decirle al modelo cuanta energía por banda de frecuencia y en que dirección queremos que meta al modelo. Lo cual representaría de manera mas completa la forma real del espectro. La obtención del espectro de energía (tanto direccional como no direccional) se hace mediante el procesado de los datos obtenidos de un sensor de presión, y se puede hacer en un laboratorio con una computadora o tener aparatos que tengan un procesador integrado y se obtenga el espectro de energía directamente del aparato. Los datos correspondientes a la boya de Harvest adquiridos de la Internet ya están procesados, por lo que se puede obtener tanto los valores estadísticos, como el espectro de energía para ese lugar. Sin embargo, para la realización de este trabajo se utilizó el período y dirección del pico espectral y la altura significativa como entradas del modelo. Mas adelante se discute por qué es mejor hacerlo de esta forma.

En el archivo de comandos también debe de especificarse el tipo de conceptos (de la física para representar el oleaje) que se utilizarán en los cálculos y así observar su evolución dentro de la bahía. Para este trabajo se utilizaron los procesos de generación: representada por el esfuerzo del viento en la superficie del agua; propagación: a través del espacio y con los respectivos cambios en dirección debido a la refracción; y disipación: por "*whitecapping*",

fricción con el fondo, reflexión, e interacciones no lineales de tercer orden, pues ha sido probado que para la zona costera, este tipo de interacciones funciona mejor que las cuádruples (Young, 1999).

6. RESULTADOS

Las figuras 5 y 6, muestran la variabilidad temporal de la altura significativa (H_s) en Harvest Buoy (HB), El Ciprés (EC) y Punta Banda (PB) y el período promedio (T) en Harvest Buoy (HB) y El Ciprés (EC) respectivamente. Estas figuras están graficadas contra el número de datos reportados cada hora a partir del inicio de las mediciones. Como se observa, el comportamiento de las variables resultó ser muy similar en todos los puntos de medición, sin embargo, la magnitud cambió de lugar a lugar. Como podría esperarse, las alturas reportadas en HB son mayores, debido a que no hay disipación de energía por efecto del fondo, que en EC o PB, donde se presenta el efecto de someramiento. Por lo tanto, explicar al menos una parte de lo que pasa aquí en la Bahía con lo que está pasando fuera de ella, no es descabellado. En la figura 5 se advierte que a mayor altura del *swell* entrante a la bahía, mayor será la diferencia entre los datos de altura reportados por HB y los reportados por la estación 3 en EC y la 4 en PB.

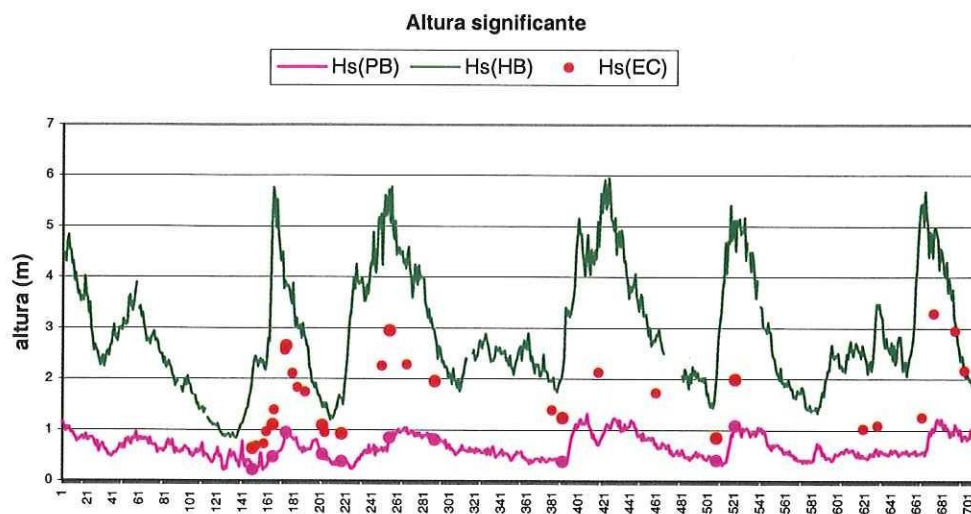


Figura 5. Altura significativa para HB, EC y PB. Los puntos rojos y morados más grandes representan los momentos que fueron simulados.

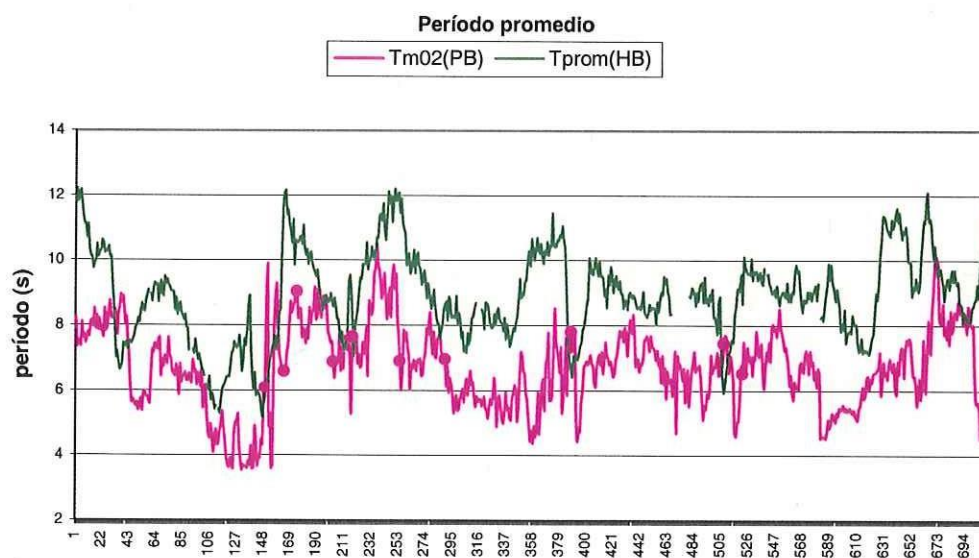


Figura 6. Período promedio para HB y PB. Los puntos morados más grandes representan los momentos que fueron simulados.

La figura 7, muestra el período del pico espectral para Harvest Buoy y El Ciprés, aunque solo se muestran algunos puntos con los cuales se pueda decir algo de ellos, también se observa la misma tendencia de las gráficas anteriores. La tendencia de los datos reportados por los diferentes aparatos dentro de la bahía, apoya la suposición de que lo que pasa dentro de la Bahía, es consecuencia de lo que pasa afuera de ella; más adelante se tomará el tema de la atenuación.

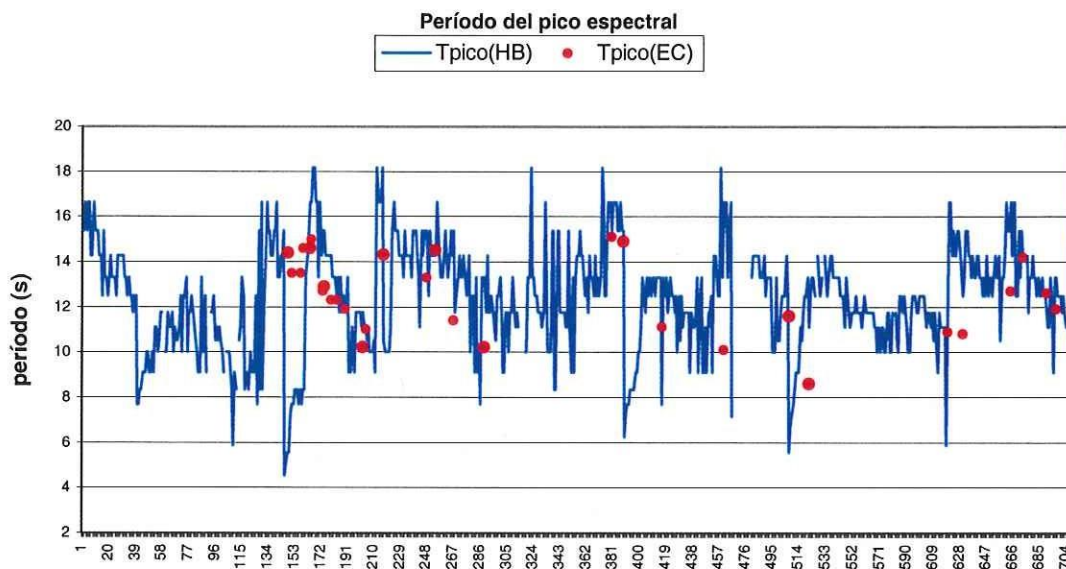


Figura 7. Período del pico espectral medido en HB y EC. Los puntos rojos más grandes representan los momentos que fueron simulados.

