

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
Facultad de Ciencias Marinas



**Análisis del oleaje a partir de las mediciones realizadas con un
sensor de velocidades en una boya**

T E S I S

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA
OBTENER EL GRADO DE

OCEANÓLOGO

Presenta

César Omar Luna Miyaki

Ensenada, Baja California, México, 12 de agosto de 2022

Resumen:

Uno de los métodos más comunes para describir y estudiar el oleaje con precisión, es el espectro direccional, que es una representación estadística y proporciona información sobre la distribución de la energía en función de la frecuencia y la dirección con la que ésta se propaga por causa del campo de olas. Para estimar el espectro direccional del oleaje, comúnmente se hace uso de mediciones *in-situ* por medio de boyas, las cuales registran la elevación y la pendiente de la superficie del mar en función del tiempo, con lo que se puede estimar la altura y dirección de propagación del oleaje. El objetivo de este trabajo es el de estimar el espectro direccional del oleaje a partir de las mediciones de velocidades de las partículas inducidas por el oleaje, que se obtuvieron con un velocímetro acústico o "ADV" (*Vector*) instalado en una boya. Las mediciones se corrigieron con la información del movimiento de la boya obtenidas mediante la Unidad de Movimiento Inercial (*IMU*) instalada en el velocímetro. Finalmente, se realizó una comparación del espectro direccional estimado, con el que se obtiene a partir de las mediciones con un ADCP (*Signature1000*) instalado en el fondo. Mediante la investigación realizada, se demuestra que el movimiento en la boya induce una señal en las mediciones de las velocidades de las partículas del fluido que debe corregirse, especialmente por ser influenciado en la región del pico espectral del oleaje y en la región de frecuencia baja en el espectro.

Palabras clave: Oleaje, Espectro Direccional, Velocidades de Partículas y Boya.

Análisis del oleaje a partir de las mediciones realizadas con un sensor de velocidades en una boya

TESIS

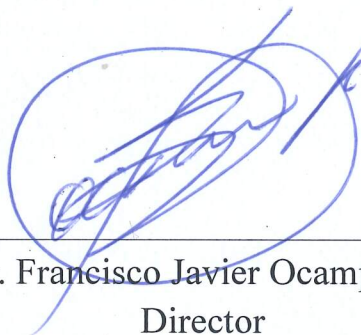
QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS
PARA OBTENER EL GRADO DE

OCEANÓLOGO

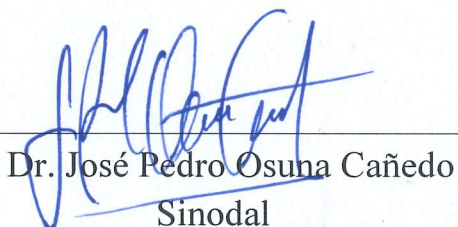
Presenta:

César Omar Luna Miyaki

Aprobada por:



Dr. Francisco Javier Ocampo Torres
Director



Dr. José Pedro Osuna Cañedo
Sinodal



Dr. Rafael Hernández Walls
Secretario

Dedicatoria

A mí Madre, quien siempre me ha permitido navegar con libertad, y que, a su vez, siempre ha estado ahí para ayudarme a reparar el barco.

A mí Padre, quien siempre ha estado para brindarme consejo y apoyo en mis decisiones.

A los buenos amigos Santini, Marthita y al Manríquez, quienes siempre me apoyaron al escuchar mis locas ideas.

Por último y no menos importante, agradezco al buen Apangus Californicus, quien espero esté cantando, bailando y actuando con las sirenas. Señor Apango, a usted, mi eterna gratitud por motivarme a conocer esta hermosa profesión.

Agradecimientos

Agradezco al Dr. Francisco Ocampo por darme la oportunidad de trabajar con él, aún después de conocerme como alumno. Paco, muchas gracias por los consejos, las historias y la motivación que me ha transmitido mediante sus enseñanzas del enigmático oleaje.

Agradezco a mis sinodales: el Dr. Pedro Osuna y Dr. Rafael Hernández, por formar parte de este proyecto y por sus hábiles comentarios para la elaboración del trabajo.

En este agradecimiento me quedaré corto, pero ahí va. Gracias a todos los compañeros del grupo de oleaje: Laurita por las pláticas del café que hacían más ameno los desvelos; Cherrera por sus extensos consejos en programación y mentoreo científico; Lalo, gracias por motivarme en los momentos de duda y flaqueo; al buen Dr. Castro por sus múltiples pláticas de 5 minutos que se volvían horas de aprendizaje sobre la vida y sus bemoles; a Rodney Chapitas, Memo, Carlos y Diego, por sus consejos y apoyo. Finalmente, al Dr. Bernardo Esquivel a.k.a “Barbas” por su incalculable paciencia ante mis incesantes cuestionamientos, pero más agradecido estoy, por el gran apoyo y guía que significo para mí en este proyecto.

Agradezco a los profesores de la FCM que contribuyeron en mi aprendizaje y fascinación por el mar y sus misterios.

Se agradece al CEMIE-Océano y al GIGoM la oportunidad que se nos ha brindado para el acceso y utilización de los datos analizados en este trabajo.

Contenido	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	9
<i>1.1 GENERALIDADES</i>	<i>9</i>
<i>1.2 ANTECEDENTES</i>	<i>10</i>
2. OBJETIVOS.....	12
<i>GENERALES</i>	<i>12</i>
3. ÁREA DE ESTUDIO.....	13
4. METODOLOGÍA	15
<i>4.1 CONTROL DE CALIDAD.....</i>	<i>15</i>
<i>4.1.1 Exploración de los datos.....</i>	<i>16</i>
<i>4.1.2 Sustitución de valores NaN y valores atípicos.....</i>	<i>16</i>
<i>4.1.3 Análisis del efecto de la sustitución de outliers en el espectro de frecuencia.....</i>	<i>19</i>
<i>4.2 CORRECCIÓN DE LAS VELOCIDADES POR EL MOVIMIENTO DE LA BOYA</i>	<i>20</i>
<i>4.3 ESPECTRO DIRECCIONAL.....</i>	<i>21</i>
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
<i>5.1 ANÁLISIS DE LA CORRECCIÓN POR EL MOVIMIENTO DE LA BOYA EN LAS MEDICIONES</i>	<i>23</i>
<i>5.2 COMPARACIÓN ENTRE VECTOR Y SIGNATURE1000</i>	<i>32</i>
<i>5.2.1 Comparación entre H_{su} y H_{sp}.....</i>	<i>32</i>
<i>5.2.2 Comparación de las variables espectrales.....</i>	<i>34</i>
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	38
REFERENCIAS.....	39
APÉNDICE A.....	40

Índice de Figuras

Figura	Página
1. UBICACIÓN DEL SISTEMA BOC-VECTOR-SIGNATURE1000 EN LAS PROXIMIDADES DE PUNTA MORRO, DENTRO DE LA BAHÍA DE TODOS SANTOS, ENSENADA, BC. (TOMADA DE LEÓN GUZMÁN Y COLABORADORES, 2019).	13
2. SISTEMA BOC VECTOR-SIGNATURE1000 INSTALADO EN LAS PROXIMIDADES DE PUNTA MORRO (TOMADA DE LEÓN GUZMÁN Y COLABORADORES, 2019).	14
3. PERIODOS DE MEDICIÓN SIMULTÁNEA (GALVÁN POZOS, 2020), LAS BARRAS GRISES REPRESENTAN LOS PERIODOS EN DONDE SE REALIZARON MEDICIONES SIMULTÁNEAS, LAS LÍNEAS ROJAS INDICAN LAS FECHAS EN DÓNDE SE TUVO MEDICIÓN POR PARTE DEL <i>VECTOR</i> , DE VERDE Y AZUL LAS QUE FECHAS EN QUE SE TUVO MEDICIÓN CON EL <i>SIGNATURE1000</i>	15
4. SE MUESTRA UNA SECCIÓN DE LA SERIE DE TIEMPO ORIGINAL (LÍNEA ROJA) Y LA MISMA SECCIÓN DE LA SERIE DE TIEMPO TIEMPO INTERPOLADA (LÍNEA AZUL), LAS CURVES SEÑALAN EN DONDE SE REALIZARON LAS INTERPOLACIONES DE VALORES <i>NAN</i> (x) DE LA COMPONENTE 'x' DE LA VELOCIDAD OBSERVADA POR EL <i>VECTOR</i>	17
5. SERIE DE TIEMPO ORIGINAL CON <i>OUTLIERS</i> (LÍNEA ROJA) Y SERIE DE TIEMPO TIEMPO INTERPOLADA (LÍNEA AZUL) SIN <i>OUTLIERS</i> DE LA COMPONENTE 'x' DE LA VELOCIDAD OBSERVADA POR EL <i>VECTOR</i>	18
6. EN DONDE SE MUESTRA UN EJEMPLO DEL EFECTO DE LA DURACIÓN DE LA VENTANA UTILIZADA PARA CALCULAR EL PROMEDIO CORRIDO EN LA SUSTITUCIÓN DE <i>OUTLIERS</i> EN EL ESPECTRO DE UNA SERIE DE TIEMPO DE V_x OBSERVADA POR EL SENSOR <i>VECTOR</i> . ESPECÍFICAMENTE SE MUESTRA EL ESPECTRO DE LA SERIE ORIGINAL Y EL ESPECTRO DE CADA SERIE DE TIEMPO RESULTANTE AL UTILIZAR VENTANA CON DURACIÓN DE: 1, 2, 4, 8, 30 Y 60 s.	19
7. HS_u DEL PERIODO OCTUBRE-NOVIEMBRE PARA LA SERIE DEL <i>VECTOR</i> (LÍNEA AZUL) Y <i>SIGNATURE1000</i> (LÍNEA ROJA), EL ROMBO VERDE SEÑALA UN VALOR DE HS_u DE 0.57 M.	24
8. HS_u DEL PERIODO ENERO-FEBRERO PARA LA SERIE DE <i>VECTOR</i> (LÍNEA AZUL) Y <i>SIGNATURE1000</i> (LÍNEA ROJA), EL ROMBO MAGENTA SEÑALA UN VALOR DE HS_u DE 1.03 M Y EL ROMBO NEGRO SEÑALA UN VALOR DE HS_u DE 2.2 M.	25
9. VELOCIDADES TRANSFORMADAS EN CONDICIÓN DE HS_u BAJA EN DONDE LA LÍNEA VERDE ($V_{rot}(E)$) REPRESENTA LA VELOCIDAD ASOCIADA A LA ROTACIÓN DE LA BOYA, LA LÍNEA AZUL ($V_{trans}(E)$) REPRESENTA LA VELOCIDAD ASOCIADA AL MOVIMIENTO DE TRANSLACIÓN DE LA BOYA, LA LÍNEA ROJA ($V_{obs}(E)$) REPRESENTA LA VELOCIDAD OBSERVADA (MEDIDA) POR EL <i>VECTOR</i> Y LA LÍNEA NEGRA CON CÍRCULOS (VE) ES LA SUMA DE LAS TRES VELOCIDADES PREVIAMENTE MENCIONADAS.	26
10. VELOCIDADES TRANSFORMADAS EN CONDICIÓN DE HS_u MEDIA EN DONDE LA LÍNEA VERDE ($V_{rot}(E)$) REPRESENTA LA VELOCIDAD ASOCIADA A LA ROTACIÓN DE LA BOYA, LA LÍNEA AZUL ($V_{trans}(E)$) REPRESENTA LA VELOCIDAD ASOCIADA AL MOVIMIENTO DE TRANSLACIÓN DE LA BOYA, LA LÍNEA ROJA ($V_{obs}(E)$) REPRESENTA LA VELOCIDAD OBSERVADA (MEDIDA) POR EL <i>VECTOR</i> Y LA LÍNEA NEGRA (VE) ES LA SUMA DE LAS TRES VELOCIDADES PREVIAMENTE MENCIONADAS.	27
11. VELOCIDADES TRANSFORMADAS EN CONDICIÓN DE ALTA HS_u EN DONDE LA LÍNEA VERDE ($V_{rot}(E)$) REPRESENTA LA VELOCIDAD ASOCIADA A LA ROTACIÓN DE LA BOYA, LA LÍNEA AZUL ($V_{trans}(E)$) REPRESENTA LA VELOCIDAD ASOCIADA AL MOVIMIENTO DE TRANSLACIÓN DE LA BOYA, LA LÍNEA ROJA ($V_{obs}(E)$) REPRESENTA LA VELOCIDAD OBSERVADA (MEDIDA) POR EL <i>VECTOR</i> Y LA LÍNEA NEGRA (VE) ES LA SUMA DE LAS TRES VELOCIDADES PREVIAMENTE MENCIONADAS.	28

