

Reporte Técnico

Resultados de las observaciones de las Boyas Oceanográficas y de Meteorología Marina (BOMM)



Grupo de Oleaje
Departamento de Oceanografía Física
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior
Ensenada, B.C., México

23 de abril de 2019
Elaboró: D.S.P. Zapata
Revisión 1.0

Índice

1. Introducción	3
2. Procesamiento de los datos	3
3. Resultados	5
3.1. BOMM1-ITS	5
3.2. BOMM2-ITS	8
3.3. BOMM1-PER	12
4. Comentarios finales	17

1. Introducción

En este reporte técnico se presenta una descripción detallada del conjunto de datos observados con las Boyas Oceanográficas y de Meterología Marina (BOMM). En el Cuadro 1 se presentan el período de observación y localización de cada una de las BOMM analizadas en el presente reporte.

Cuadro 1. Período de observación y localización de las BOMM analizadas en el presente reporte.

Boya	Lugar	Coordenadas	Fechas
BOMM1-ITS	Isla Todos Santos, Ens.	116.84W; 31.82N	2017/11/17 - 2018/01/31
BOMM2-ITS	Isla Todos Santos, Ens.	116.84W; 31.82N	2018/03/03 - 2018/06/19
BOMM1-PER	Perdido, Golfo de México	96.62W; 24.60N	2018/07/11 - 2019/02/27

2. Procesamiento de los datos

En esta sección se hace una descripción del procedimiento llevado a cabo para la generación de los datos del segundo nivel de procesamiento. Se explican los métodos y algunas consideraciones.

Parámetros del oleaje

El cálculo del espectro direccional del oleaje permite la estimación de diferentes parámetros. En este caso se calcularon los principales. La altura significante del oleaje se estimó como:

$$H_{m0} = 4 \left[\iint E(f, \theta) d\theta df \right]^{1/2}, \quad (1)$$

esta es una medida directa de la energía de las olas. Igualmente, el período asociado al pico espectral y su dirección se calcularon usando una estimación robusta para evitar la dependencia de la resolución espectral:

$$T_p = \frac{\int S(f)^4 df}{\int f S(f)^4 df}, \quad \theta_p = \frac{\int \Theta(\theta)^4 d\theta}{\int \theta \Theta(\theta)^4 d\theta}, \quad (2)$$

donde $S(f) = \int E(f, \theta) d\theta$ y $\Theta(\theta) = \int E(f, \theta) df$ son los espectros integrados en dirección y en frecuencia, respectivamente. La dirección promedio del oleaje se calculó como:

$$\bar{\theta} = \tan^{-1} \left\{ \frac{\iint E(f, \theta) \sin \theta d\theta df}{\iint E(f, \theta) \cos \theta d\theta df} \right\}. \quad (3)$$

Otro de los parámetros más importantes del oleaje es la deriva de Stokes. En este caso se calculó la deriva de Stokes en la superficie a partir del espectro integrado en dirección como:

$$U_s(z) = \frac{16\pi^3}{g} \int f^3 S(f) e^{2kz} df. \quad (4)$$

Una recomendación es que se calcule la deriva de Stokes a partir de las componentes del espectro direcciones, es decir,

$$\mathbf{U}_s(z) = U_s \hat{\mathbf{x}} + V_s \hat{\mathbf{y}} \quad (5)$$

$$\mathbf{U}_s(z) = \frac{16\pi^3}{g} \left[\hat{\mathbf{x}} \iint f^3 E(f, \theta) \cos \theta e^{2kz} d\theta df + \hat{\mathbf{y}} \iint f^3 E(f, \theta) \sin \theta e^{2kz} d\theta df \right] \quad (6)$$

donde $\hat{\mathbf{x}}$ y $\hat{\mathbf{y}}$ representan los vectores unitarios en el plano cartesiano.

Parámetros del flujo de momentum

El flujo de momentum entre el océano y la atmósfera se estima a partir de la velocidad de fricción, la cual a su vez es calculada en función de las fluctuaciones turbulentas de la velocidad del viento, que se miden con el anemómetro sónico. En ese orden de ideas, lo primero que se hace es rotar el sistema de coordenadas del anemómetro en la dirección del viento promedio de un intervalo de 10 minutos (o 30 minutos). Con esto se garantiza que $\bar{V} = \bar{W} = 0$. El flujo de momentum en dirección del viento promedio es entonces calculado a partir del esfuerzo de Reynolds en la misma dirección, es decir, $\tau_x = -\rho_a \bar{u'w'}$. Análogamente, el esfuerzo del viento en la dirección perpendicular es $\tau_y = -\rho_a \bar{v'w'}$. Estas correlaciones se calcularon simplemente como:

$$\bar{u'w'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U - \bar{U})(W - \bar{W}), \quad (7)$$

y,

$$\bar{v'w'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V - \bar{U})(W - \bar{W}). \quad (8)$$

donde N es el número de datos. La velocidad de fricción en el aire se calculó como:

$$u_* = \left(\bar{u'w'}^2 + \bar{v'w'}^2 \right)^{1/4}, \quad (9)$$

y su análoga en el agua, considerando conservación del flujo momentum en la interfase, como:

$$w_* = u_* \sqrt{\rho_a / \rho_w}, \quad (10)$$

donde ρ_a representa la densidad del aire y ρ_w la del agua, las cuales fueron calculadas usando la ecuación de estado de TEOS10 implementada en python (<http://www.github.com/TEOS-10/GWS-python>)

La longitud de estabilidad de Monin-Obukhov define la distancia a la cual los efectos de la turbulencia debida al corte del flujo medio se igualan a los de la turbulencia producida por la flotabilidad. Este parámetro se calcula como:

$$L = \frac{T_s u_*^3}{\kappa g w' T'_s} \quad (11)$$

Cuando $z/L > 0$ se considera que las condiciones atmosféricas son estables¹, mientras que cuando $z/L < 0$, las condiciones son inestables. Si $z/L \sim 0$, entonces se dice que las condiciones son neutrales, por lo tanto, siguiendo la ley de la pared, se puede demostrar que la rapidez del viento sigue un perfil logarítmico con la altura. Las observaciones que no corresponden a condiciones atmosféricas neutrales se corrigen usando una función de estabilidad, la cual está dada, según Högström (1988), por:

$$\Psi(z/L) = \begin{cases} (1 + 15.2z/L)^{1/4}, & z/L < 0 \\ 1 + 4.8z/L, & z/L > 0 \end{cases} \quad (12)$$