Con el fin de mostrar la diferencia entre el período promedio de crestas (TM24) y el período de cruces por cero (TM02) y argumentar el no haber utilizado los datos de la boya meteorológica (tema a discutir mas adelante), la figura 8 muestra las series de período promedio para Punta Morro y Punta

Banda, donde se observa claramente la gran diferencia que hay entre el período promedio reportado por la boya meteorológica y el sensor de presión, esto debido a la forma en que reportan dichos datos: el período reportado por la boya meteorológica es mucho menor, pues es el período promedio de las crestas (TM24); en cambio el período el sensor de presión en Punta Banda reporta el período de cruces por cero (TM02).

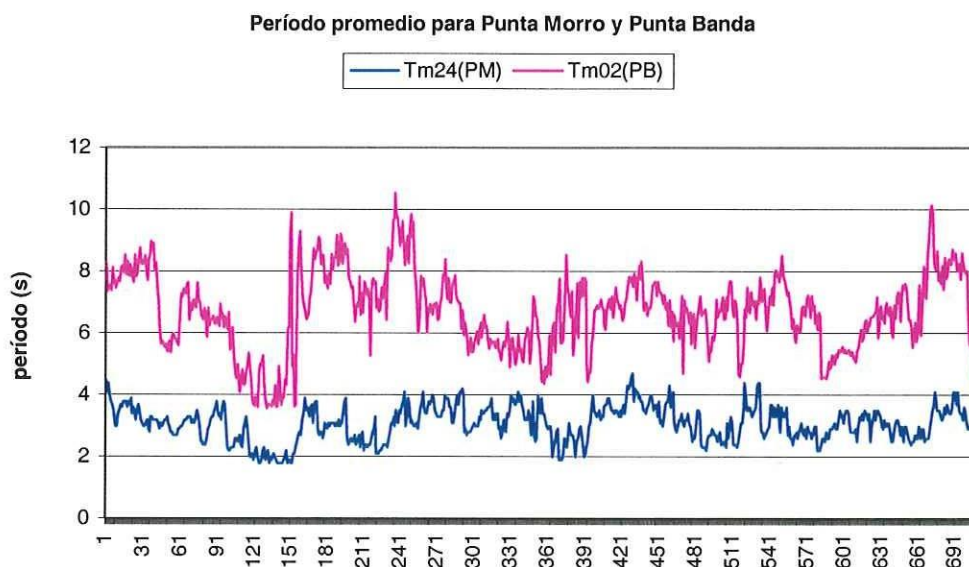


Figura 8. Período promedio medido en PM y PB.

La figura 9 muestra los datos de altura significativa reportados por la boya meteorológica en PM y el sensor de presión WRT9 en PB, en ella se puede ver la similitud en las funciones que representa cada línea e incluso en la magnitud de las mismas. Esta es otra razón por la cual no se utilizó la información

correspondiente a la boya meteorológica. Esto se discute con mayor detalle mas adelante.

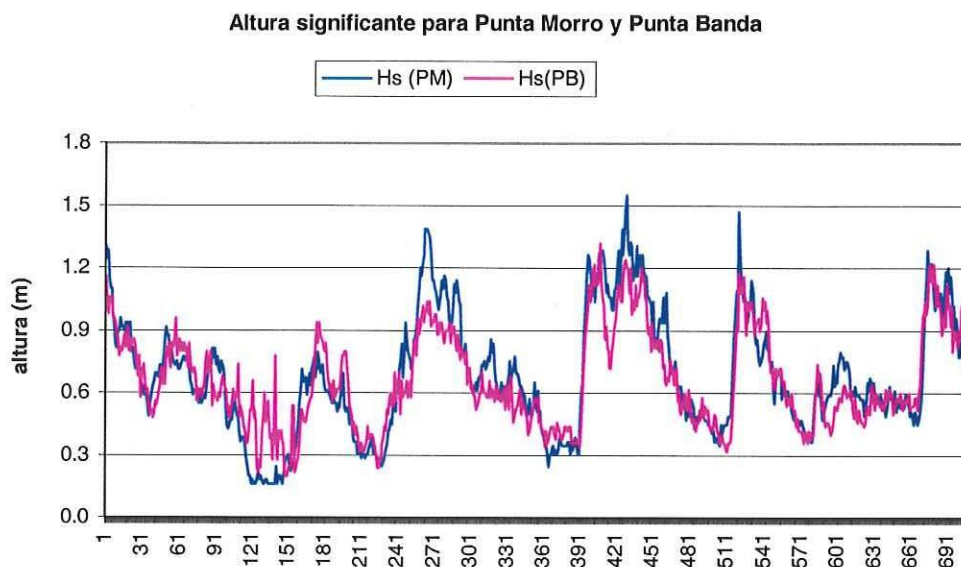


Figura 9. Altura significativa medida en PM y PB.

6.1 CORRELACIONES

Para evidenciar de una manera más convincente que las características del oleaje cambian al entrar a la bahía, situación que se simuló con el modelo utilizando los diferentes parámetros físicos antes mencionados, se obtuvo el coeficiente de correlación. Las figuras de correlación se clasificaron en dos grupos: las de entrada y las de salida. Las primeras (figuras 10, 11, 12 y 13), obtenidas de la Tabla 2, corresponden a la correlación entre los datos de entrada del modelo y a los obtenidos por los aparatos para explicar el cambio en

los parámetros de oleaje al entrar a la bahía. De acuerdo a la teoría lineal del oleaje y al proceso de refracción, se esperan ciertos cambios de estas condiciones al entrar a la bahía: en la altura significativa se espera un cambio debido al someramiento, en cuanto al período del pico espectral no se espera cambio alguno, pues a diferencia del período promedio, éste no cambia (bajo condiciones de *swell*). La mayor diferencia se espera en la correlación de la dirección del pico espectral entre HB y EC, pues al ser refractado por la batimetría al acercarse a la costa, tiende a orientarse dentro de un intervalo de direcciones mucho menor. En éstas no está incluida la gráfica de correlación del período promedio entre HB y PB. En las discusiones se menciona por qué.

Tabla 2. Correlación de los datos de oleaje de agua profunda (HB) como entrada al modelo y los reportados por los aparatos dentro de la Bahía (EC, PB).