12. ESPECTRO EN FRECUENCIA DE LAS VELOCIDADES EN CONDICIÓN DE BAJA HS_{ij} EN DONDE LA LÍNEA VERDE ($V_{rot}(E)$) REPRESENTA LA ENERGÍA ASOCIADA A LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN DE LA BOYA, LA LÍNEA AZUL ($V_{trans}(E)$) REPRESENTA LA ENERGÍA ASOCIADA A LA VELOCIDAD DEL MOVIMIENTO DE TRANSLACIÓN DE LA BOYA, LA LÍNEA ROJA ($V_{obs}(E)$) REPRESENTA LA ENERGÍA ASOCIADA A LA VELOCIDAD OBSERVADA (MEDIDA) POR EL <i>VECTOR</i> Y LA LÍNEA NEGRA CON CÍRCULOS (VE) REPRESENTA LA ENERGÍA ASOCIADA A LA SUMA DE LAS TRES VELOCIDADES PREVIAMENTE MENCIONADAS.....	29
13. ESPECTRO EN FRECUENCIA DE LAS VELOCIDADES EN CONDICIÓN DE MEDIA HS_{ij} EN DONDE LA LÍNEA VERDE ($V_{rot}(E)$) REPRESENTA LA ENERGÍA ASOCIADA A LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN DE LA BOYA, LA LÍNEA AZUL ($V_{trans}(E)$) REPRESENTA LA ENERGÍA ASOCIADA A LA VELOCIDAD DEL MOVIMIENTO DE TRANSLACIÓN DE LA BOYA, LA LÍNEA ROJA ($V_{obs}(E)$) REPRESENTA LA ENERGÍA ASOCIADA A LA VELOCIDAD OBSERVADA (MEDIDA) POR EL <i>VECTOR</i> Y LA LÍNEA NEGRA CON CÍRCULOS (VE) REPRESENTA LA ENERGÍA ASOCIADA A LA SUMA DE LAS TRES VELOCIDADES PREVIAMENTE MENCIONADAS.....	30
14. ESPECTRO EN FRECUENCIA DE LAS VELOCIDADES EN CONDICIÓN DE ALTA HS_{ij} EN DONDE LA LÍNEA VERDE ($V_{rot}(E)$) REPRESENTA LA ENERGÍA ASOCIADA A LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN DE LA BOYA, LA LÍNEA AZUL ($V_{trans}(E)$) REPRESENTA LA ENERGÍA ASOCIADA A LA VELOCIDAD DEL MOVIMIENTO DE TRANSLACIÓN DE LA BOYA, LA LÍNEA ROJA ($V_{obs}(E)$) REPRESENTA LA ENERGÍA ASOCIADA A LA VELOCIDAD OBSERVADA (MEDIDA) POR EL <i>VECTOR</i> Y LA LÍNEA NEGRA CON CÍRCULOS (VE) REPRESENTA LA ENERGÍA ASOCIADA A LA SUMA DE LAS TRES VELOCIDADES PREVIAMENTE MENCIONADAS.....	31
15. HS_p DEL PERIODO OCTUBRE-NOVIEMBRE PARA LA SERIE DEL <i>VECTOR</i> (LÍNEA AZUL) Y <i>SIGNATURE1000</i> (LÍNEA ROJA).	33
16. HS_p DEL PERIODO ENERO-FEBRERO PARA LA SERIE DEL <i>VECTOR</i> (LÍNEA AZUL) Y <i>SIGNATURE1000</i> (LÍNEA ROJA).	33
17. COMPARACIÓN ESPECTROS DE VELOCIDAD <i>VECTOR</i> Y <i>SIGNATURE1000</i> EN DONDE PRESENTAN TODOS LOS DATOS DE S_u DEL REGISTRO, EN ROJO LOS CORRESPONDIENTES A LA SERIE DE <i>VECTOR</i> , EN AZUL LOS CORRESPONDIENTES A LA SERIE DE <i>SIGNATURE1000</i>	34
18. COMPARACIÓN ESPECTROS DE VELOCIDAD <i>VECTOR</i> Y <i>SIGNATURE1000</i> EN DONDE PRESENTAN TODOS LOS VALORES DE S_p DEL REGISTRO, EN ROJO LOS CORRESPONDIENTES A LA SERIE DE <i>VECTOR</i> Y EN AZUL LOS CORRESPONDIENTES A LA SERIE DE <i>SIGNATURE1000</i>	35
19. COMPARACIÓN DE DIRECCIONES DEL OLEAJE DEL <i>VECTOR</i> Y <i>SIGNATURE1000</i> CORRESPONDIENTES A LAS FRECUENCIAS DE TODO EL REGISTRO.....	36
20. COMPARACIÓN DEL ANCHO DE LA DISTRIBUCIÓN ANGULAR DEL OLEAJE DEL <i>VECTOR</i> Y <i>SIGNATURE1000</i> CORRESPONDIENTES A LAS FRECUENCIAS DE TODO EL REGISTRO.....	37

1. Introducción

1.1 Generalidades

El estado del tiempo, el estado del mar y el clima global están influenciados por la dinámica que ocurre en la interfase del sistema océano-atmósfera, en donde se lleva a cabo un importante intercambio de calor, gases y energía, debido a esto, es de gran importancia investigar y conocer dicha interfase. Para ello, se deben considerar los procesos que ahí ocurren, como lo son, el viento sobre la superficie del océano, las corrientes superficiales y el oleaje (Villa-Bôas *et al.*, 2019). Aunque cada proceso tiene importancia en la dinámica de la interfase, se resalta la participación del oleaje, el cual, favorece la mezcla de gases e inyecta energía en la vecinidad de esa interfase mediante su rompiente.

Para estudiar el oleaje se requieren mediciones o estimaciones, que se pueden obtener mediante métodos remotos (cámaras, radares y otros tipos de sensores ópticos), métodos numéricos (modelos computacionales para la predicción del oleaje) o métodos *in-situ* (boyas oceanográficas, ADCP o *wave-gliders*). De los métodos previamente mencionados, el más utilizado para obtener mediciones, es el método *in-situ* (particularmente el uso de boyas), como ejemplo, podemos mencionar las redes de boyas distribuidas a lo largo de la plataforma continental de USA, Canadá y Europa Occidental (Ardhuin *et al.*, 2019). Esto revela la falta de un sistema integrado de boyas en los mares y océanos del sur (considerando también las aguas mexicanas) que brinde información sobre las características y comportamiento del oleaje en dichas regiones.

Uno de los métodos utilizados para describir y estudiar el oleaje con precisión, es el espectro direccional, el cual, es una representación estadística del oleaje. Dicho método, proporciona información sobre la distribución de la energía en el espacio de frecuencias y la dirección con la que ésta se propaga por causa del campo de olas. El conocer cómo es la distribución de la energía mediante el espectro direccional, es de gran utilidad para identificar el tipo de oleaje que arriba a la costa o el que se propaga en mar abierto. El oleaje puede ser de tipo “*Swell*”, que se caracteriza por ser generado en tormentas lejanas al punto del observador o tipo “*Wind Sea*”, que se asocia con los sistemas de viento locales (Wyatt, 1997).

Tener información sobre el espectro direccional, es de suma importancia para proyectos relacionados con la extracción de energía del oleaje. Además de brindar información sobre el cómo se distribuye y hacia dónde se propaga la energía en función de la frecuencia, el espectro direccional también puede utilizarse para estimar la altura significativa, un parámetro del oleaje necesario para la planeación de obras marítimas en la zona costera y aguas profundas.

Para estimar el espectro direccional del oleaje, comúnmente se hace uso de mediciones *in-situ* por medio de boyas, las cuales, registran la elevación y la pendiente de la superficie del mar en función del tiempo, con lo que se puede estimar la altura y dirección de propagación del oleaje. No obstante, la boya posee su propio movimiento (rotaciones y translaciones) por lo cual, estimar la función de transferencia que explique la respuesta de la estructura de la boya al oleaje, es de suma importancia para obtener mediciones de calidad (Ardhuin *et al.*, 2019).

1.2 Antecedentes

Longuet-Higgins *et al.* (1963) desarrollaron un método para estimar el espectro direccional del oleaje ($S(\omega, \theta)$), en donde se utilizan mediciones de una boya tipo *pitch & roll*. Con este tipo de boyas se obtienen estimaciones a partir de acelerómetros lineales e inclinómetros colocados dentro de la boya. Con las mediciones de estos sensores, se calculan los ángulos de inclinación (*pitch & roll*) y la aceleración vertical (η_{tt}) de la boya. Mediante η_{tt} , se obtienen los valores del desplazamiento vertical o elevación de la superficie libre (η), y al contar con el registro de *pitch & roll*, se calcularon las pendientes de superficie en dirección S-N (η_y) y en O-E (η_x).