Así, la rapidez del viento equivalente en condiciones neutrales es:

$$U_{zN} = U_{6.5} + \frac{u_*}{\kappa} \Psi(z/L) \quad (13)$$

Es importante notar que la corrección que se hace debido a la estabilidad atmosférica, está restringida a valores pequeños de $|z/L|$, por lo tanto cuando se presenta una atmósfera altamente estable o altamente inestable, la corrección deja de ser válida. Finalmente, en virtud de que se espera un perfil logarítmico con la altura, la rapidez del viento se puede estandarizar a una altura de 10 metros sobre el nivel del mar usando la siguiente relación:

$$U_{10N} = U_{zN} + \frac{u_*}{\kappa} \log \left(\frac{10}{z} \right) \quad (14)$$

3. Resultados

3.1. BOMM1-ITS

En la Figura 1 se presenta un resumen de las principales variables meteorológicas observadas por la BOMM1-ITS durante todo el período de medición. En el primer panel se observa la rapidez del viento a 10 metros en condiciones neutrales (línea negra) y la dirección del mismo en convención náutica (ángulo azimutal que marca la dirección desde la que sopla el viento). El segundo panel presenta la temperatura

¹donde $z = 6.5$ es la altura donde se hace la medición de los flujos de momentum y calor y la velocidad del viento

promedio del aire (medida con la estación meteorológica; línea azul clara) y la temperatura subsuperficial del agua a 7 metros de profundidad (medida con el RBR; línea roja oscura). El tercer panel muestra la presión atmosférica (línea negra; eje de la izquierda) y la humedad relativa (línea gris; eje de la derecha). Finalmente, en el panel inferior se muestra al flujo de calor sensible calculado a partir de la temperatura sónica y de la fluctuación turbulenta de la velocidad vertical, obtenidas con el anemómetro sónico: los valores en rojo marcan un flujo positivo, es decir, del océano a la atmósfera, mientras que los valores en azul son flujos negativos, es decir, de la atmósfera al océano.

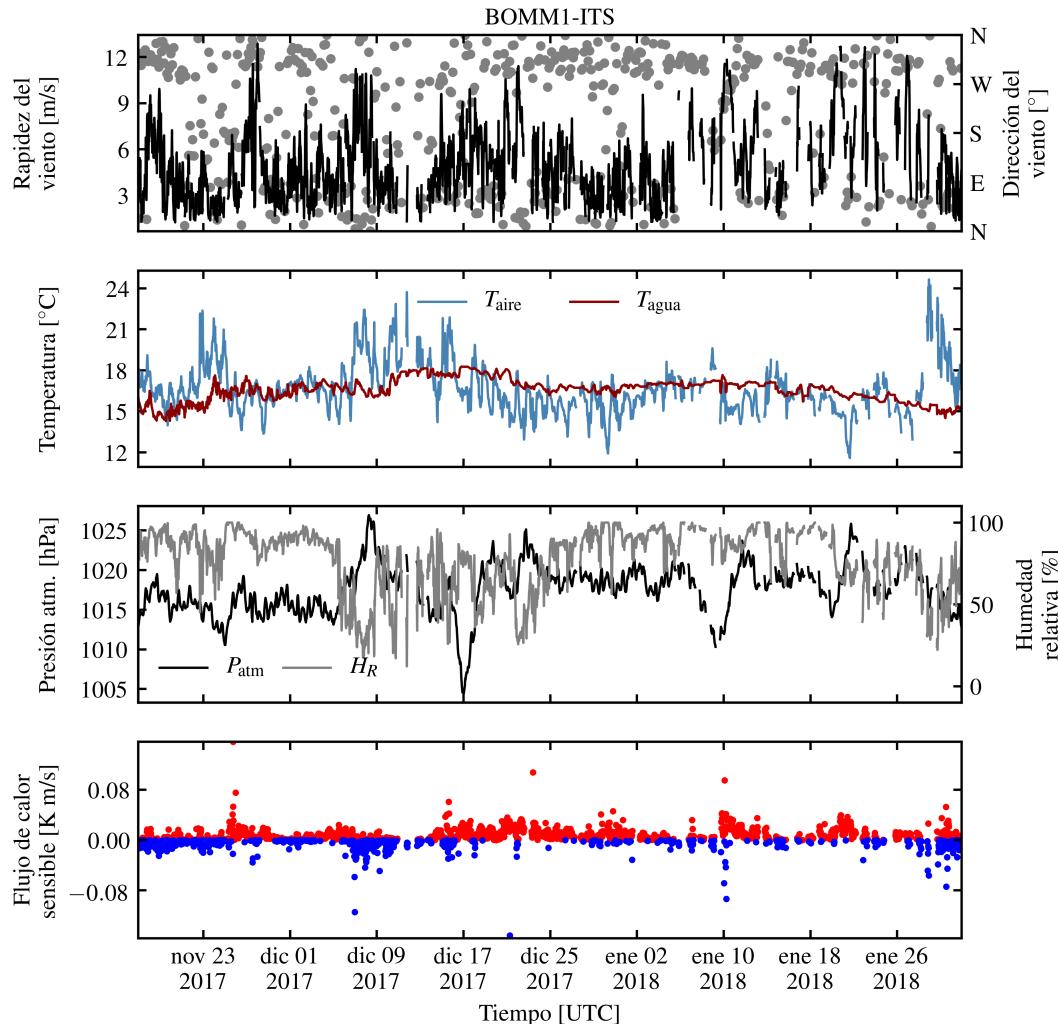


Figura 1. Series de tiempo de las principales variables atmosféricas medidas durante el experimento BOMM1-ITS en las inmediaciones de la Isla Todos Santos, Ensenada, BC.

Durante el período de mediación de esta boya, se observaron vientos con una rapidez entre 0 y 12 m/s y una dirección predominantemente del norte-noroeste. Se logró observar el efecto que tiene los vientos de Santa Ana: cuando se presentan estos eventos la dirección del viento es de tierra a mar, por lo tanto se presentan unas bajas considerables en la humedad relativa (hasta un 30 %) y una presión atmosférica promedio que supera los 1025 hPa. Adicionalmente, durante estos eventos es evidente que el sentido del flujo de calor es predominantemente de la atmósfera al océano, por lo tanto se observan temperaturas del aire mayores que en el agua.