Hs(HB)	Hs(EC)	Tpico(HB)	Tpico(EC)	Dir(HB)	Dirpico(EC)	Hs(HB)	Hs(PB)
0.88	0.625	14.29	14.4	269	272.3	0.88	0.36
1.44	1.1	14.29	14.6	292	272.7	1.44	0.46
1.92	1.08	10	10.2	291	274	1.92	0.52
1.42	0.92	14	14.3	307	270	1.42	0.38
3.85	2.95	14.29	14.5	297	220.5	3.85	0.84
3.11	1.95	10	10.2	299	276.9	3.11	0.80
2.28	1.23	14.29	14.9	311	270.6	2.28	0.38
1.59	0.84	11.76	11.6	309	274.8	1.59	0.40
3.94	1.99	9.09	8.6	316	277.7	3.94	1.08

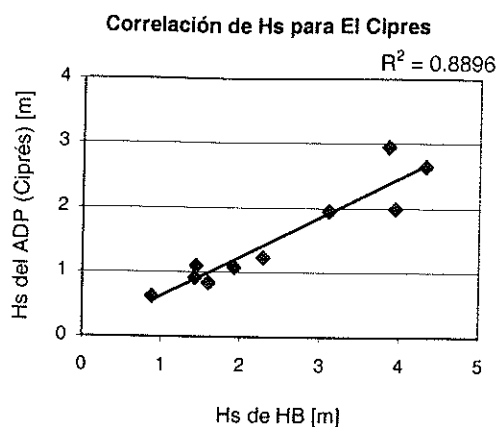


Figura 10.- Correlación entre los datos de Hs en agua profunda como entradas del modelo y los registrados por el ADP (Ciprés)

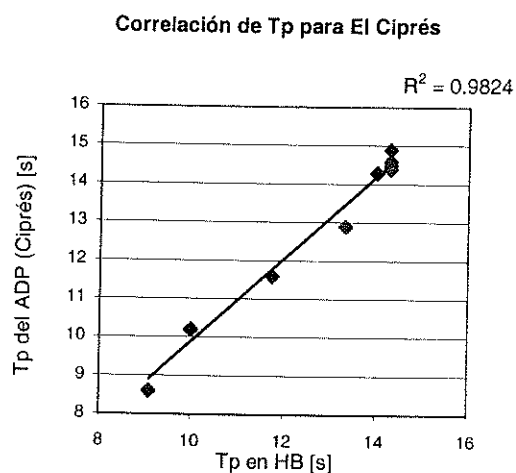


Figura 11. Correlación entre los datos de Tp de agua profunda como entrada del modelo y los registrados por el ADP (Ciprés)

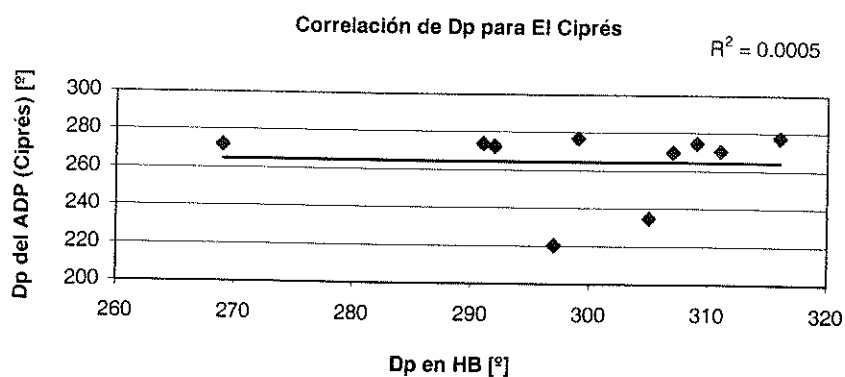


Figura 12. Correlación entre los datos de dirección del pico espectral de agua profunda como entrada del modelo y los registrados por el ADP (Ciprés)

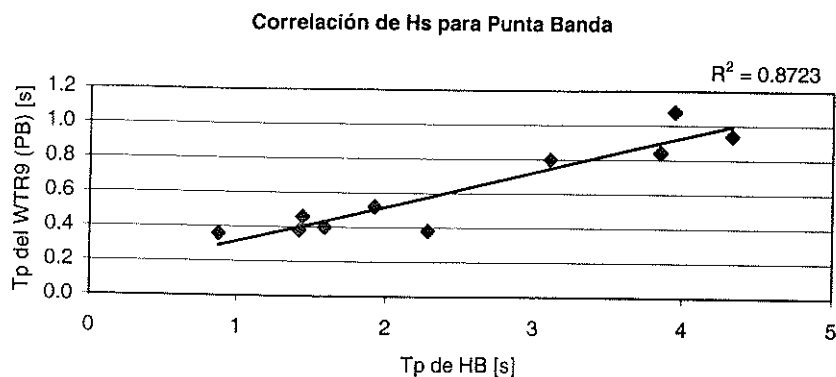


Figura 13. Correlación entre los datos de altura significativa de agua profunda como entrada del modelo y los registrados por el WTR9 (PB).

El segundo grupo de figuras de correlación (figuras 14, 15, 16, 17 y 18), cuyos valores se muestran en la Tabla 3, corresponden a las comparaciones entre las salidas del modelo y los datos reportados por los aparatos, siendo estas muy buenas para EC y buenas para PB. Estas correlaciones sirvieron para validar el modelo y es el argumento más fuerte para demostrar que, de los aparatos utilizados en este trabajo, el más compatible con los datos de HB y la forma de representar matemáticamente el oleaje en el SWAN, es el ADP, además se puede obtener de él la dirección del pico espectral.

Tabla 3. Resumen de los datos de salida para su comparación.

Hs(EC)	modelo	Tpico(EC)	modelo	Dirpico(EC)	modelo	Hs(PB)	modelo	Tp(PB)	modelo
0.625	0.61	14.4	14.94	272.3	270.84	0.36	0.35	4.50	5.21
1.1	1.07	14.6	14.94	272.7	269.48	0.46	0.52	6.58	5.99
1.08	1.09	10.2	10.15	274	274.04	0.52	0.81	6.88	6.51
0.92	0.86	14.3	14.94	270	271.72	0.38	0.51	7.64	7.71
2.95	2.89	14.5	14.94	220.5	266.51	0.84	1.04	6.90	6.53
1.95	1.92	10.2	10.15	276.9	273.70	0.80	0.83	6.96	6.81
1.23	1.28	14.9	14.94	270.6	272.97	0.38	0.65	7.80	8.11
0.84	0.86	11.6	11.55	274.8	273.13	0.40	0.46	7.44	6.33
1.99	2.01	8.6	8.92	277.7	273.87	1.08	1.46	6.52	6.26

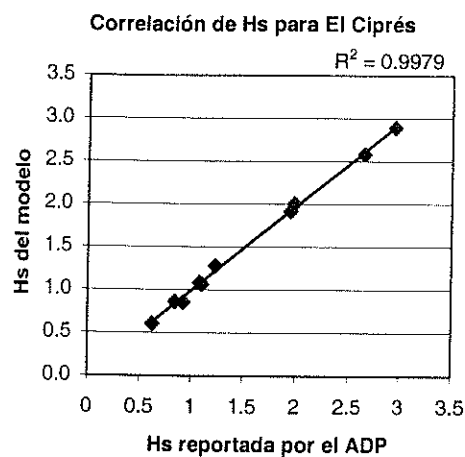


Figura 14. Correlación de Hs entre El Ciprés y el modelo.

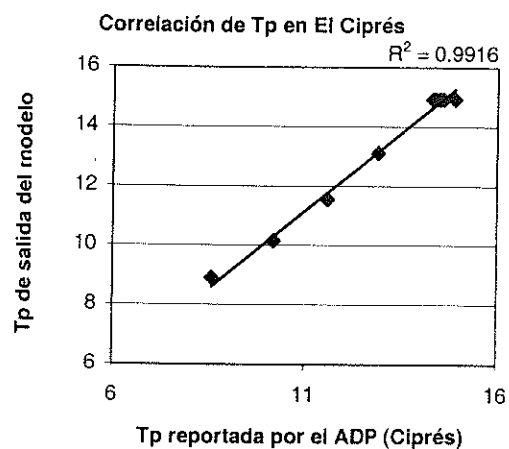


Figura 15. Correlación del período del pico espectral entre El Ciprés y el modelo.