Para estimar el espectro direccional del oleaje, Longuet-Higgins *et al.* (1963), determinaron los primeros cinco coeficientes de Fourier, a partir del cálculo de coespectros y espectros de cuadratura de η , η_x y η_y . Dichos coeficientes, son necesarios para estimar la densidad de energía espectral ($E(f)$), el ancho de la distribución angular de la energía (ψ) y la distribución direccional de energía $D(\theta)$ para cada banda de frecuencia (f). Debido a que este método representa de manera precisa el oleaje, es utilizado para comparar mediciones realizadas por distintos sensores.

Para identificar los aspectos direccionales obtenidos con mediciones de diferentes sensores, Jeans *et al.* (2003), compararon mediciones realizadas con un ADCP "*RDI Workhorse*" y mediciones realizadas con una boya tipo "*Waverider*". Encontraron diferencias en la distribución angular estimada con cada sensor, mismas que se le atribuyeron a la manera en que adquieren las mediciones. Con las mediciones de la *Waverider* (tridimensionales, pero en una sola locación) sólo se pueden obtener los primeros dos primeros armónicos de la serie de Fourier, lo cual, no permite reconstruir totalmente el espectro direccional. Esto contrasta con las mediciones del *RDI* (mediciones realizadas mediante distintos transductores, que brindan un mayor número mediciones independientes del campo de olas), con las que es posible estimar el espectro direccional de una manera más completa. De tal forma, que se identifica la importancia en la manera en que se adquieren las mediciones y la relación con los armónicos obtenidos a partir de dichas mediciones.

Por otra parte, Velasco y Nylund (2019), evaluaron el desempeño de un ADCP (*Signature1000*) instalado en una boya, con respecto a las mediciones de velocidad de la corriente de otro ADCP (*AWAC I*) instalado en el fondo. En ese estudio resaltan la importancia de conocer la inclinación dinámica de la boya a partir del uso del giroscopio y acelerómetro. Al conocer la inclinación dinámica, se aplica una corrección para cada medición registrada por el *Signature1000* a causa de los movimientos de translación y rotación de la boya. Mediante la inclinación dinámica, también se corrige la orientación y posición de los transductores del *Signature1000*. Esto, con el motivo de transformar las mediciones del sistema de referencia local e inerciales del *Signature1000* hacia un sistema en coordenadas fijas y posteriormente, al sistema de referencia de la Tierra (*East-North-Up*). Dichas mediciones corregidas y transformadas se compararon con mediciones del *AWAC I*, las cuales resultaron ser similares. Con ello, se establece la importancia de la corrección debido al movimiento de la boya para cualquier instrumento que realice medición de velocidades de las partículas de fluido.

El objetivo de este trabajo es estimar el espectro direccional del oleaje a partir de las mediciones de velocidades de las partículas inducidas por el oleaje, que se obtuvieron con un velocímetro acústico o "ADV" (*Vector*) instalado en una boya. Es indispensable corregir las mediciones, con la información del movimiento de la boya que se obtiene con la Unidad de Movimiento Inercial (*IMU*), instalada como parte importante del velocímetro. Finalmente, se realiza una comparación del espectro direccional estimado, con el que se obtiene a partir de las mediciones con un ADCP (*Signature1000*) instalado en el fondo.

2. Objetivos

Generales

- Estimar el espectro direccional del oleaje a partir de las mediciones registradas con un sensor de velocidades instalado en una boya.
- Comparar los espectros direccionales que se obtienen a partir de las mediciones registradas con una boya, con respecto a los que se obtienen a partir de mediciones con un sensor fijo en el fondo.

3. Área de estudio

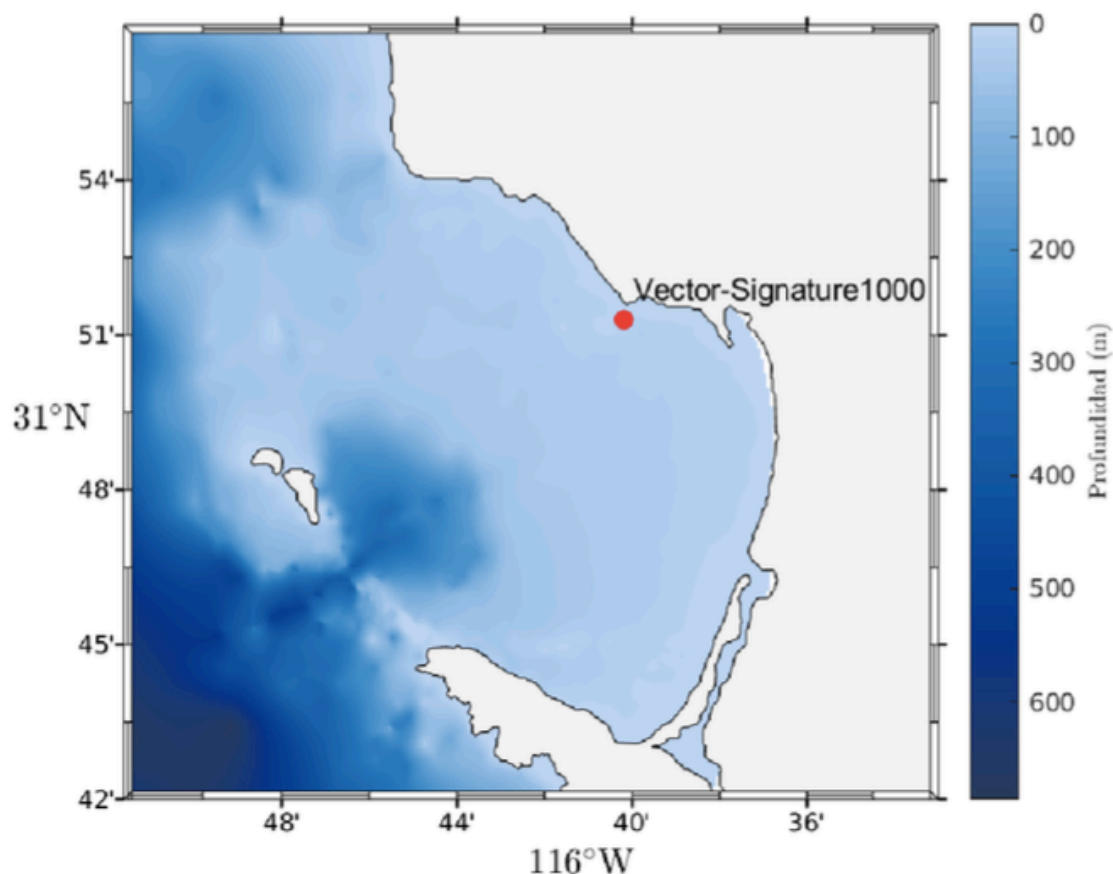


Figura 1 Ubicación del sistema BOC-Vector-Signature1000 en las proximidades de Punta Morro, dentro de la Bahía de Todos Santos, Ensenada, Baja California (Tomada de León Guzmán y colaboradores, 2019).

Se instaló una Boya Oceanográfica Costera (BOC) aproximadamente a 1 km de la costa, en la zona de Punta Morro (Figura 1) en donde la profundidad aproximada es de 20 m.

La BOC cuenta con distintos instrumentos, entre ellos: estación meteorológica, sensor de concentración de oxígeno en el agua y aire, CTD y un ADV (con sensor de movimiento integrado), que son utilizados para el registro de variables oceanográficas y meteorológicas relevantes para el estudio (León Guzmán *et al.*, 2019).

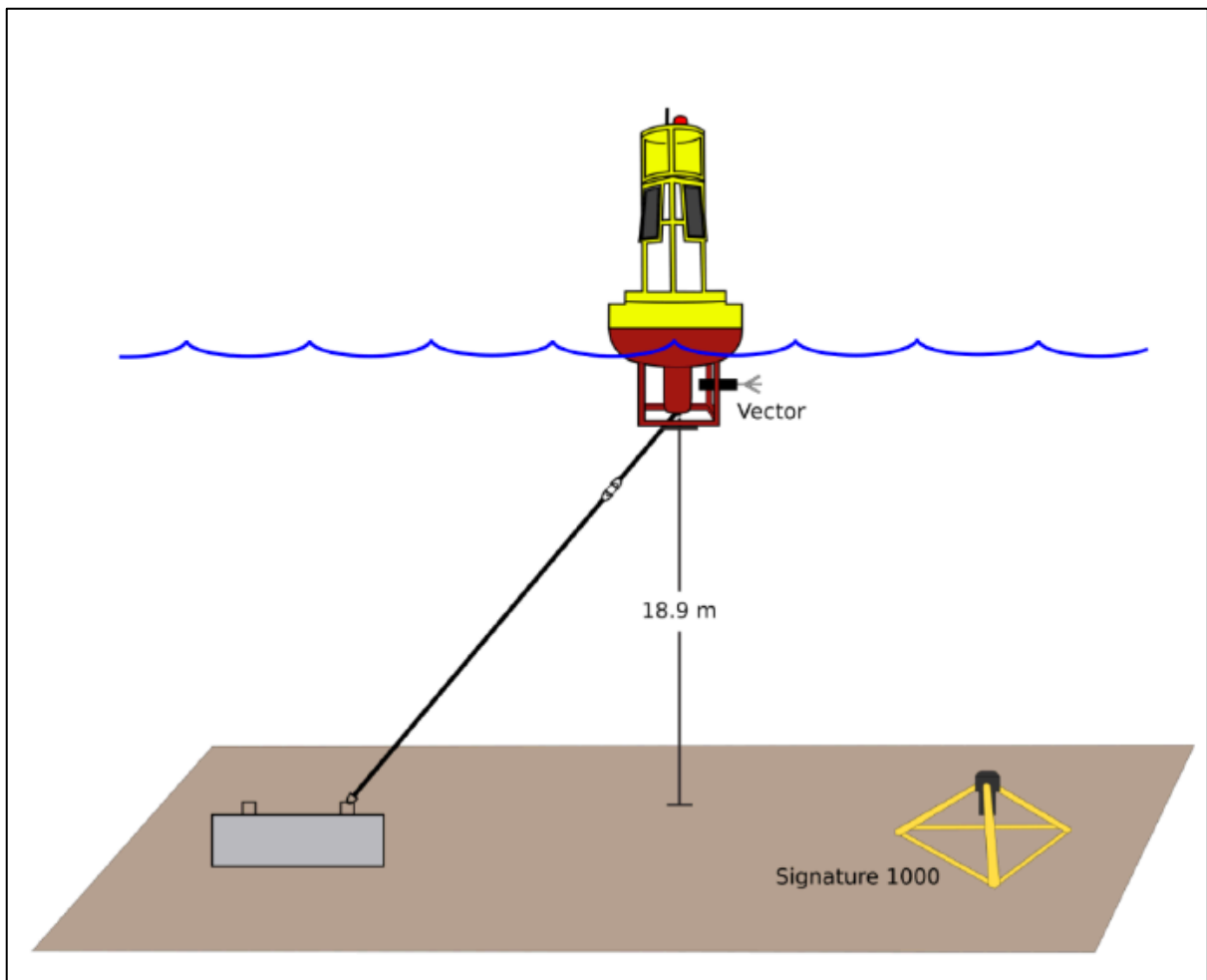


Figura 2 Sistema BOC Vector-Signature1000 instalado en las proximidades de Punta Morro (Tomada de León Guzmán y colaboradores, 2019).