En la Figura 2 se presentan los principales parámetros integrales del oleaje calculados a partir de las observaciones de los alambres de capacitancia y el sensor de movimiento. Usando el método WDM (Wavelet Directional Method) propuesto por [Donelan et al. \(1996\)](#), se calculó el espectro direccional del oleaje (ver reporte adjunto), del cual se derivan los parámetros integrales del oleaje, que son, altura de ola significante (panel superior) y período asociado al pico espectral (segundo panel). Adicionalmente se presenta la rapidez del viento a 10 metros en condiciones neutrales (tercer panel) y el espectro del oleaje en función de la frecuencia (panel inferior).

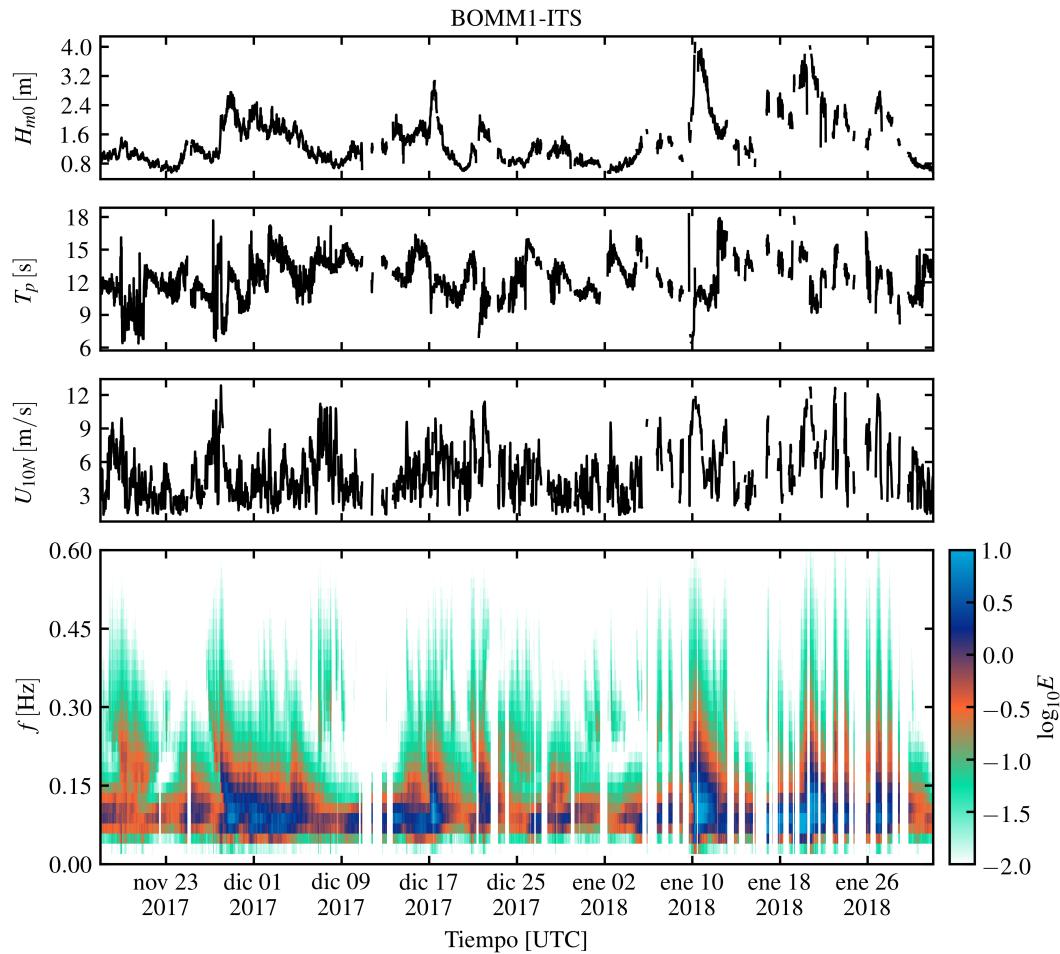


Figura 2. Series de tiempo de algunas variables asociadas con el oleaje observadas el experimento BOMM1-ITS en las inmediaciones de la Isla Todos Santos, Ensenada, BC.

Se observaron alturas de significantes hasta de 4 m en algunos eventos. En esta zona la mayor parte del tiempo se presentan condiciones de swell, por lo tanto los períodos de las olas son generalmente mayores a 13 s, excepto en los casos donde se presentan eventos de olas generadas casi-localmente o cercanas al punto de medición, en los cuales los períodos son del orden de 6 a 9 s, junto con una rapidez del viento mayor a 9 m/s.

Uno de los parámetros más importantes en la interacción océano-atmósfera es el coeficiente de arrastre C_D . Este parámetro es una medida del momentum que se transfiere de la atmósfera al océano. Muchos autores han propuesto parametrizaciones del coeficiente de arrastre. En la Figura 3 se presentan los

resultados obtenidos durante el período de medición de la BOMM1 y se comparan con las curvas propuestas por [Smith \(1980\)](#) y por [Large and Pond \(1981\)](#). De manera general se observa que, durante condiciones de vientos moderados a intensos, a medida que aumenta la rapidez del viento, el coeficiente de arrastre aumenta linealmente, pero cuando se presentan condiciones de viento ligero, hay un aumento del coeficiente de arrastre a medida que el viento se acerca a cero. Otro punto importante que se observó con las mediciones de la boyas, es el efecto que tiene el oleaje en el coeficiente de arrastre: como se observa en la figura, el coeficiente de arrastre aumenta cuando aumenta la altura significante.

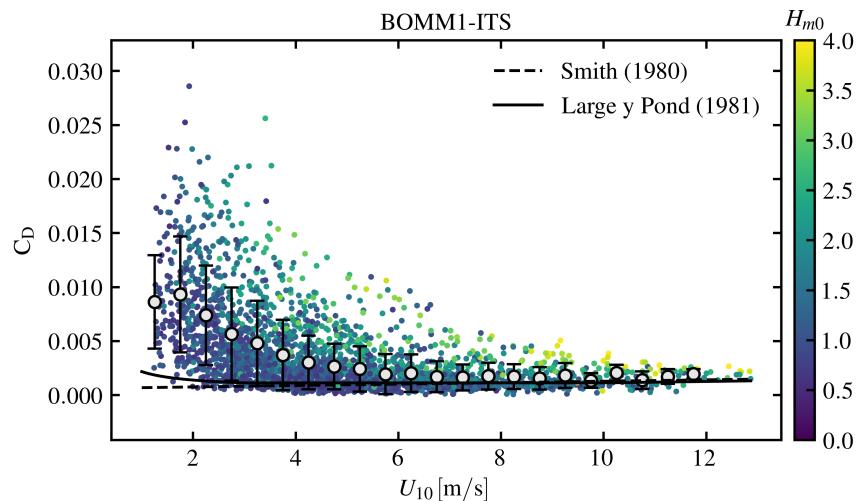


Figura 3. Coeficiente de arrastre en función de la rapidez del viento a 10 metros en condiciones neutrales observada durante el experimento BOMM1-ITS en las inmediaciones de la Isla Todos Santos, Ensenada, BC. La barra de colores muestra la altura de ola significante como indicador del efecto de las olas en el coeficiente de arrastre. Las líneas sólida y punteada representan las parametrizaciones de [Smith \(1980\)](#) y [Large and Pond \(1981\)](#), respectivamente. Los puntos blancos con borde negro representan los promedios de C_D para 20 intervalos de clase de U_{10} y las barras representan la desviación estándar de cada intervalo.