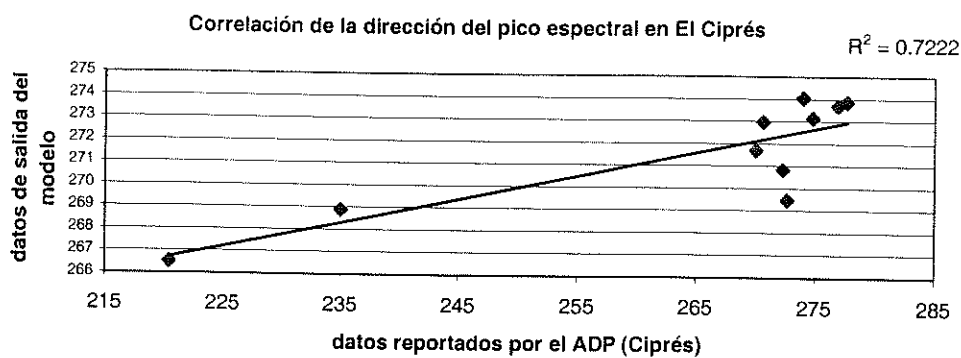


Figura 16. Correlación de la dirección del pico espectral entre EC y el modelo.

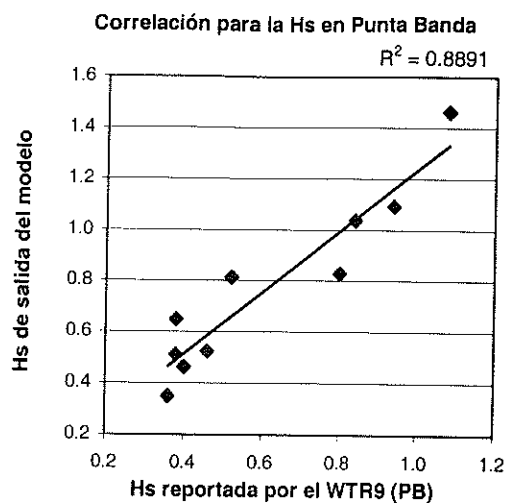


Figura 17. Correlación de altura significativa entre PB y el modelo.

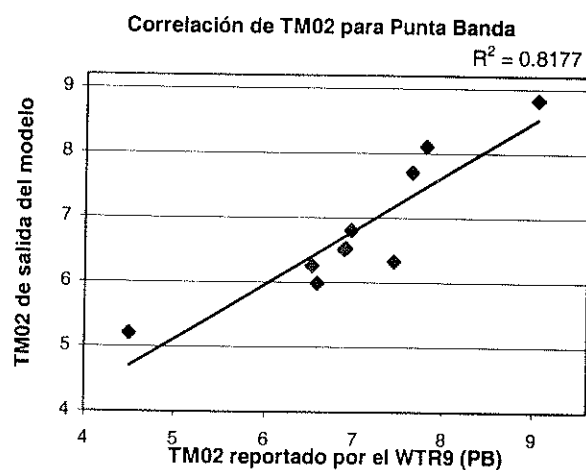


Figura 18. Correlación del período promedio entre Punta Banda y el modelo.

También se realizaron pruebas de hipótesis para dos muestras (la de los aparatos y la del modelo) de estas correlaciones para saber si la diferencia de las medias de cada una de las diferentes correlaciones era diferente de cero, encontrándose que, con excepción de una: Hs para PB, no hay evidencia estadísticamente significativa al 95% para decir que esta diferencia sea diferente

de cero, por lo que se concluye que las medias de cada comparación son iguales. Hay que recordar y tener en mente que lo que se pretende es efectuar una estimación de las características del campo de oleaje en BTS de una manera rápida, sencilla y de la manera más económica posible, por lo que hay que permitir cierta flexibilidad en los resultados.

6.2 SIMULACIONES

Como se mencionó en la metodología, para las simulaciones se usó el SWAN primero en segunda generación y después en tercera generación para incluir los efectos del viento. Se hicieron varias simulaciones para cada caso, tanto con o sin fricción, con o sin triadas, para períodos y alturas chicas y grandes, como para El Ciprés y Punta Banda. A continuación se presentan las corridas más representativas, en donde se observan mejor estos efectos, con el fin de ilustrar los efectos de los diferentes procesos sobre el oleaje. El modo en que corrió el modelo (3ª o 2ª generación) será indicado con el fin de identificar cada caso: con o sin viento.

Simulaciones de fricción en 2ª generación:

		Hs	Tpico	Dir			
entrada de HB		4.88	14.29	288			
2=Pmorro		0.86	3.10				
3=Cipres		2.95	14.5	220.5			
4=Pbanda		0.84	6.9				
		Hs	Hswell	TM01	TM02	Tpico	Dir
sin fricción	1.-	4.87	4.42	11.92	11.10	14.94	287.84
	2.-	3.62	3.30	11.99	10.84	14.94	260.26
	3.-	3.30	2.94	11.57	10.41	14.94	270.15
	4.-	2.03	1.66	10.00	8.50	14.94	323.35
con fricción MADSEN	1.-	4.87	4.42	11.92	11.10	14.94	287.84
	2.-	3.04	2.72	11.53	10.23	14.94	260.41
	3.-	2.45	2.13	11.01	9.56	14.94	267.87
	4.-	1.73	1.40	9.90	8.25	14.94	322.58
con fricción MADSEN	1.-	4.87	4.42	11.92	11.10	14.94	287.84
	2.-	3.24	2.92	11.71	10.47	14.94	260.35
	3.-	2.71	2.39	11.27	9.91	14.94	268.63
	4.-	1.83	1.49	9.98	8.39	14.94	323.09
con fricción JONSWAP	1.-	4.87	4.42	11.92	11.10	14.94	287.84
	2.-	3.45	3.13	11.76	10.37	14.94	260.21
	3.-	3.04	2.70	11.25	9.69	14.94	269.49
	4.-	1.97	1.59	9.73	8.05	14.94	323.60
con fricción JONSWAP	1.-	4.87	4.42	11.92	11.10	14.94	287.84
	2.-	3.53	3.21	11.93	11.00	14.94	260.35
	3.-	3.16	2.80	11.49	10.56	14.94	269.81
	4.-	2.00	1.63	10.12	9.16	14.94	323.63

Simulaciones de triadas en 2ª generación con periodo grande:

		Hs	Tpico	Dir			
entrada de HB		0.84	14.29	288			
2=Pmorro		0.16	2.00				
3=Cipres		0.63	14.4	272.3			
4=Pbanda		0.36	4.50				
		Hs	Hswell	TM01	TM02	Tpico	Dir
sin triadas	1.-	0.84	0.76	11.92	11.10	14.94	287.84
	2.-	0.62	0.57	12.07	11.15	14.94	260.13
	3.-	0.57	0.52	11.91	10.99	14.94	269.99
	4.-	0.36	0.32	11.36	10.43	14.94	324.84
con triadas	1.-	0.84	0.76	11.92	11.10	14.94	287.84
	2.-	0.62	0.57	12.15	11.27	14.94	260.18
	3.-	0.57	0.52	11.91	10.99	14.94	270.02
	4.-	0.36	0.32	11.30	10.38	14.94	324.81

Simulaciones de fricción en 3ª generación:

	Hs	Tpico	Dir	vel viento	dir viento
entrada de HB	0.94	14.29	295	1.79	207.09
2=Pmorro	0.16	2.00			
3=Cipres	0.625	14.4	272.3		
4=Pbanda	0.36	4.50			