Como se muestra en la Figura 2, el sensor *Vector* se encuentra instalado en la BOC y se mantiene sumergido a una profundidad aproximada de 1.5 m. Por otro lado, el sensor *Signature1000* está instalado a una profundidad aproximada de 19 m.

4. Metodología

A partir de los datos adquiridos con el sensor *Vector* instalado en una BOC en Punta Morro, Ensenada, Baja California, se propone realizar un análisis de las velocidades orbitales inducidas por el oleaje mediante el espectro de frecuencia, y posteriormente el espectro direccional de las olas.

El análisis constó de distintos procesos, en primera instancia se realizó un control de calidad de los datos (sección 4.1). Después de someter los datos al control de calidad, se realizaron las correcciones debido al movimiento de la boya (sección 4.2). Posteriormente, con las velocidades del *Vector* corregidas se estimaron los parámetros direccionales del oleaje y se compararon con los parámetros direccionales estimados a partir de las mediciones del *Signature1000* (sección 4.3). Finalmente se estima una función de transferencia para las mediciones del *Vector*, considerando las mediciones corregidas por el movimiento de la boya con respecto a las mediciones observadas sin corregir (sección 4.4).

4.1 Control de calidad

La información utilizada en este trabajo corresponde a las mediciones simultáneas del *Vector*, con las mediciones del *Signature1000*, con lo que tenemos dos periodos de medición: octubre-noviembre 2018 y enero-febrero 2019 como se muestra en la Figura 3.

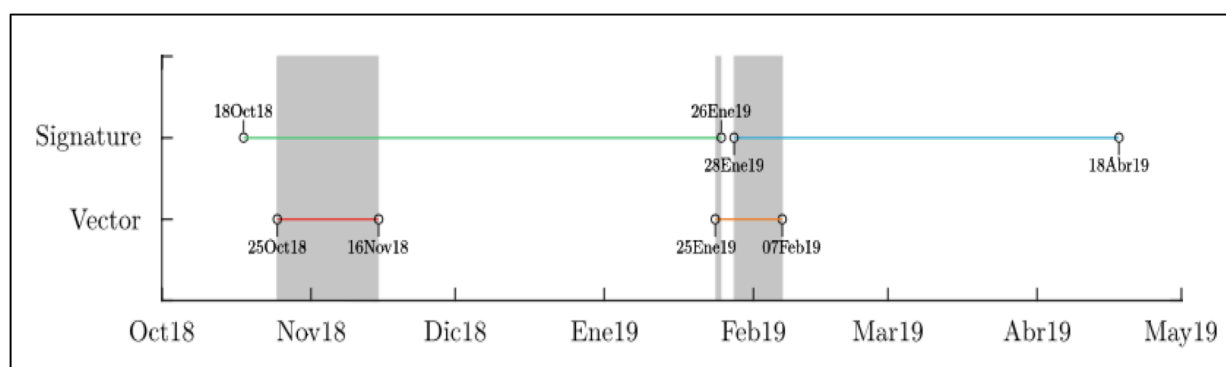


Figura 3 Periodos de medición simultánea (Galván Pozos, 2020), las barras grises representan los periodos en donde se realizaron mediciones simultáneas, las líneas rojas indican las fechas en dónde se tuvo medición por parte del *Vector*, de verde y azul las que fechas en que se tuvo medición con el *Signature1000*.

La información se somete a un control de calidad que constó de 2 fases:

- 1) Exploración de los datos
- 2) Sustitución de *NaN* y valores atípicos

4.1.1 Exploración de los datos

Los datos se registraron a una frecuencia de 64 Hz (64 datos por segundo) durante periodos de 10 minutos, con ello se obtienen 38,400 datos de cada variable por archivo. En total, contamos con 718 archivos, sin embargo, algunos archivos no contaban con las mediciones esperadas, por lo cual, se identificaron los archivos con mediciones faltantes. En total, se encontraron 24 archivos con registros incompletos que equivalen al 3.47% de las mediciones. Al ser archivos con mediciones incompletas, no se tomaron en cuenta en el análisis de la información.

4.1.2 Sustitución de valores NaN y valores atípicos

Durante la grabación de los datos en la memoria de estado sólido del módulo de electrónica de la boya, se identificó que después de cada segundo de medición, se pierde el dato final del siguiente segundo y en ocasiones el inicial, y se graban valores *NaN*. Para solucionar esto, se utilizó la función "*Fillmissing*" de Matlab para identificar y sustituir los valores *NaN* de las series de tiempo con el método de la "media corrida". En la Figura 4 se muestra un ejemplo de la presencia de valores *NaN* en una de las series de tiempo originales, específicamente de la componente "x" de la velocidad (V_x) en el sistema de referencia del sensor *Vector*, y el resultado de control de calidad y de sustitución de esos valores *NaN* por el promedio de una ventana de cinco datos.

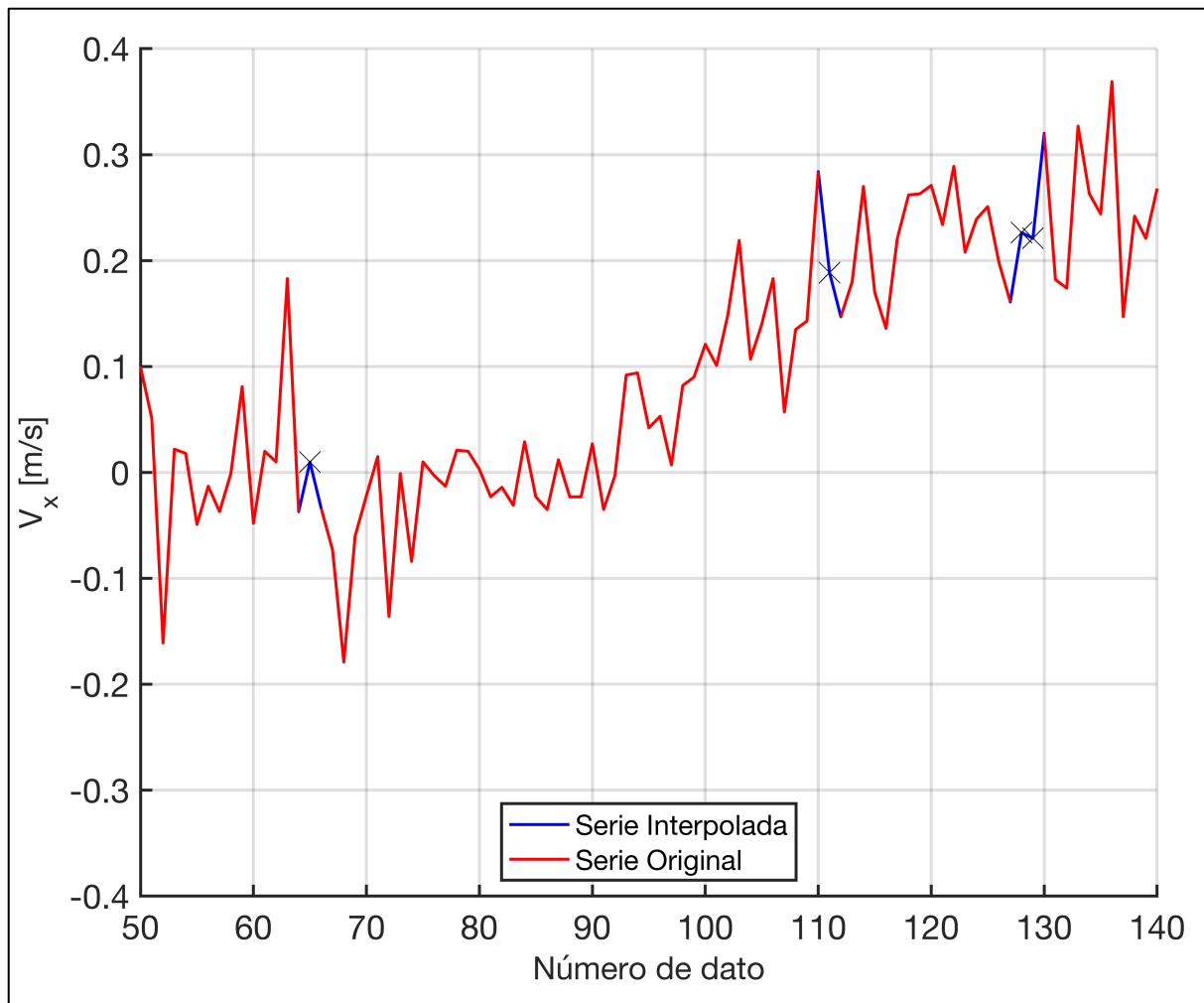


Figura 4 Se muestra una porción de la serie de tiempo original (línea roja) y de la serie de tiempo tiempo interpolada (línea azul), las cruces señalan las interpolaciones de valores NaN (x) de la componente 'x' de la velocidad observada por el *Vector*.

Al tener un registro de datos aleatorios que se obtienen de manera continua a una alta tasa de muestreo, es frecuente tener valores atípicos, probablemente a causa de fallos en la interfase de comunicación entre los sensores (Bendat y Piersol, 2010). Además, los valores atípicos (*outliers*) son considerados como datos puntuales con valores fuera de lo común y mayores o menores que un cierto intervalo predeterminado, al tener esta condición se busca sustituirlos.