Pueden existir diferencias entre la dirección del viento real obtenida de la Maximet² y la dirección que se obtiene del anemómetro sónico. En el segundo caso la dirección del viento se obtiene a partir de la corrección de los datos por el movimiento de la boyas, lo cual incluye la orientación de la misma respecto al norte magnético (ver reporte adjunto). En la Figura 4 se presenta un histograma de la diferencia entre estos dos ángulos. Se espera que el valor más probable sea cero y que haya una muy baja variabilidad. En el caso de la BOMM1-ITS se observa una diferencia que oscila entre -10 y +10 grados, lo cual puede deberse a errores en la corrección por el movimiento, desalineamientos entre los sensores o diferencias reales en la dirección del viento debido a la distorsión del flujo por la estructura.

3.2. BOMM2-ITS

La BOMM2-ITS fue la segunda boyas que se construyó. El experimento en ITS se llevó a cabo entre el 2018/03/03 y el 2018/06/19 y se midieron las mismas variables que en el caso anterior. En este caso se tiene un mayor período de medición que durante el experimento BOMM1-ITS y a diferencia de

²real quiere decir la dirección del viento relativa al norte magnético

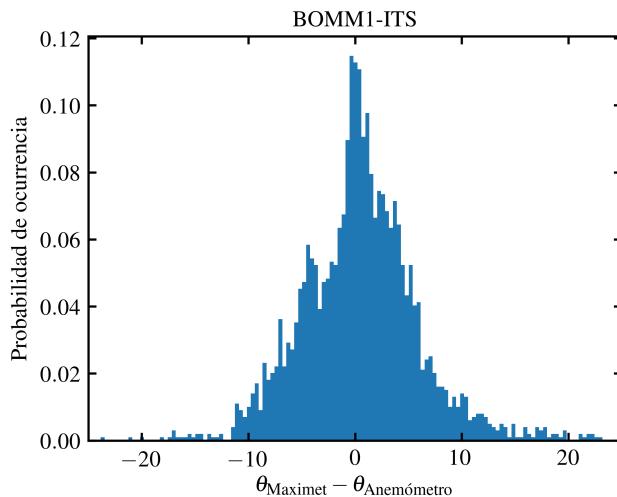


Figura 4. Histograma de la diferencia entre la dirección del viento real observada con la estación meteorológica Maximet y la dirección del viento calculada del anemómetro sónico después de aplicar la corrección de los datos por el movimiento de la boyta. Los datos corresponden a las observaciones llevadas a cabo durante el experimento BOMM1-ITS en las inmediaciones de la Isla Todos Santos, Ensenada, BC.

aquel, en este caso se observó el período de transición entre primavera y principios del verano (Figura 5). Esto se ve claramente en el aumento gradual de la temperatura subsuperficial del mar que se da desde finales de mayo hasta el final del período de medición acompañado por una disminución de la presión atmosférica. Durante este tiempo la rapidez del viento osciló entre 0 y 11 m/s e igualmente las direcciones predominantes fueron del norte-noroeste. Se logran observar dos eventos de vientos de Santa Ana en los meses de marzo y abril, en donde la temperatura del aire fue casi dos veces la temperatura del aire, por lo tanto se observaron unos flujos de calor sensible considerablemente intensos comparados con el caso de la BOMM1-ITS.

En el caso de los parámetros del oleaje se observaron alturas de ola menores que en período anterior ya que corresponden a los meses de primavera y verano. En cuanto al período del pico espectral, los valores oscilan igualmente entre 6 y 18 s. En el espectro en frecuencia de este período en particular, se logra observar el arribo de sistemas de swell como franjas azules con cierta pendiente, lo cual es un proceso que se conoce como dispersión del oleaje, y es consecuencia de que las olas más largas viajan más rápido que las corta, por lo tanto primero se observan ondas de menor frecuencia y esta aumenta conforme pasa el tiempo (Figura 6).

Al igual que durante el período de medición de la BOMM1-ITS, el coeficiente de arrastre presenta el mismo comportamiento en lo que se observó durante el experimento BOMM2-ITS, como se muestra en la Figura 7. Cabe mencionar que en este caso, el efecto del aumento del coeficiente de arrastre por cuenta del aumento de la altura significante del oleaje, no se observa tan claro, posiblemente debido a que durante el período de la BOMM2-ITS no se alcanzaron las alturas de ola registradas durante el experimento de la BOMM1-ITS.

Finalmente, en la figura que muestra la diferencia entre la dirección del viento obtenida de la Maximet y la calculada a partir de las componentes de la velocidad del anemómetro sónico después de aplicar la