		Hs	Hswell	TM01	TM02	Tpico	Dir
sin fricción	1.-	0.94	0.85	11.91	11.07	14.94	294.83
	2.-	0.67	0.61	11.71	9.53	14.94	260.96
	3.-	0.61	0.55	11.86	10.65	14.94	270.83
	4.-	0.41	0.36	11.25	10.27	14.94	324.93
con fricción MADSEN	1.-	0.94	0.85	11.91	11.06	14.94	294.83
	2.-	0.60	0.54	11.43	9.13	14.94	261.23
	3.-	0.51	0.46	11.42	10.14	14.94	269.39
	4.-	0.36	0.31	10.93	9.89	14.94	323.27
con fricción JONSWAP	1.-	0.94	0.85	11.91	11.08	14.94	294.83
	2.-	0.65	0.59	11.63	9.34	14.94	261.03
	3.-	0.58	0.53	11.73	10.42	14.94	270.46
	4.-	0.40	0.34	11.11	10.12	14.94	324.54
con fricción JONSWAP	1.-	0.94	0.85	11.91	11.06	14.94	294.83
	2.-	0.63	0.58	11.60	9.32	14.94	261.10
	3.-	0.56	0.50	11.66	10.48	14.94	270.17
	4.-	0.39	0.34	11.06	10.06	14.94	324.28

Simulaciones de triadas en 2ª generación con periodo pequeño:

	Hs	Tpico	Dir
entrada de HB	3.94	9.09	316
2=Pmorro	1.29	4.00	
3=Cipres	1.99	8.6	277.7
4=Pbanda	1.08	6.52	

		Hs	Hswell	TM01	TM02	Tpico	Dir
sin triadas	1.-	3.96	1.44	7.59	7.07	8.92	315.94
	2.-	2.06	0.74	7.38	6.84	8.92	273.53
	3.-	2.00	0.72	7.37	6.80	8.92	275.43
	4.-	1.91	0.63	7.27	6.72	8.92	320.41
con triadas	1.-	3.96	1.44	7.59	7.07	8.92	315.94
	2.-	2.06	0.74	7.39	6.85	8.92	273.52
	3.-	2.00	0.72	7.37	6.80	8.92	275.43
	4.-	1.92	0.62	6.94	6.34	8.92	320.24

Simulaciones de triadas en 3ª generación con periodo grande:

	Hs	Tpico	Dir	vel viento	dir viento
entrada de HB	0.84	14.29	288	4.18	325
2=Pmorro	0.16	2.00			
3=Cipres	0.63	14.4	272.3		
4=Pbanda	0.36	4.50			

		Hs	Hswell	TM01	TM02	Tpico	Dir
sin triadas	1.-	0.84	0.76	11.81	10.53	14.94	287.81
	2.-	0.67	0.57	6.76	4.09	14.94	263.24
	3.-	0.63	0.52	5.73	3.55	14.94	274.10
	4.-	0.47	0.32	3.69	2.59	14.94	328.27
con triadas	1.-	0.84	0.76	11.81	10.56	14.94	287.81
	2.-	0.67	0.57	6.80	4.11	14.94	263.26
	3.-	0.63	0.52	5.73	3.56	14.94	274.09
	4.-	0.46	0.32	3.69	2.58	14.94	328.11

Simulaciones de triadas en 3ª generación con periodo pequeño:

	Hs	Tpico	Dir	vel viento	dir viento
entrada de HB	3.94	9.09	316	4.18	325
2=Pmorro	1.29	4.00			
3=Cipres	1.99	8.6	277.7		
4=Pbanda	1.08	6.52			

		Hs	Hswell	TM01	TM02	Tpico	Dir
sin triadas	1.-	3.96	1.44	7.59	7.07	8.92	315.94
	2.-	2.05	0.76	7.07	6.09	8.92	271.90
	3.-	1.96	0.74	7.15	6.12	8.92	274.59
	4.-	1.78	0.64	7.33	6.32	8.92	321.53
con triadas	1.-	3.96	1.44	7.58	7.05	8.92	315.94
	2.-	2.18	0.76	6.18	5.11	8.92	266.64
	3.-	2.07	0.73	6.43	5.40	8.92	275.20
	4.-	1.86	0.63	6.46	5.43	8.92	322.49

Obsérvese como la fricción tiene efecto sobre la altura significativa, haciendo que ésta se reduzca y afectando también al período promedio, tanto del primer como del segundo momento. Al tomarse como procesos independientes, la fricción no tiene nada que ver con el viento. Por el contrario, con las triadas se puede ver cómo éstas afectan más a períodos pequeños que

a grandes; de igual forma afectan más a alturas pequeñas que a grandes. Sin embargo, influye más el período que la altura. Al incluir los efectos del viento sobre la zona de propagación, se aumenta o disminuye la altura y el período según la dirección e intensidad del viento con respecto a la dirección del oleaje: cuando son contrarios, se disminuyen, cuando van en la misma dirección, aumentan.

Con el fin de ilustrar mejor lo antes mencionado, se realizaron seis figuras más con el contenido de estas tablas. En ellas se presentan los valores reportados por los aparatos (tomados como lo esperado) y los resultados del modelo con diferentes procesos y funciones para representar el oleaje dentro de la BTS. De estas tablas y gráficas (así como de las demás simulaciones) también se tuvo conocimiento de los procesos físicos más importantes para cada una de las zonas de comparación, pues basándose en observaciones de campo, se esperaban fueran diferentes ya que la constitución del fondo es diferente para cada lugar haciendo que la fricción de la ola con el fondo sea desigual.

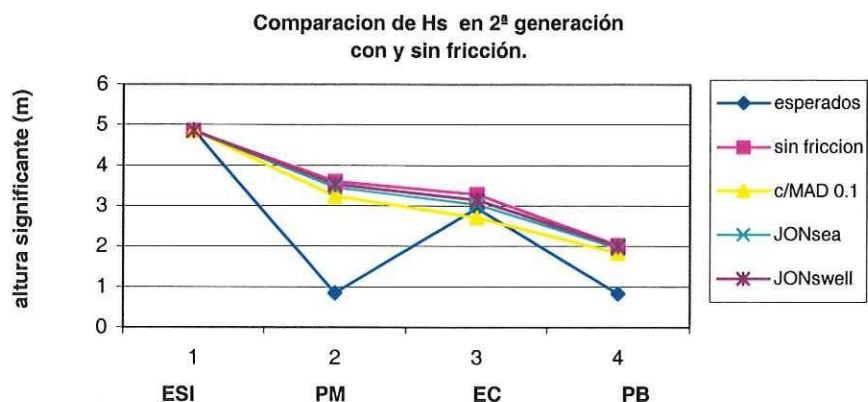


Figura 19. Comparación de Hs en 2ª generación.

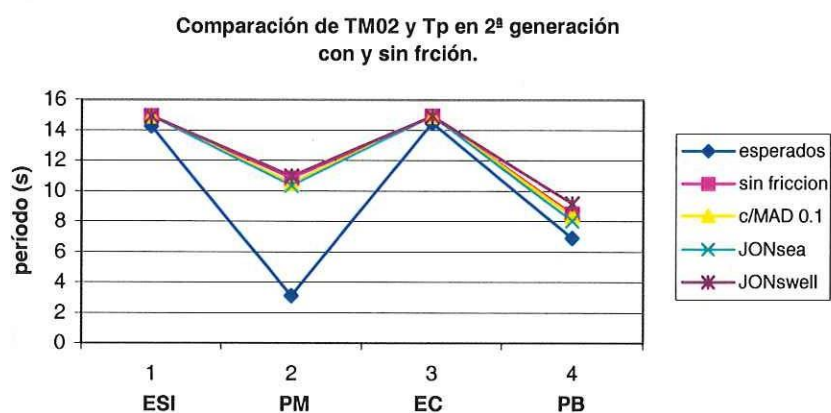


Figura 20. Comparación de períodos en 2ª generación.