Como siguiente paso, se sustituyeron los *outliers* de las variables que componen el registro (velocidad lineal, velocidad angular, aceleración y presión) mediante la función "Filloutliers" de Matlab. Con esta función se identifican como *outliers* datos que sean mayores (menores) que la media local más (menos) tres desviaciones estándar (Ec. 1), con ventana móvil de 1 minuto de mediciones (la media local, es relativa a la duración de la ventana). Cualquier dato identificado como *outlier* se sustituye mediante el método de interpolación lineal (Figura 5).

$$\bar{\eta} - 3\sigma > \eta > \bar{\eta} + 3\sigma.$$

Ec. 1

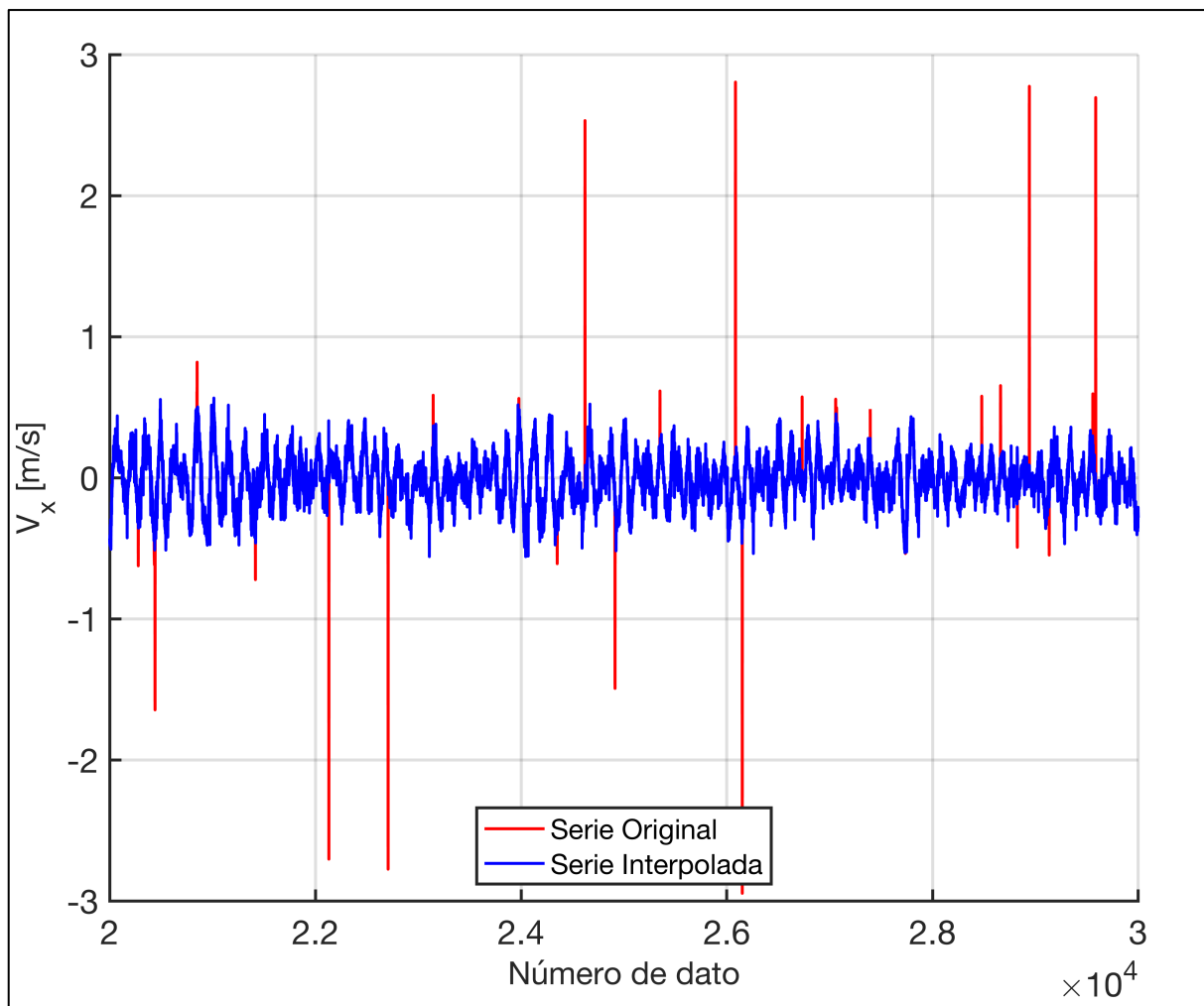


Figura 5 Serie de tiempo original con *outliers* (línea roja) y serie de tiempo tiempo interpolada (línea azul) sin *outliers* de la componente 'x' de la velocidad observada por el Vector.

4.1.3 Análisis del efecto de la sustitución de outliers en el espectro de frecuencia

Para determinar la duración adecuada de la ventana que se utiliza para evaluar el promedio, se generaron los espectros de V_x , a partir de una serie de tiempo de velocidad con *outliers* y la misma serie de velocidad sin *outliers* pero variando la duración de ventana (Figura 6).

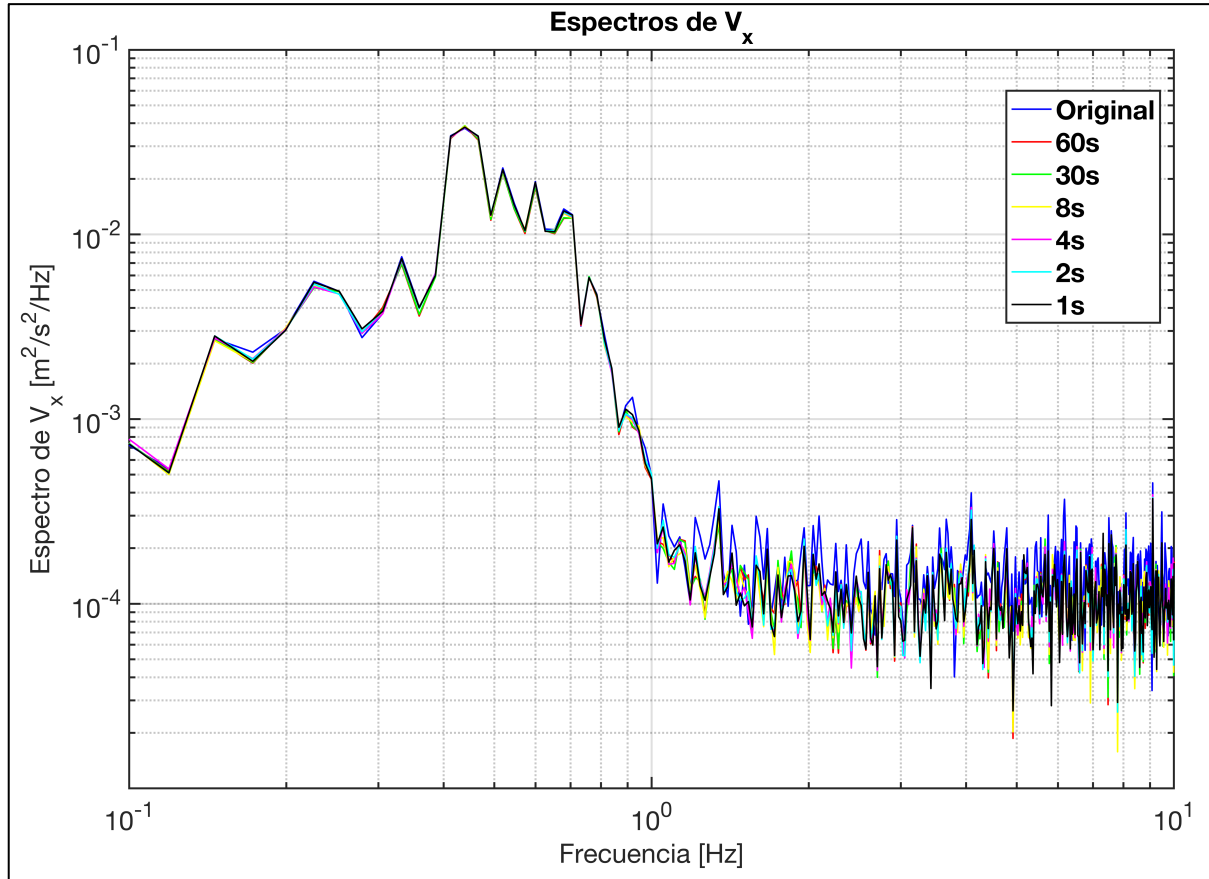


Figura 6 En donde se muestra un ejemplo del efecto de la duración de la ventana utilizada para calcular el promedio corrido en la sustitución de *outliers* en el espectro de una serie de tiempo de V_x observada por el sensor *Vector*. Específicamente se muestra el espectro de la serie original y el espectro de cada serie de tiempo resultante al utilizar ventana con duración de: 1, 2, 4, 8, 30 y 60 s.

Al evaluar los distintos tamaños de ventana, se optó por utilizar la ventana de 60 segundos ya que identificaba y sustituía una mayor cantidad de *outliers*. Por otra parte, no se encontraron diferencias en la densidad de energía espectral asociada al pico espectral (0.5 Hz en este caso en particular) con los espectros que se estimaron a partir de las series de tiempo en las que se utilizaron las distintas duraciones de ventanas. Sin embargo, no se observan diferentes niveles de densidad de energía espectral en las señales sin *outliers* en frecuencias mayores que 1 Hz, y esos cambios corresponden con la duración de la ventanas. No obstante, se sugiere un análisis más detallado para determinar de manera óptima la duración de la ventana y su efecto en frecuencias mayores que 1 Hz.

4.2 Corrección de las velocidades por el movimiento de la boya

Como se explica en Velasco y Nylund (2019), es necesario corregir las mediciones por causa del movimiento de la boya. En el presente trabajo, para captar el movimiento de una boya, se utilizó un *IMU* (el cual tiene integrado giroscopio, acelerómetro y un magnetómetro) instalado en el *Vector*. Con dicha información, es posible expresar las mediciones de velocidad y del movimiento de la boya en el sistema de referencia de la Tierra "*ENU*", que corresponde a las coordenadas "*Este*", "*Norte*" y "*Upward*" con *z* positiva hacia arriba.

Para transformar las velocidades (de las partículas inducidas por el oleaje) medidas por el *Vector* a un sistema de referencia fijo, se utilizaron las mediciones del *IMU* correspondientes al movimiento de la boya como se describe en Galván Pozos (2020).