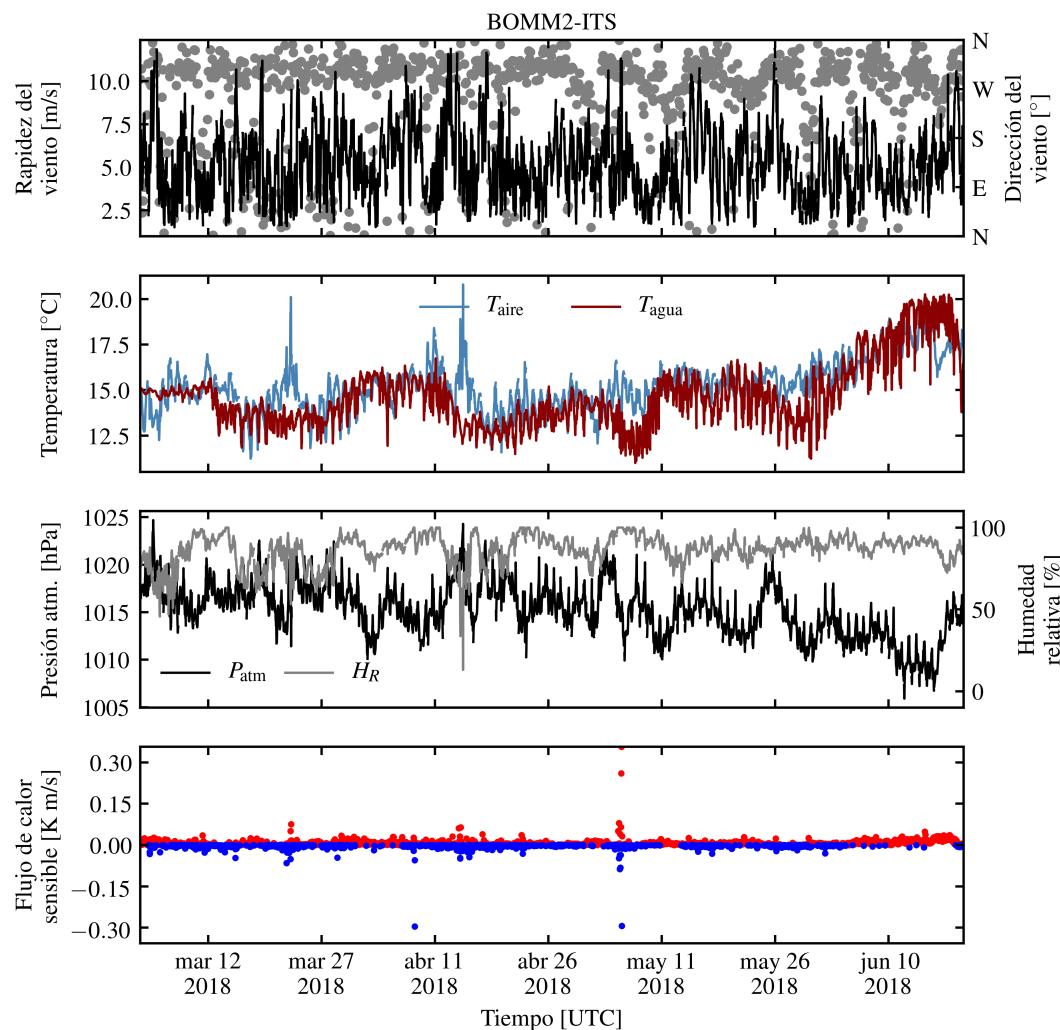


Figura 5. Series de tiempo de las principales variables atmosféricas medidas durante el experimento BOMM2-ITS en las inmediaciones de la Isla Todos Santos, Ensenada, BC.

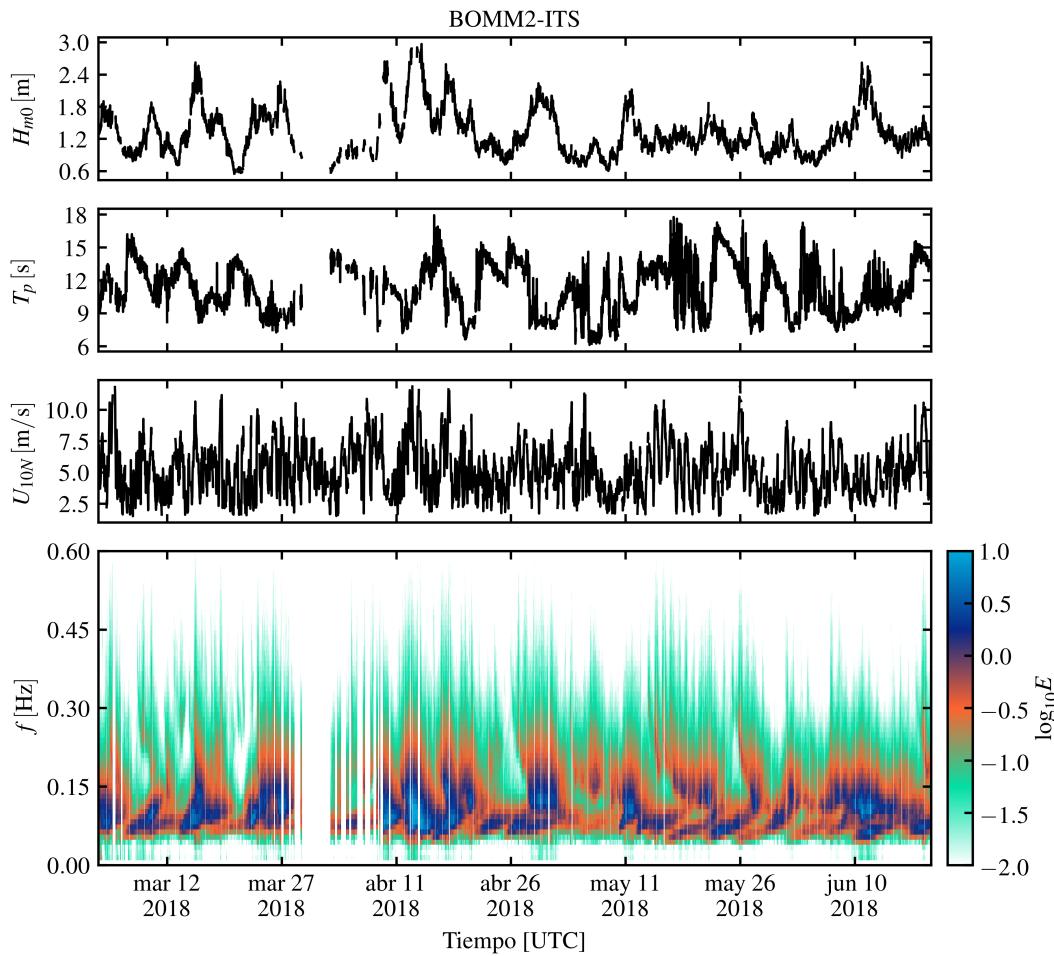


Figura 6. Series de tiempo de algunas variables asociadas con el oleaje observadas el experimento BOMM2-ITS en las inmediaciones de la Isla Todos Santos, Ensenada, BC.