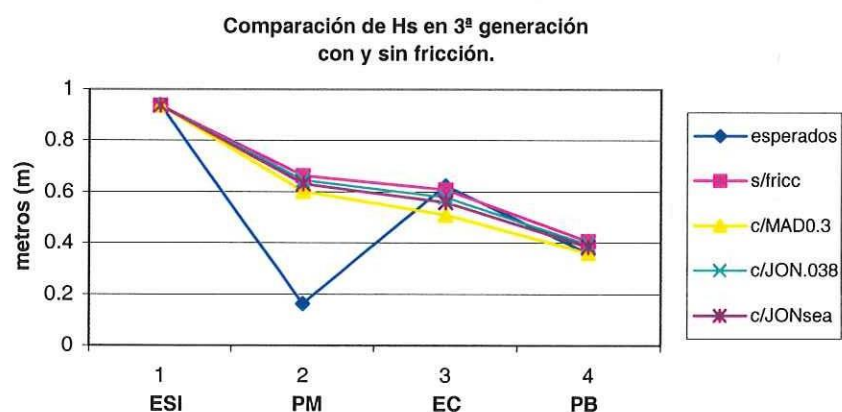


Figura 21. Comparación de Hs en 3ª generación.

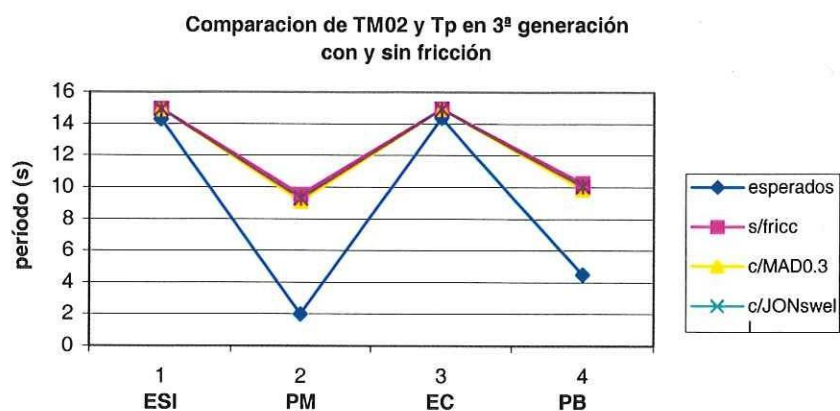


Figura 22. Comparación de períodos en 3ª generación.

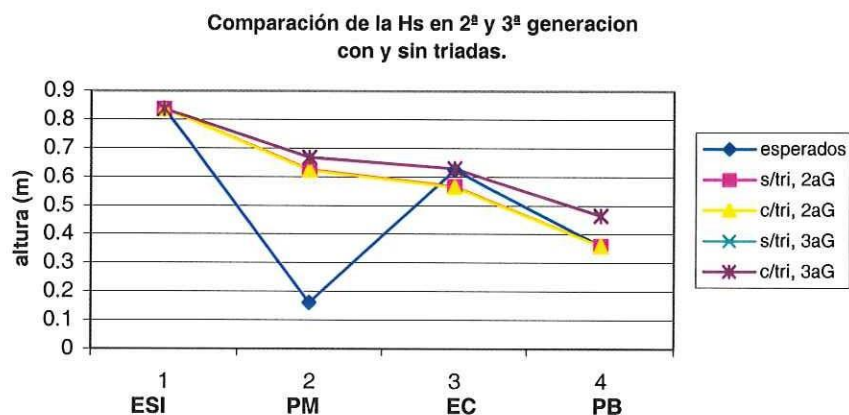


Figura 23. Comparación de Hs en 2ª y 3ª generación.

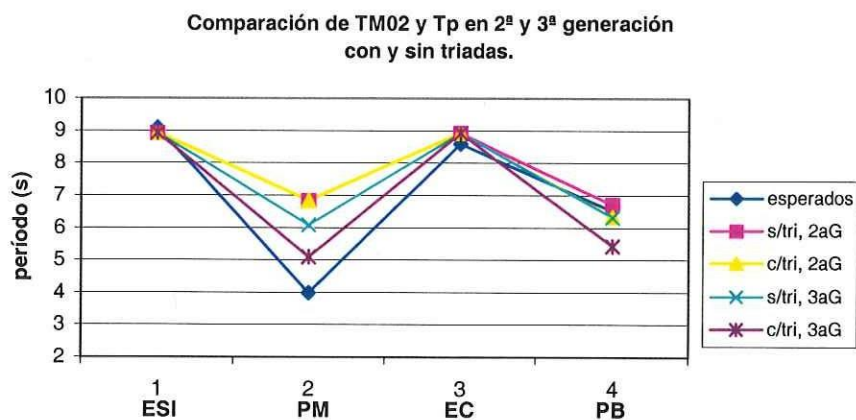


Figura 24. Comparación de períodos en 2ª y 3ª generación.

La Tabla 4 es un condensado de los datos que se utilizaron en las simulaciones para la validación del modelo en la BTS, en ésta se presentan los datos de entrada al modelo (tomados de HB), las salidas del modelo y los datos reportados por los aparatos dentro de la bahía. De los datos que se tenían se escogieron los que se pensó representarían mejor las condiciones del oleaje en el momento en que los aparatos los tomaron (pues recordemos que fueron tomados por diferentes aparatos), requeridas para validar el modelo, por ejemplo con una entrada de altura significativa alta: 4.32 m; con altura significativa pequeña: 0.88 m; con un período del pico grande: 14.29 s y uno pequeño: 9.09s.

Tabla 4. Condensado de datos. Los datos de entrada de oleaje al modelo y datos reportados por los aparatos (en negro) y los resultados numéricos finales del modelo (en azul).

fechas para las simulaciones		ENTRADAS (de HB)					ESPERADO (aparatos) SALIDAS (modelo)				
Num. de referencia	fecha	hr	Hs	Tpico	Dir	Tprom	Hs(PB)	Tp(PB)	Hs(EC)	Tpico(EC)	Dirpico(EC)
149	11/29/01	12	0.88	14.29	269	6.85	0.36	4.50	0.625	14.4	272.3
							0.35	5.21	0.61	14.94	270.84
165	11/30/01	4	1.44	14.29	292	5.9	0.46	6.58	1.1	14.6	272.7
							0.52	5.99	1.07	14.94	269.48
175	11/30/01	14	4.32	13.33	305	10.53	0.94	9.04	2.65	12.9	235
							1.09	8.83	2.58	13.13	268.90
203	12/1/01	18	1.92	10	291	8.57	0.52	6.88	1.08	10.2	274
							0.81	6.51	1.09	10.15	274.04
218	12/2/01	9	1.42	14	307	7.59	0.38	7.64	0.92	14.3	270
							0.51	7.71	0.86	14.94	271.72
255	12/3/01	22	3.85	14.29	297	11.75	0.84	6.90	2.95	14.5	220.5
							1.04	6.53	2.89	14.94	266.51
290	12/5/01	9	3.11	10	299	7.55	0.80	6.96	1.95	10.2	276.9
							0.83	6.81	1.92	10.15	273.70
389	12/9/01	12	2.28	14.29	311	10.19	0.38	7.80	1.23	14.9	270.6
							0.65	8.11	1.28	14.94	272.97
508	12/14/01	11	1.59	11.76	309	8.03	0.40	7.44	0.84	11.6	274.8
							0.46	6.33	0.86	11.55	273.13
522	12/15/01	1	3.94	9.09	316	7.21	1.08	6.52	1.99	8.6	277.7
							1.46	6.26	2.01	8.92	273.87

7. DISCUSIONES

Básicamente, la selección de los momentos a simular se hizo de acuerdo a la accesibilidad que se tuvo a los datos del ADP, o sea que se tomó en cuenta el período del pico espectral y la altura significativa. Por supuesto, los diferentes objetivos estipulados al principio del trabajo fueron de vital importancia en esta selección. Esta también se basó en la compatibilidad que debían presentar los datos de entrada al modelo, pues hay que recordar que fueron tomados con diferentes aparatos y en diferentes localidades.