La ecuación con la que se representan las velocidades transformadas y corregidas (U_{ENU}) sería:

$$U_{ENU} = R' U_{Vector} + R' V + \Omega \times R' L ,$$

Ec. 2

Analizando los términos del lado derecho de la ecuación se entiende que:

El primer término ($R' U_{Vector}$) representa la transformación de coordenadas de las velocidades registradas por el *Vector* en un sistema de referencia en una boya hacia un sistema de referencia en la Tierra

El segundo término ($R' V$) representa la transformación de coordenadas de las velocidades inducidas por los desplazamientos lineales medidas en el sistema de referencia de una boya hacia un sistema de referencia en la Tierra.

El tercer término ($\Omega \times R' L$) representa la transformación de coordenadas de las velocidades angulares de la boya medidas en el sistema de referencia de esa misma boya, hacia un sistema de referencia en la Tierra.

En donde V y Ω representan velocidad lineal y angular respectivamente, R' es la matriz que transforma las mediciones del sistema en la boya (U_{Vector} , V y Ω) al sistema de coordenadas de la Tierra (desarrollada en el trabajo de Galván-Pozos, 2020) y L es el vector posición de los transductores del *Vector* con respecto al sistema de coordenadas del *IMU*.

El término V fue calculado a partir de integrar las aceleraciones lineales (en sus componentes x , y , z) obtenidas al derivar el cambio en la velocidad (δV) de la boya registrado por el *IMU* con respecto a un dt igual a 1/64 Hz. Por su parte, el término Ω fue calculado al obtener la relación del cambio angular (δAng) de la boya registrado por el *IMU* con respecto a un dt igual a 1/64 Hz

4.3 Espectro direccional

Para estimar el espectro direccional, se consideran los fundamentos establecidos por Longuet-Higgins *et al.* (1963) con los que se describen la densidad de energía espectral $E(f)$, la distribución direccional de energía $D(\theta)$ y el ancho de la distribución angular de la energía (ψ) en función de la frecuencia (f).

Estos parámetros se estimaron siguiendo el método *PUV* en donde, en lugar de utilizar las elevaciones e inclinaciones como lo hacen Longuet-Higgins *et al.* (1963), se utiliza la presión y las velocidades de las partículas en sus componentes "Este" y "Norte". En dicho método se utilizan los coespectros y espectros de cuadratura para calcular los parámetros previamente mencionados y se aplica un factor de corrección con respecto a la profundidad, con el objetivo de representar los espectros direccionales en superficie mediante las ecuaciones propuestas por Gordon y Lohrmann (2002). En este método se utiliza la teoría lineal del oleaje para convertir espectros de la velocidad (C_{uu}) y la presión (C_{pp}) a espectros de elevación de la superficie ($C_{\eta\eta p}$ y $C_{\eta\eta u}$ respectivamente), tal que:

$$C_{\eta\eta p} = \left[\frac{\cosh kh}{\cosh k(h+z)} \right]^2 \frac{C_{pp}}{\rho^2 g^2}$$

Ec. 3

$$C_{\eta\eta u} = \left[\frac{\sinh kh}{\cosh k(h+z)} \right]^2 \frac{C_{uu}}{\sigma^2}$$

Ec. 4

En donde $C_{\eta\eta p}$ (Ec. 3) y $C_{\eta\eta u}$ (Ec. 4) corresponden al espectro de elevación de la superficie basado en la presión (p) y velocidad (u), k equivale al número de onda, h corresponde al nivel medio del agua con origen en el fondo, z es la distancia vertical relativa al nivel medio del nivel del agua (positiva hacia arriba), σ es la frecuencia, ρ es la densidad y g corresponde con la aceleración debida a la gravedad.

Para estimar la dirección (D) se utiliza:

$$D = \text{atan2} (C_{pu}, C_{pv}),$$

Ec. 5

en donde C_{pu} y C_{pv} corresponden a la parte real del espectro de cuadratura de la presión y velocidad con componentes u (este) y v (norte).

Para obtener el ancho de la distribución direccional de la energía (S) se utiliza

$$S = \left(\frac{1-R}{2} \right)^{0.5} \quad \text{siendo} \quad R = \left(\frac{(C_{uu}-C_{vv})^2 + 4(C_{uv})^2}{(C_{uu}+C_{vv})^2} \right)^{0.5},$$

Ecs. 6 y 7

en donde C_{uu} y C_{vv} son los espectros de las componentes de velocidad y C_{uv} es el espectro cruzado de las componentes u y v de la velocidad.

5. Resultados y discusión

A continuación se presentan los resultados más relevantes del trabajo, entre ellos, el análisis de las mediciones del *Vector* al ser corregidas por el movimiento de la boya (sección 5.1) y finalmente, las comparaciones entre los parámetros espectrales del *Vector* con respecto a los parámetros espectrales estimados a partir de los datos del *Signature1000* (sección 5.2).

5.1 Análisis de la corrección por el movimiento de la boya en las mediciones

Para mostrar el resultado del análisis debido a la corrección por el movimiento de la boya, se seleccionaron tres fechas del registro de mediciones del *Vector* tomando como referencia la altura significativa (H_s) asociada a las mismas.

Tomando en cuenta la relación entre H_s y $E(f)$ (Holthuijsen, 2007) tenemos que:

$$m_0 = \int E(f) df .$$

Ec. 8

$$H_s \approx 4 \sqrt[2]{m_0} .$$

Ec. 9

Con las fechas seleccionadas, se consideran condiciones de oleaje con alturas bajas (0.57 m), medias (1.034 m) y altas (3 m), durante 06/11/18 a las 14:00:00, 01/02/19 a las 01:00:00 y el 03/02/19 las 02:00:00 respectivamente. En las Figuras 7 y 8, se muestran como resultados asociados a las campañas de mediciones de octubre-noviembre 2018 y enero-febrero de 2019, respectivamente, las series de tiempo de H_s a partir del espectro de la componente horizontal de la velocidad orbital del oleaje (u), al ser medida mediante el *Vector* y *Signature1000*.

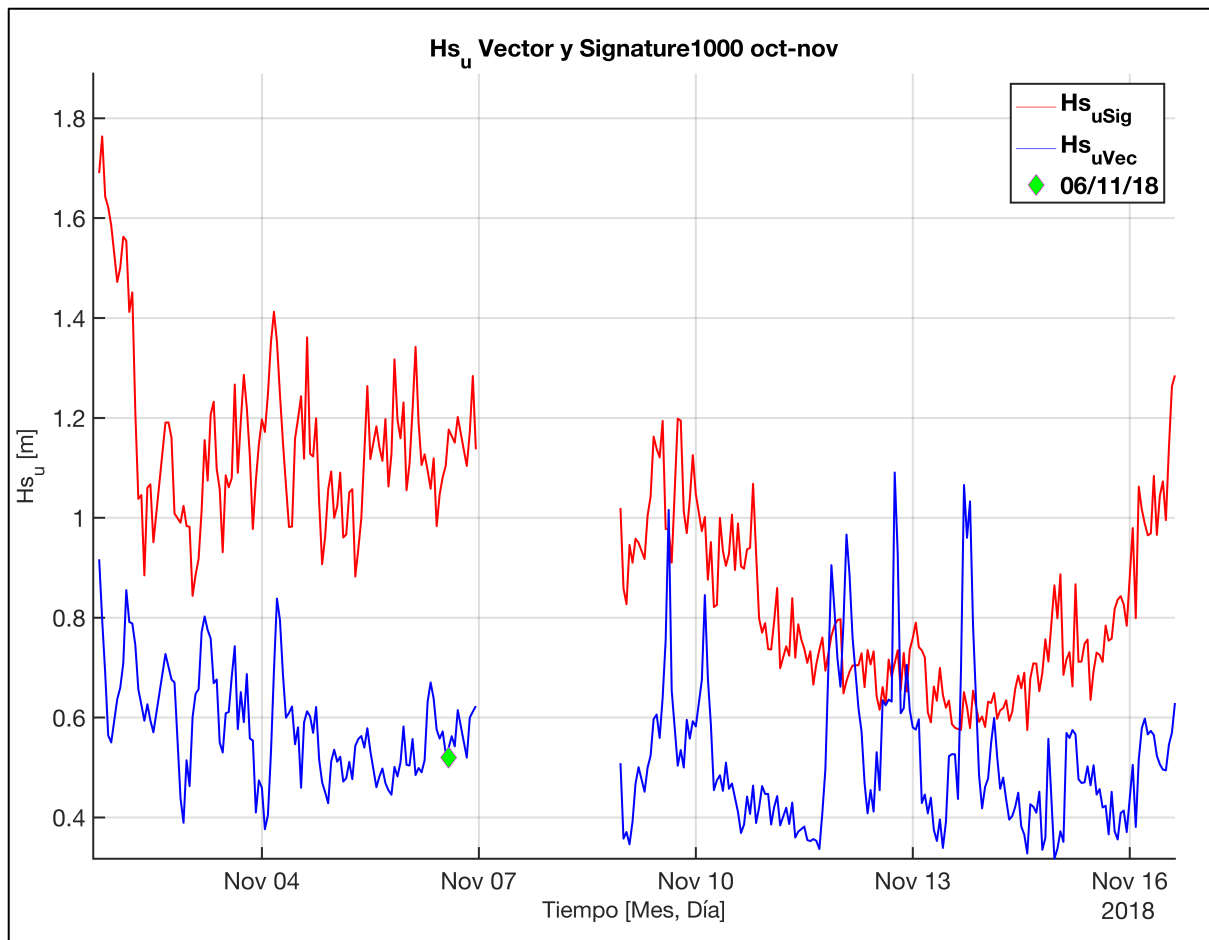


Figura 7 Hs_u del periodo octubre-noviembre estimada a partir de mediciones serie del *Vector* (línea azul) y del *Signature1000* (línea roja), el rombo verde señala un valor de Hs_u de 0.57 m.

En el primer periodo, se encuentra una diferencia de Hs_u entre *Vector* y el *Signature1000*, en donde Hs_u *Signature1000* alcanza valores de hasta 1.7 m mientras que *Vector* tiene como máximo Hs_u 1.1 m.