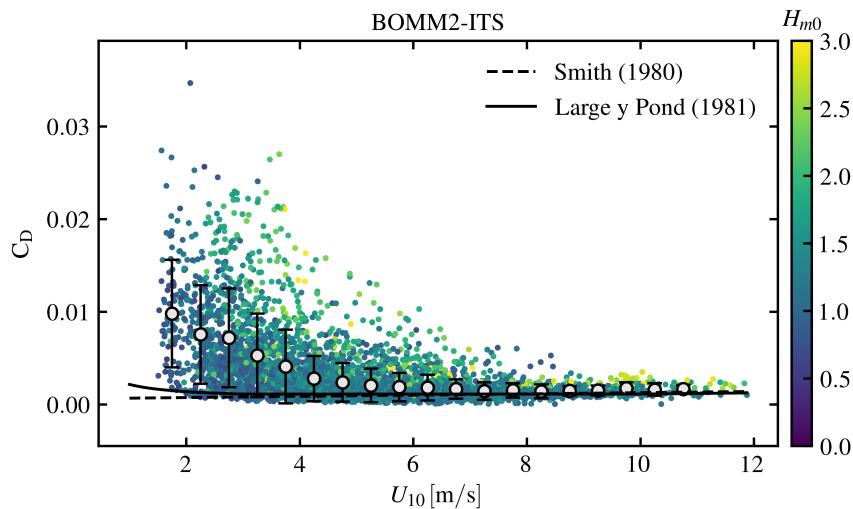


Figura 7. Coeficiente de arrastre en función de la rapidez del viento a 10 metros en condiciones neutrales observada durante el experimento BOMM1-ITS en las inmediaciones de la Isla Todos Santos, Ensenada, BC. La barra de colores muestra la altura de ola significante como indicador del efecto de las olas en el coeficiente de arrastre. Las líneas sólida y punteada representan las parametrizaciones de Smith (1980) y Large and Pond (1981), respectivamente. Los puntos blancos con borde negro representan los promedios de C_D para 20 intervalos de clase de U_{10} y las barras representan la desviación estándar de cada intervalo.

corrección por el movimiento de la boyta (Figura 8), se puede observar un leve sesgo entre 3 y 4 grados, aunque la dispersión de los datos se encuentra entre -10 y +10, al igual que en la BOMM1-ITS.

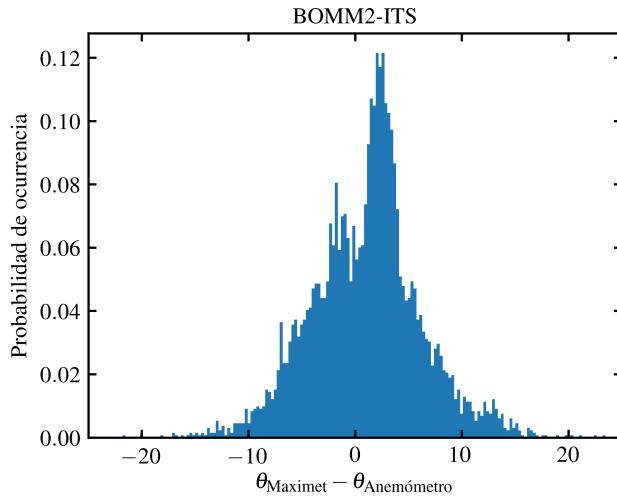


Figura 8. Histograma de la diferencia entre la dirección del viento real observada con la estación meteorológica Maximet y la dirección del viento calculada del anemómetro sónico después de aplicar la corrección de los datos por el movimiento de la boyta. Los datos corresponden a las observaciones llevadas a cabo durante el experimento BOMM2-ITS en las inmediaciones de la Isla Todos Santos, Ensenada, BC.

3.3. BOMM1-PER

Luego del período de pruebas en el punto ITS, la BOMM1 se instaló en Perdido (Golfo de México). El período de medición abarcó desde el 2018/07/11 hasta el 2019/02/27. A continuación se presentan las gráficas que muestran los resultados más relevantes obtenidos de las observaciones de la BOMM1-PER. En la Figura 9 presentan las principales variables meteorológicas. Es importante notar la diferencia que existe entre las condiciones atmosféricas y meteorológicas en Isla Todos Santos y en el Golfo de México. Con el experimento BOMM1-PER se logró observar una alta variabilidad de la rapidez del viento, oscilando entre 2 y 25 m/s. Las direcciones predominantes observadas son del sur-sureste en la temporada de julio a octubre y del norte-noroeste en la temporada de noviembre a febrero. En este último período se observan una cantidad considerable de eventos conocidos como “Nortes”, los cuales se caracterizan por una rapidez del viento que supera los 20 m/s, acompañados por un descenso abrupto en la temperatura del aire, que en el caso por ejemplo del evento de Norte de mediados del mes de octubre, pasó de $\sim 30^{\circ}\text{C}$ a $\sim 18^{\circ}\text{C}$ en poco menos de un día. Esta reducción también estuvo acompañada de un descenso en la temperatura subsuperficial del mar de casi 3°C y un aumento de la humedad relativa hasta 95 %. Posterior a este evento, se puede observar un Norte a mediados de noviembre de igual intensidad que el anterior, donde se alcanzaron casi 25 m/s de rapidez del viento y se presentó un descenso en la temperatura del aire hasta 12°C . En este caso, la presión atmosférica aumentó considerablemente respecto a su promedio, superando los 1030 hPa. No se cuenta con mediciones de temperatura del mar después de este evento debido a problemas técnicos con el RBR. Los flujos de calor sensible durante los “Norte” son predominantemente positivos, es decir, del océano a la atmósfera, lo cual es consecuente

con las observaciones de temperatura.