Los datos de altura significativa y período de crestas reportados por la boya meteorológica frente a Punta Morro no fueron utilizados para la validación del modelo ya que además de reportar un período promedio inusual y no compatible con el modelo (como se vio en los resultados), se cree que la altura significativa reportada está subestimada, pues tomando en cuenta la profundidad a la cual se encuentra el punto de medición de este aparato y de acuerdo a la teoría lineal del oleaje, la altura en ese lugar debería de ser mayor. Esto concuerda con los resultados del modelo y con observaciones de campo realizadas durante el tiempo de duración de este trabajo. Estos valores, aun cuando siguen la misma función que los de Punta Banda (figura 9), parecen estar subestimados por alguna razón. Es posible que se deba a la forma misma de tomar los datos, o incluso debido a la manera en que el procesador del

aparato representa el oleaje. Sería conveniente que se realizara un estudio con el fin de determinar si esto es correcto.

El modelo es muy sensible a pequeños cambios tanto en los datos de entrada que se le van a dar (oleaje y/o viento), como en cuanto a la física que debe de tomar en cuenta en los cálculos (diferentes formulaciones y/o sus constantes). Por esto, hay que ser precavidos en la selección de los mismos y prudentes en la obtención de resultados.

La diferencia entre representar las olas en cruces por cero o por crestas, es precisamente la diferente representación de una ola en la computadora, digamos matemáticamente, y se debe a cómo toman los datos los aparatos. Esto provocó un problema en la utilización de los diferentes aparatos para la validación del modelo, ya que la representación de una ola en el SWAN está hecha con los cruces por cero y no por crestas, o sea que el SWAN puede dar el período del pico espectral o del primer momento (TM01) como el ADP y el del segundo momento (TM02) como el sensor de presión WTR9. La forma en que la boya reporta los datos no es una manera convencional de hacerlo, pues reporta el período asociado a las crestas o TM24, al sumar la generación de oleaje local a un "swell" entrando a la bahía, se incrementa mucho el número de olas que pasan debajo de la boya. Por esto, los datos de altura significativa y período

promedio obtenidos por la boya meteorológica en Punta Morro, no fueron utilizados, pues no había nada con que compararlos.

En la metodología se comentó que el representar las condiciones del oleaje en un punto con el espectro de densidad de energía era mejor que hacerlo con tan solo los valores estadísticos o el integrado del espectro, sin embargo de esta manera, se estaría introduciendo el espectro de un lugar muy lejano (en este caso la boya de Harvest, pues ya se vio que es la boya más cercana a la BTS), el cual representaría las condiciones del oleaje en ese lugar. Ahora bien, si se piensa en una situación en la que se estuviera generando oleaje en aquel lugar y se introdujeran las condiciones de un “océano creciente” como tal al modelo, se le estaría diciendo que es en la bahía donde se estuviera generando el oleaje, cosa que puede o no ser cierta y se estaría sesgando la información de entrada al modelo. En cambio, si se introducen los valores del pico espectral, se aseguraría una mejor representación del oleaje que en realidad viajó desde la boya de Harvest hasta la entrada de la bahía, ya que al ser el pico espectral la frecuencia con mayor energía, ésta sería la que llegaría primero. Basándose en el razonamiento anterior se pensó que sería mejor introducir los valores del pico espectral en lugar del espectro “completo”. Dejando así la posibilidad de ampliar los campos de mejoría en la metodología de este trabajo (esto se trata en las recomendaciones). Ya establecida la preferencia de manejar el período del pico espectral como entrada del modelo, la

respuesta al por qué no hay gráfica de correlación del período promedio saltasola, aun cuando tanto el SWAN como la boya de Harvest sean compatibles en la forma de representar el período promedio.

Una posible razón por la cual los valles o mínimos en los datos del período espectral reportados por el ADP y la boya de Harvest (figura 4) no coinciden en magnitud (el período del ADP no baja tanto), puede deberse a que los períodos cortos viajan más lento que los períodos largos (como fue mencionado anteriormente). Entonces, si tenemos un evento lejano seguido por otro al menos igual, o mayor, y que son captados primero por la boya de Harvest y luego por el ADP dentro de la bahía, la distancia que hay entre la posición de ambos aparatos haría que el segundo evento “alcanzara” las últimas frecuencias del primero. De ser el segundo evento uno de mayor período, el segundo sí alcanzaría al primero y en los datos del ADP estos eventos aparecen más juntos.

En los datos reportados por la boya de Harvest, Ciprés y Punta Banda, se observa que cuando las alturas son pequeñas, el error o la diferencia entre aparato y aparato es menor y viceversa: al aumentar la altura, las diferencias también crecen. Esto se debe a la profundidad a la que están los aparatos y a la forma en que toman los datos, pero sobre todo a cómo los reportan.

De las simulaciones realizadas, se vio que el modelo trabaja mejor para períodos del pico espectral grandes (de *swell*) que para períodos del pico espectral pequeños, ya que con un poco de generación de oleaje en la zona, al ser olas de períodos pequeños, éstas se ven interactuando rápidamente con olas casi del mismo tamaño. De igual forma se tuvo un poco de dificultad en la obtención de buenos resultados de altura para las localidades en una sola corrida del modelo, por lo que se sugiere se traten las localidades por separado. Esto puede ser debido al diferente peso que tienen los diferentes procesos que se deben de involucrar en la evolución del espectro para cada localidad, pues como se corroboró con observaciones de campo, las diferentes zonas de la BTS presentan diferentes características físicas que hacen que ciertos procesos sean más importantes que otros, por ejemplo el que el fondo sea de arena o de rocas, el que la pendiente sea abrupta o tendida, etc.

El método presentado aquí para realizar la estimación del campo de oleaje en la BTS, actualmente tiene en su desarrollo una cierta subjetividad, por lo tanto a mayor objetividad, se debe de permitir ampliar los márgenes de error. Por lo anterior, la interpretación de los resultados y de los procesos físicos involucrados en una mejor representación de la evolución del espectro, debe hacerse con precaución.

De todas las simulaciones que se hicieron para El Ciprés y Punta Banda, se hizo una selección de los procesos (y sus diferentes representaciones) con los cuales se representó mejor el oleaje en la bahía. Para el Ciprés se observó que con solo la propagación del oleaje, esto es sin la acción del viento (2ª generación), se obtenía buenos resultados, a excepción de días de intensos vientos. Esto se debe a que los valores reportados por el ADP son los valores del pico espectral, los cuales solo son afectados por oleaje local capaz de igualar los valores del pico espectral y para los valores de período de entrada al modelo, éste solo es generado por fuertes vientos.

En cuanto a la fricción se observó que para casos de solo propagación, bastaba con la formulación de Jonswap para swell (con un valor de 0.038) o la de Madsen con un valor de partículas de 0.05m, pues al ser una playa de arena extendida, la fricción que el fondo ejerce en la ola es menor y más pareja. Por el contrario, para Punta Banda se encontró que se requería del uso de una fuerza de fricción mayor (debido a las características del fondo en esta zona mucho más rocosa), por lo que se utilizó un valor de partícula de fondo de Madsen de 0.4 m.

Si bien es cierto que el estado actual de este método que involucra al SWAN es un tanto subjetivo y requiere de un poco mas de trabajo en la búsqueda de sus posibilidades y sobre todo en el método de elección de los

datos de entrada, también es cierto que así como esta operando hoy día en Ensenada, constituye una poderosa herramienta para la investigación y docencia que no puede dejar de aprovecharse. El SWAN entonces puede considerarse como un laboratorio de oleaje que con sus debidas consideraciones en la interpretación de los resultados, puede usarse en la resolución de problemas reales y necesidades de la zona costera.

8. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo está cumplido, el SWAN ya es operativo en Ensenada para el caso real de la Bahía de Todos Santos.