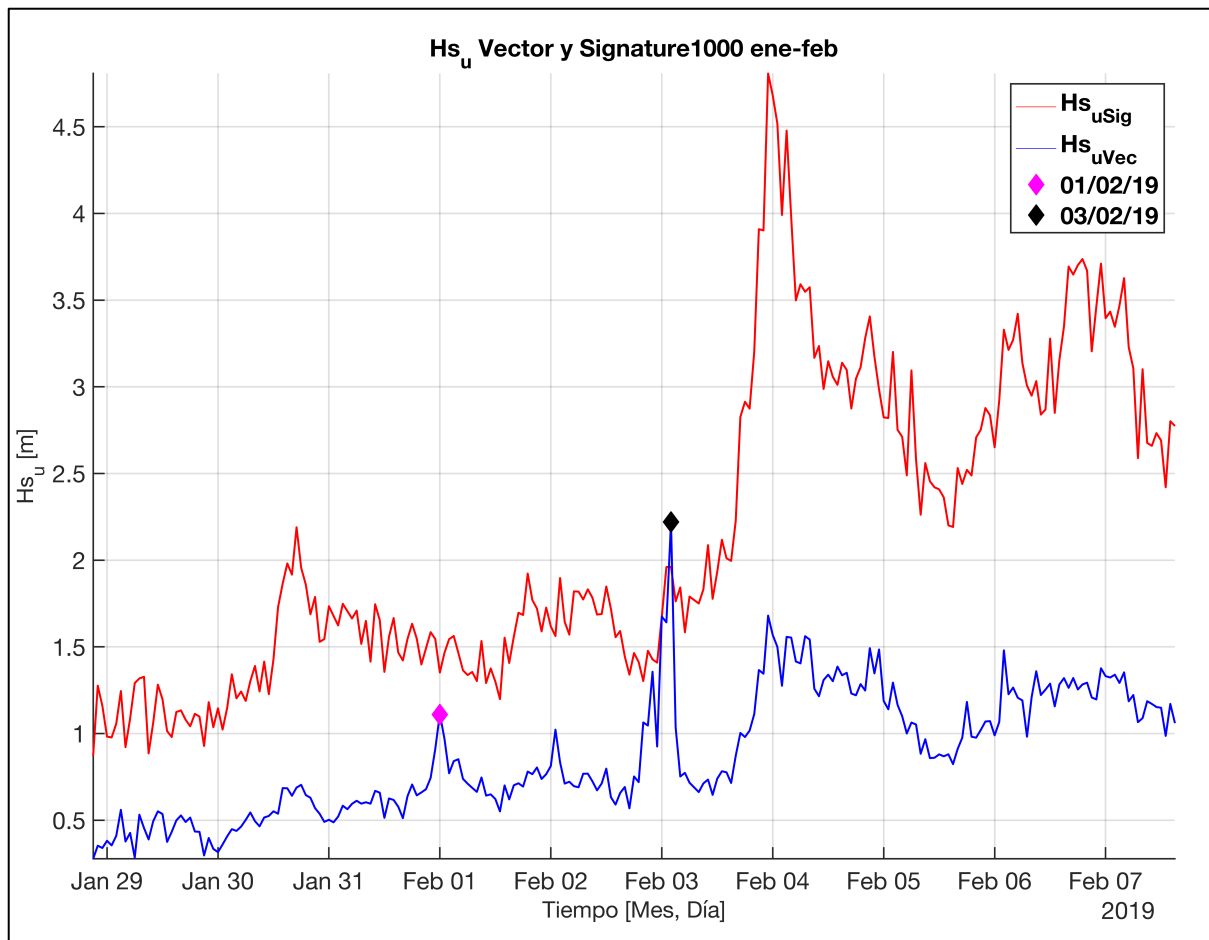


Figura 8 H_{s_u} del periodo enero-febrero para la serie de *Vector* (línea azul) y *Signature1000* (línea roja), el rombo magenta señala un valor de H_{s_u} de 1.03 m y el rombo negro señala un valor de H_{s_u} de 2.2 m.

En el segundo periodo, también se encuentra una diferencia de H_{s_u} entre *Vector* y el *Signature1000*, en donde H_{s_u} *Signature1000* alcanza valores mayores a 4.5 m mientras que *Vector* tiene como máximo H_{s_u} de 2.2 m. No obstante, se puede ver un patrón de incremento en H_{s_u} en ambas señales y una cierta atenuación en la señal de H_{s_u} del sensor *Vector* con respecto a la señal del sensor *Signature1000*.

Para ilustrar el efecto de la corrección por causa de las velocidades asociadas al movimiento de la boya en las mediciones del *Vector*, se compararon los términos (del lado derecho) en la componente "E" los casos de baja (Figura 9), media (Figura 10) y alta (Figura 11) H_{su} .

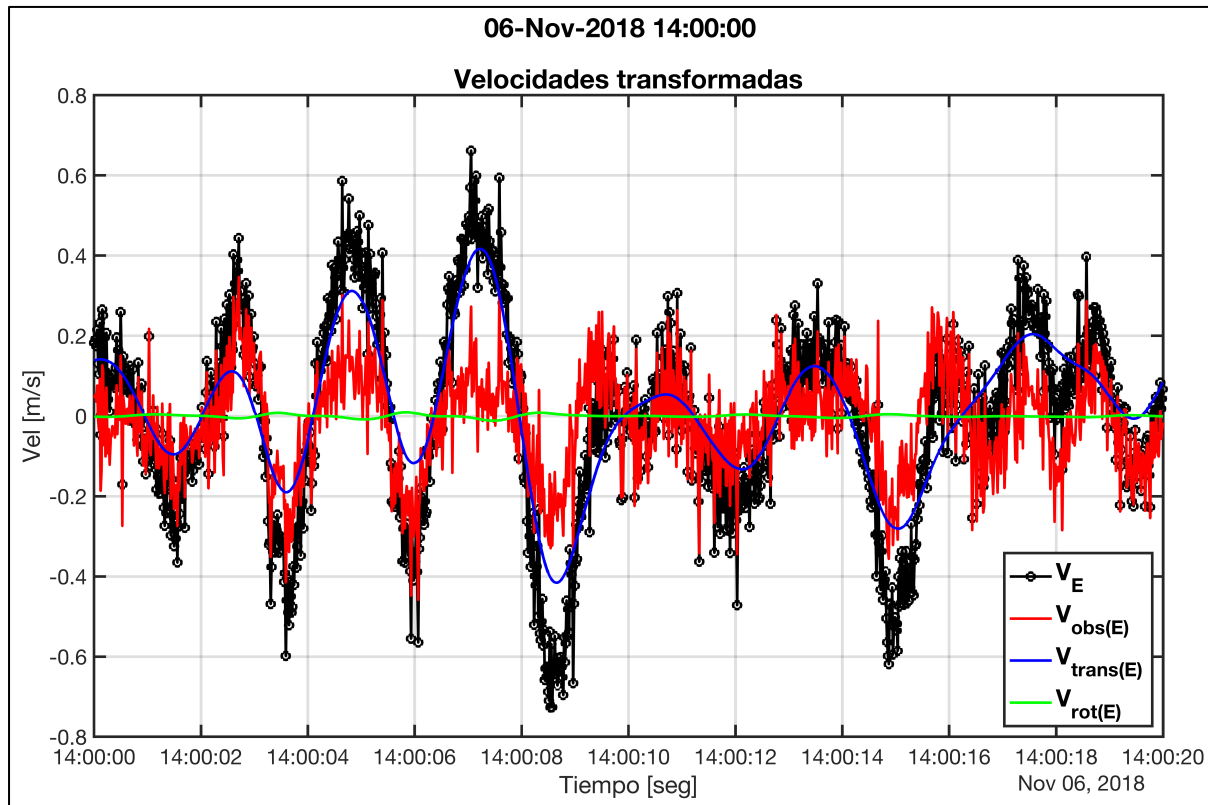


Figura 9 Velocidades transformadas en condición de H_{su} baja en donde la línea verde ($V_{rot(E)}$) representa la velocidad asociada a la rotación de la boya, la línea azul ($V_{trans(E)}$) representa la velocidad asociada al movimiento de translación de la boya, la línea roja ($V_{obs(E)}$) representa la velocidad observada (medida) por el *Vector* y la línea negra con círculos (V_E) es la suma de las tres velocidades previamente mencionadas.

Como se observa, se tiene un débil aporte de velocidad debido a las rotaciones, por otro lado, la corrección debido al movimiento de translación de la boya hacia las velocidades medidas por el *Vector* corresponde con un aporte importante. Además, las velocidades correspondientes al movimiento de translación de la boya, tienden a presentar una mayor magnitud con respecto a la medición del *Vector*.

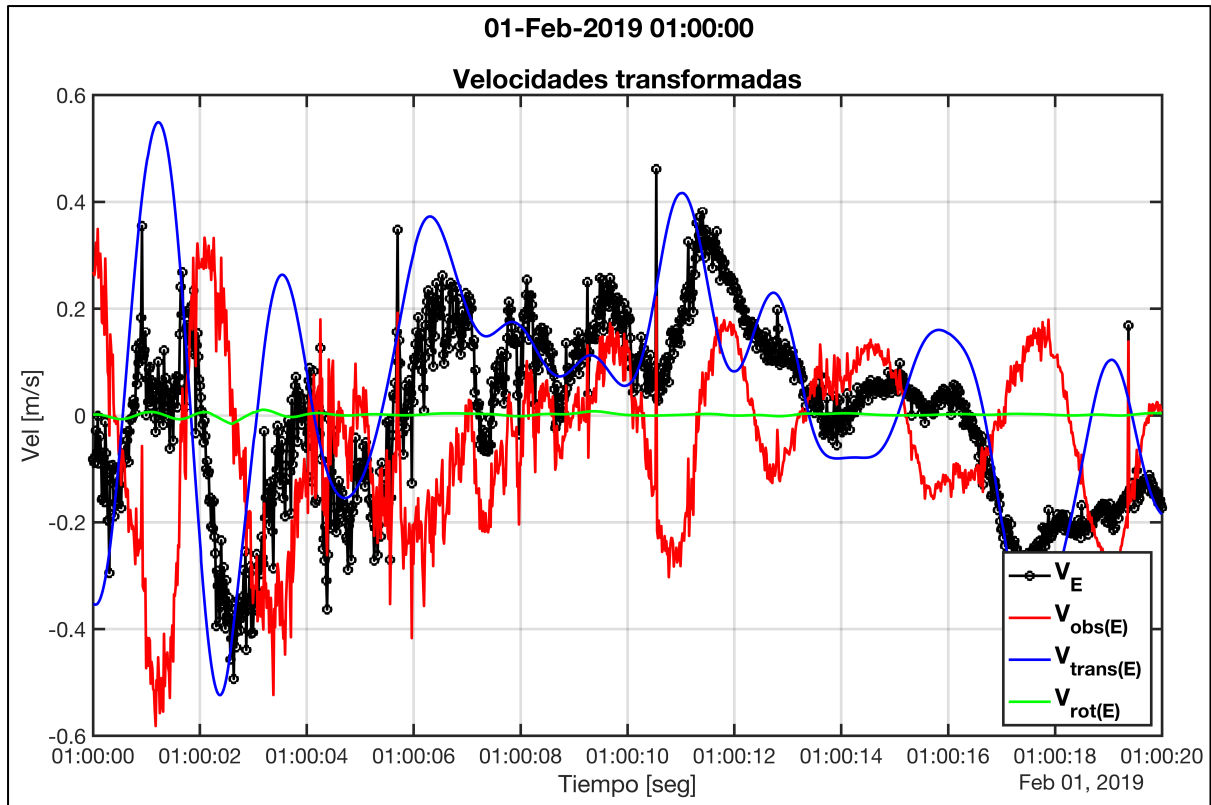


Figura 10 Velocidades transformadas en condición de Hs_u media en donde la línea verde ($V_{rot(E)}$) representa la velocidad asociada a la rotación de la boya, la línea azul ($V_{trans(E)}$) representa la velocidad asociada al movimiento de translación de la boya, la línea roja ($V_{obs(E)}$) representa la velocidad observada (medida) por el *Vector* y la línea negra (V_E) es la suma de las tres velocidades previamente mencionadas.