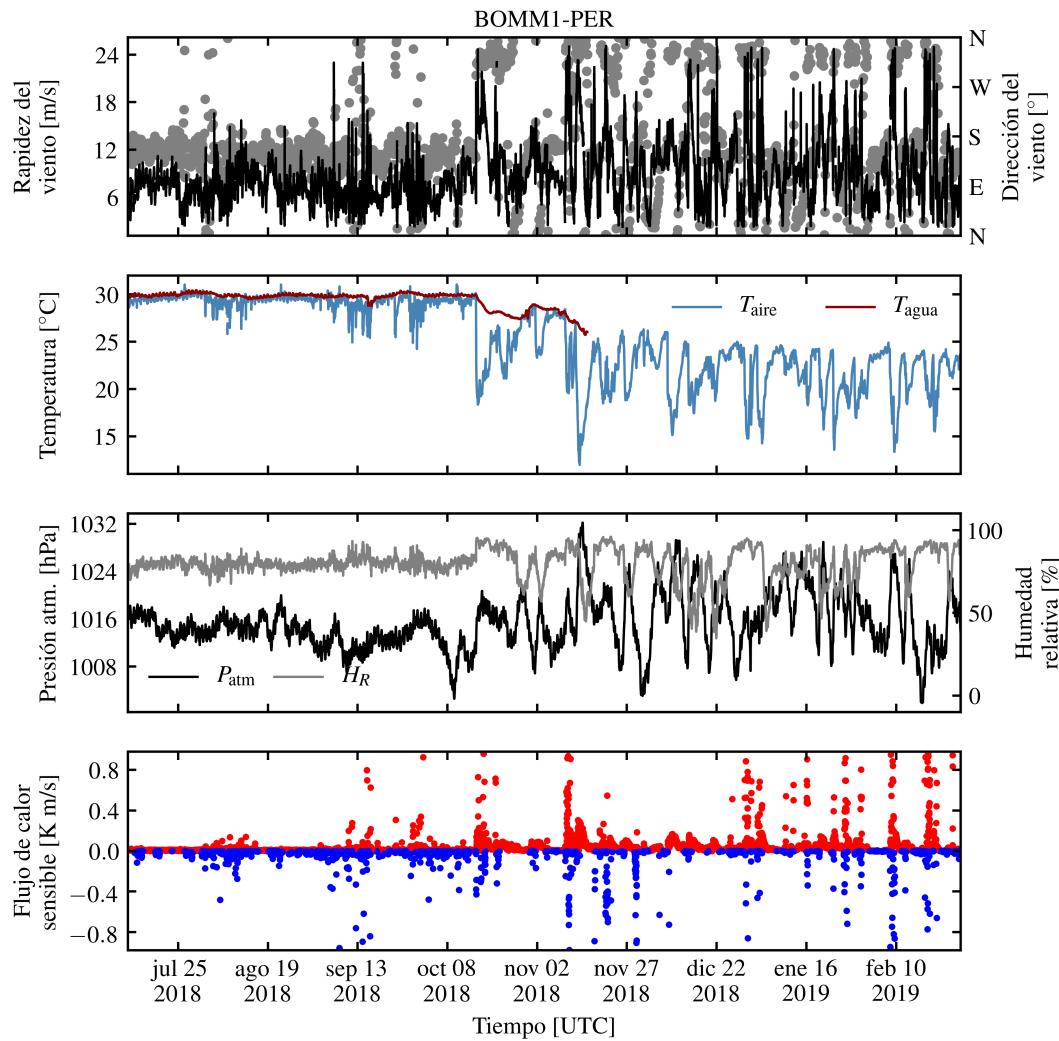


Figura 9. Series de tiempo de las principales variables atmosféricas medidas durante el experimento BOMM1-PER en la zona de Perdido, Golfo de México.

Las condiciones del oleaje en el Golfo de México también son bastante diferentes a las que se presentan en el Pacífico Norte. En la Figura 10 se puede observar altura significante que superan los 4 m, particularmente en la temporada de octubre a febrero, que es cuando se presentan los Nortes. Debido a que el Golfo de México es una cuenca semi-cerrada, el crecimiento y desarrollo del oleaje está limitado por el fetch, por lo tanto, los períodos asociados con el pico espectral que se observaron en el experimento BOMM1-PER, no superan los 10 s. Tanto en el espectro en frecuencia del oleaje como en la altura significante, se puede observar una marcada diferencia entre el período de Nortes y la temporada de verano-otoño. En esta temporada (de julio a septiembre) se observa un oleaje predominantemente de baja energía, ya que las alturas de ola no superan los 2 m y los períodos son del orden de 3 a 5 s en promedio. Adicionalmente, el viento en esta temporada no superó una rapidez de 10 m/s, exceptuando algunas tormentas localizadas.

En este caso, el coeficiente de arrastre presenta el mismo comportamiento que en los experimentos

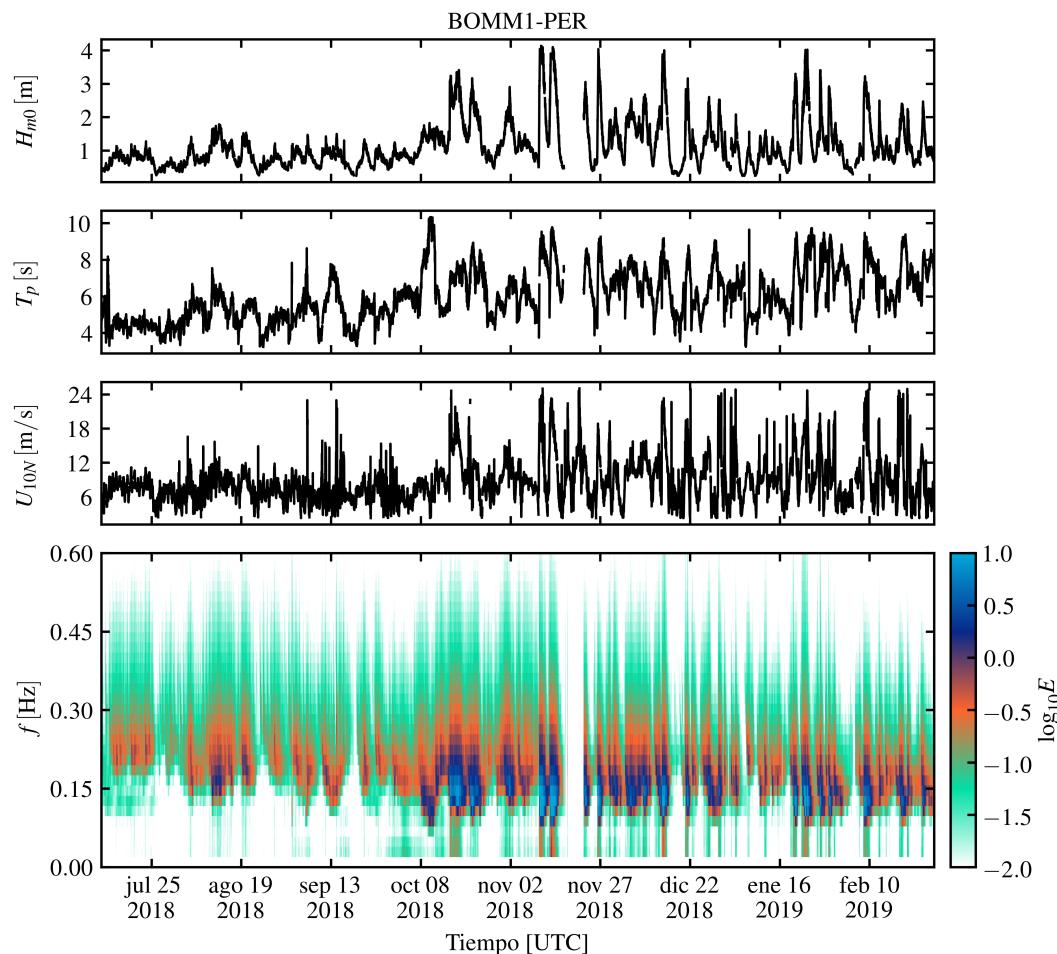


Figura 10. Series de tiempo de algunas variables asociadas con el oleaje observadas en el experimento BOMM1-PER en la zona de Perdido, Golfo de México.