La validación del modelo se realizó satisfactoriamente con correlaciones y pruebas de hipótesis entre los datos obtenidos con el modelo y los reportados por los aparatos dentro de la BTS, y no se encontró evidencia estadísticamente significativa, al 95% de confianza, para decir que la diferencia entre las medias de cada uno (H_s , T_{prom} , T_p y θ_p de los aparatos y el modelo) sean diferentes a cero, por lo que se concluye que son iguales.

Se realizó con éxito la instalación y recuperación de datos de dos aparatos de medición: el ADP y la boya meteorológica. Así mismo, se realizaron varias simulaciones de cada uno de los casos de comparación propuestos, concluyendo lo siguiente:

- El modelo funciona bien en:
 - propagación del período del pico y altura significativa a lo largo de la bahía,
 - refracción del oleaje entrante (dirección),
 - generación de oleaje dentro de la bahía con un campo de viento sobre el mar

- y disipación de la energía del oleaje debido al someramiento y la fricción con el fondo.
- El modelo es muy sensible a cambios de:
 - entrada de datos (dirección e intensidad del viento, altura, período y dirección)
 - física involucrada en los cálculos

Se necesita mejorar el método para seleccionar los datos de entrada al SWAN, pues al ser tan sensible a cambios en estos datos, los resultados que arroja también cambian considerablemente.

Con la elaboración del primer grupo de correlaciones que se hicieron entre los datos de entrada al modelo (tomados de la plataforma Harvest) y los tomados dentro de la bahía (tomados en diferentes partes de ella), se corroboró lo antes estipulado: las condiciones del oleaje dentro de la bahía son consecuencia y están estrechamente ligadas a las condiciones del oleaje fuera de ella.

Se considera al ADP como el aparato que mejor funciona para el manejo del SWAN debido a la compatibilidad en el lenguaje que manejan el aparato y el modelo. También por que de él se obtiene el espectro direccional de densidad de energía del oleaje.

9. RECOMENDACIONES

- Poner un sensor direccional de oleaje fuera de la BTS para tener datos de oleaje fuera de las características de la bahía. Dos posibles lugares pueden ser entre la Isla norte de Todos Santos y Punta San Miguel para captar oleaje de invierno, y atrás de la Isla sur de Todos Santos para registrar oleaje de verano (se recomienda el ADP). Con esto se tomarían datos de oleaje exactamente fuera de la BTS, eliminando el problema de los datos de entrada.
- Hacer la comparación entre los datos de Harvest Buoy y los tomados por el sensor antes mencionado para validar la hipótesis de que aunque se parecen, es mejor tomar los datos del ADP justo en la entrada de la Bahía de Todos Santos.
- Iniciar una técnica que sea capaz de transmitir los datos del sensor cada hora (como los datos meteorológicos) para iniciar la automatización de la estimación del campo de oleaje en la BTS.
- Realizar un programa que automatice la toma de datos, la ejecución de la corrida en el SWAN y la presentación de los resultados.

REFERENCIAS

- Airy, G. B., 1845 **Tides and waves**. Encicl. Metrop, Londres.
- Beji, S. y Battjes, J.A., (1993). "Experimental investigation of wave propagation over a bar", **Coastal Eng.** 19, 151-162,.
- Beji, S. Y Battjes, J.A., (1994). "Numerical simulation of nonlinear wave propagation over a bar", **Coastal Eng.** 22, 1-16.
- Bishop, C.T. y Donelan, M.A. (1987). **Wave Prediction Models**. National Water Reserch Institute, Canada. 54 pp.
- Cardone, V.J. y Ross, D.B. (1979). "State-of-the-Art Wave Prediction Methods and Data Requirements." **Ocean Wave Climate**. Edit. por Marshall D. Earle y A Malahoff. 61 –91.
- Cavaleri, L. y Malanotte-Rizzoli, P. (1981). "Wind Wave Prediction in Shallow Water: Theory and Aplications." **Journal of Geophysical Research**. 21(C11): 10, 961 –10,973,
- CERC (1984) **Shore protection manual**. *U.S. Army Coastal Engineering Research Center*, 2 vols.
- Chao, Y.Y. (1989). "An Operational Spectral Wave Forecasting Model." **National Meteorological Center**, U.S.A. 240 –247.
- Dean, R.G. y Dalrymple, R.A., (1991). "Water wave mechanichs for engineers and scientists", **World Scientific**, 353 pp.
- Delgado-Puente, E. (1988). **Aspectos direccionales del oleaje en San Felipe, B.C.** Tesis Maestría. CICESE. B.C. 64pp.
- Eldeberky, Y. y Battjes, S.A. (1995.) "Parameterization of triad interactions in wave energy models", **Coastal Dynamics '95**, ASCE, 140-148,
- Hasselmann, S. y Hasselmann, K., (1985a). The wave model EXACT-NL. In **ocean wave modeling** (The SWAMP group) pp 249-251, Plenum Press, New-York,.

- Heras-Caballero, M.M. (1994). **On Variational Data Assimilation in Ocean Wave Models**. Tesis de doctorado. Universidad Utrecht, Holanda. 141pp.
- Hoolthuijsen, L.H., Booij, N., Ris, R.C., Haagsma, I.J.G., Kieftenburg, A.T.M.M. y Petit, H. (2000). **SWAN Cycle III** version 40.11. User Manual. Delft University of Technology. Holanda. 124pp.
- Holthuijsen, L.H. y Booij, N. (1986). "A Grid Model for Shallow Water Waves." **Coastal Engineering Conference**, Asce. 261 –270.
- Kinsman, B., 1965. **Wind Waves, their generation and propagation on the ocean surface**. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 676 pp.
- Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. y Jansen, P.A.E.M., (1994) **Dynamics and modeling of ocean waves**. Univ. Press, Cambridge. 532pp.
- Padilla-Hernández, R. (1993). **Predicción de oleaje mediante el modelo numérico de densidad espectro-angular DSA**. Tesis Maestría. CICESE. Eda., B.C. 87pp.
- Perrie, W. y Resio, D.T. (1990). **A Survey of Parametrizations of Dynamical Processes in Third Generation Wave Models**. Institute of Oceanography, Canada. 34 –42.
- Ponce de León-Alvarez, S. (1994). **Sensibilidad del modelo WAM a la variabilidad del viento**. Tesis Maestría. CICESE. Eda., B.C. 95pp.
- Puig-Donnelly, José M. (1999). **Estudio numérico de la transferencia de energía por interacciones no lineales en la evolución de espectros bimodales**. Tesis Maestría. CICESE. Eda., B.C. 93pp.
- Resio, D.T. y Cardone, V.J. (1983). **Design Waves for the Southern Gulf of Mexico**. Oceanweather, Inc. U.S.A. 161pp.
- Ris, R.C. (1997). "Spectral modelling of wind waves in coastal areas." **Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering**. Delft University of Technology. 160pp.

- SWAMP Group, (1985). **Ocean wave modeling**. Plenum Press, New-York, 256pp.
- Uji, T., "Numerical estimation of the sea wave in a typhoon area". Papers in **Metheorology and Geophysics**. 26, 199-217, 1975.
- Vega-Puente, Rolando, S. (1999). **Análisis numérico del ancho del espectro direccional del oleaje en regiones cercanas a la costa**. Tesis Maestría. CICESE. Eda., B.C. 54pp.
- Vincent, C.L. (1982). "Shallow-Water Wave Modeling." First International Conference of Meteorology and Air/Sea Interaction of Coastal Zone. Holanda. 87 –95.
- WAMDI Group, (1988). **The WAN Model –A Third Generation Ocean Wave Model**. American Meteorological Society. 18(4): 1775 –1810.
- Young, I.A.. "A Shallow Water Wave Model." **Journal of Geophysical Research**, 93(C5): 5113 –5129, 1988.
- Young, I. R. (1999). **Wind Generated Ocean Waves**. Elsevier, Oxford, U.K., 288 pp.