anteriores, a pesar de que se tratan de condiciones diferentes. En este experimento en particular no se observa una influencia tan directa de la altura significante en el coeficiente de arrastre, como si se observaba en los experimentos anteriores. Cabe mencionar que para los datos de BOMM1-PER, debido a que se presentó una alta variabilidad en los datos, se hizo un control de calidad más estricto para calcular el coeficiente de arrastre, el cual consistió en eliminar las velocidades de fricción que superaban 0.8 m/s. A pesar de eso, se sigue observando una gran variabilidad en C_D cuando la rapidez del viento es menor de 10 m/s.

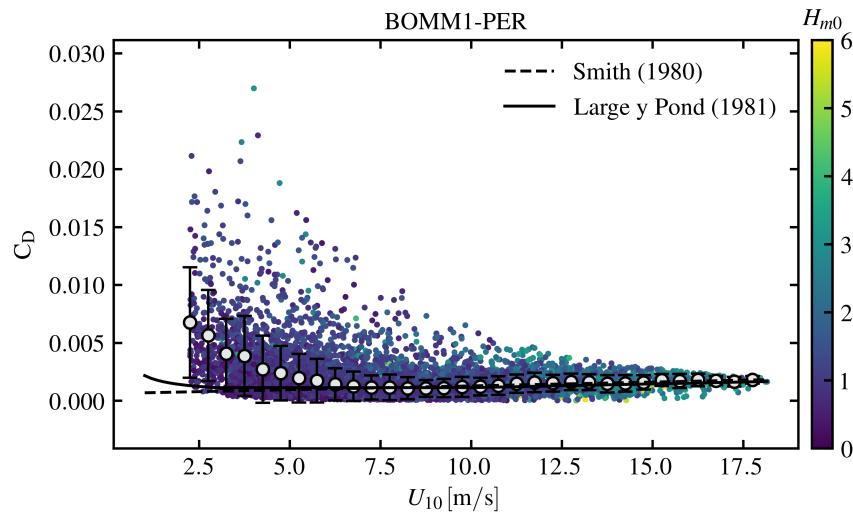


Figura 11. Coeficiente de arrastre en función de la rapidez del viento a 10 metros en condiciones neutrales observada durante el experimento BOMM1-PER en la zona de Perdido, Golfo de México. La barra de colores muestra la altura de ola significante como indicador del efecto de las olas en el coeficiente de arrastre. Las líneas sólida y punteada representan las parametrizaciones de [Smith \(1980\)](#) y [Large and Pond \(1981\)](#), respectivamente. Los puntos blancos con borde negro representan los promedios de C_D para 20 intervalos de clase de U_{10} y las barras representan la desviación estándar de cada intervalo.

Finalmente, la diferencia entre las direcciones del viento en BOMM1-PER, se asemejan mucho a la del experimento BOMM2-ITS, ya que se presenta un sesgo de aproximadamente $3 - 4^\circ$, como se observa en la Figura 12.

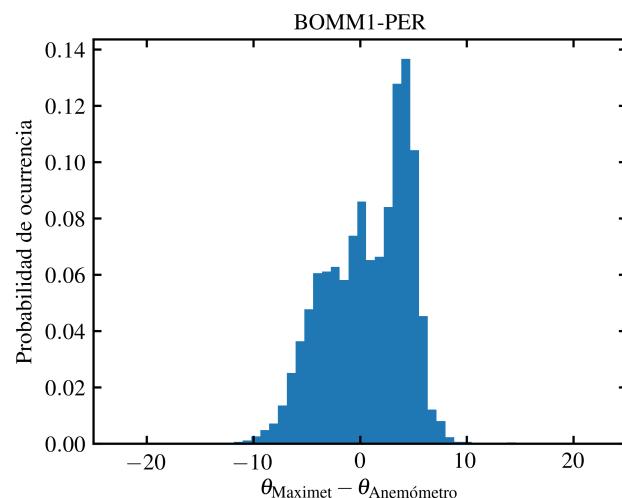


Figura 12. Histograma de la diferencia entre la dirección del viento real observada con la estación meteorológica Maximet y la dirección del viento calculada del anemómetro sónico después de aplicar la corrección de los datos por el movimiento de la boyta. Los datos corresponden a las observaciones llevadas a cabo durante el experimento BOMM1-ITS en las inmediaciones de la Isla Todos Santos, Ensenada, BC.

4. Comentarios finales

La instalación de esta red de boyas hace parte del proyecto financiado por CONACYT y por la Secretaría de Energía (SENER), y es llevado a cabo por el Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM) dentro de la Línea de Acción 1, “Plataformas de observación oceanográfica”, en colaboración con la Secretaría de Marina (SEMAR).

En este reporte se presentan los principales resultados obtenidos del análisis de los datos observados con la Boyas Oceanográficas y de Meteorología Marina (BOMM), tanto en sus períodos de prueba como en la Isla Todos Santos, como en su períodos de operación en el Golfo de México.

Con estas mediciones se pretende obtener información suficiente para determinar las características y la variabilidad de los fenómenos físicos dominantes en las regiones costeras del Golfo de México, enfocados en procesos de interacción entre el océano y la atmósfera, particularmente los flujos de momentum y las características del espectro direccional del oleaje.

Los datos presentados en este reporte constituyen un análisis preliminar, por lo tanto es importante considerar que aún se debe realizar un procesamiento más detallado y un análisis profundo de los datos antes de presentar resultados contundentes. La información contenida en este reporte se encuentra aun bajo procesamiento y control de calidad.

Referencias

- Donelan, M. A., Drennan, W. M., and Magnusson, A. K. (1996). Nonstationary analysis of the directional properties of propagating waves. *Journal of Physical Oceanography*, 26(9):1901–1914.
- Högström, U. (1988). Non-dimensional wind and temperature profiles in the atmospheric surface layer: A re-evaluation. *Boundary-Layer Meteorology*, 42(1):55–78.
- Large, W. and Pond, S. (1981). Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *Journal of physical oceanography*, 11(3):324–336.
- Smith, S. D. (1980). Wind stress and heat flux over the ocean in gale force winds. *Journal of Physical Oceanography*, 10(5):709–726.