Como se observa, aún se tiene un débil aporte de velocidad debido a las rotaciones, sin embargo, en condiciones de Hs_u media, existe un comportamiento casi opuesto en las velocidades medidas por el *Vector*, con respecto a la velocidad asociada al movimiento de translación de la boya.

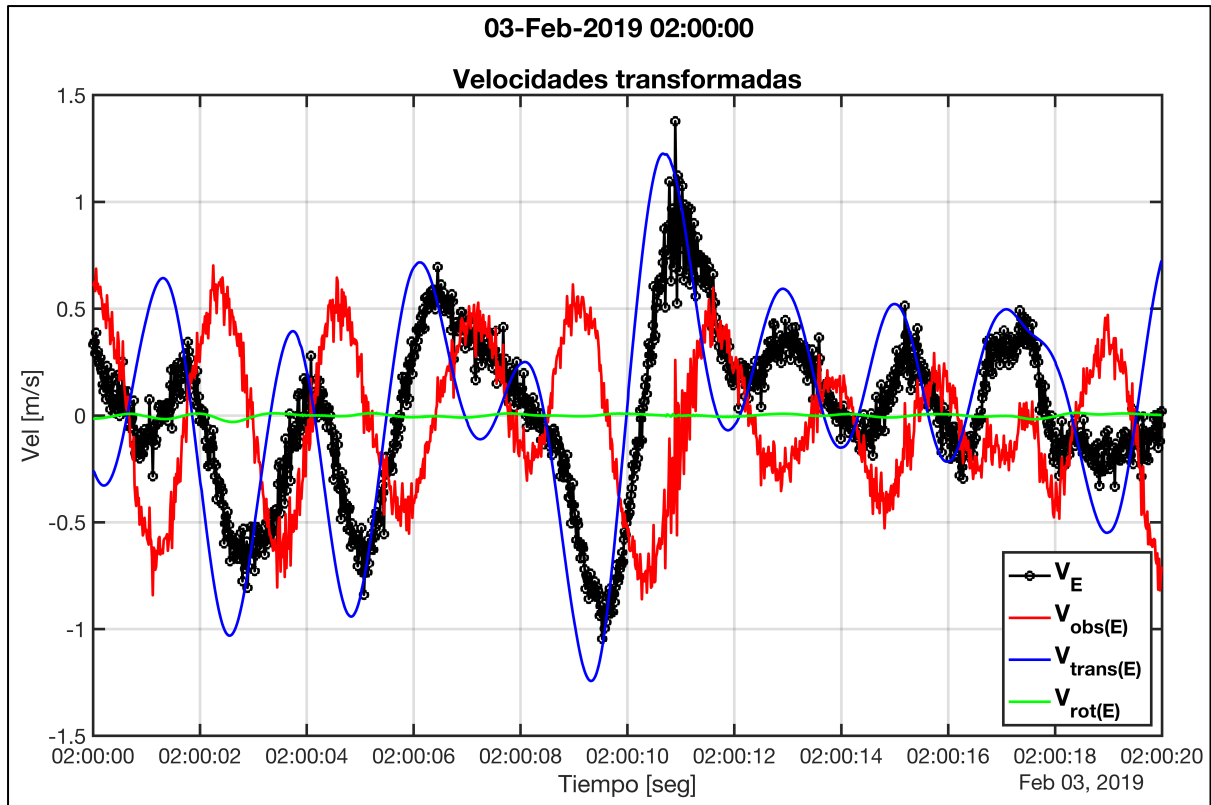


Figura 11 Velocidades transformadas en condición de alta Hs_u en donde la línea verde ($V_{rot(E)}$) representa la velocidad asociada a la rotación de la boya, la línea azul ($V_{trans(E)}$) representa la velocidad asociada al movimiento de translación de la boya, la línea roja ($V_{obs(E)}$) representa la velocidad observada (medida) por el *Vector* y la línea negra (V_E) es la suma de las tres velocidades previamente mencionadas.

En este caso, el aporte de velocidad debido a las rotaciones continúa siendo débil, sin embargo, en condiciones de alta Hs_u , se tienen mayores valores de velocidad asociada al movimiento de translación de la boya, con lo que se confirma la necesidad de realizar correcciones a las mediciones registradas por el *Vector*.

Además de hacer la comparación con las velocidades asociadas a las mediciones y el movimiento de la boya, también se estimó el espectro de velocidad en la componente "E" de las mediciones mediante la función "*spectf*" (que obtiene el espectro en frecuencia, sin realizar alguna corrección por la profundidad), para los casos con baja (Figura 12), media (Figura 13) y alta (Figura 14) Hs_u .

Recordando la relación entre el periodo (T) expresado en segundos y la frecuencia (f) expresada en Hz, la cual está dada por:

$$T = \frac{1}{f}.$$

Ec. 10

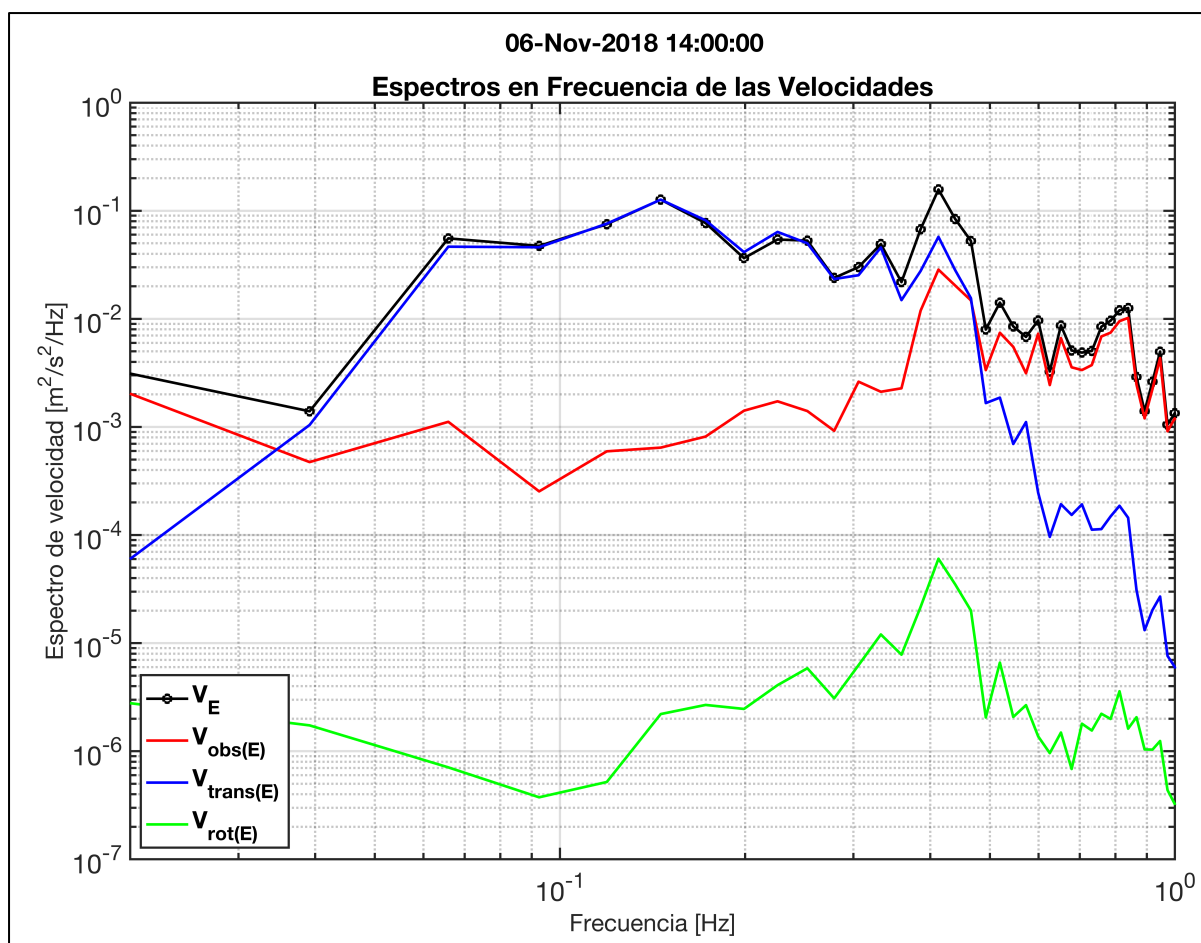


Figura 12 Espectro en frecuencia de las velocidades en condición de baja (0.57 m) H_{Su} en donde la línea verde ($V_{rot(E)}$) representa la energía asociada a la velocidad de rotación de la boya, la línea azul ($V_{trans(E)}$) representa la energía asociada a la velocidad del movimiento de translación de la boya, la línea roja ($V_{obs(E)}$) representa la energía asociada a la velocidad observada (medida) por el *Vector* y la línea negra con círculos (V_E) representa la energía asociada a la suma de las tres velocidades previamente mencionadas.

Al tener los espectros correspondientes a las señales de velocidad, se puede analizar que la densidad de energía espectral de la velocidad asociada al movimiento de rotación de la boya no influye significativamente en la corrección de las mediciones observadas, caso opuesto a la densidad de energía espectral del movimiento de translación de la boya, la cual, considera una mayor energía que la de las mediciones observadas por el *Vector* especialmente en frecuencias mayores que 0.07 Hz. No obstante, esa densidad de energía espectral no contemplada por las mediciones observadas por el *Vector* decae en la región espectral con frecuencias mayores que 0.5 Hz. En este caso, se visualiza un pico espectral asociado con una frecuencia igual a 0.41 Hz (periodo equivalente a 2.43 seg).

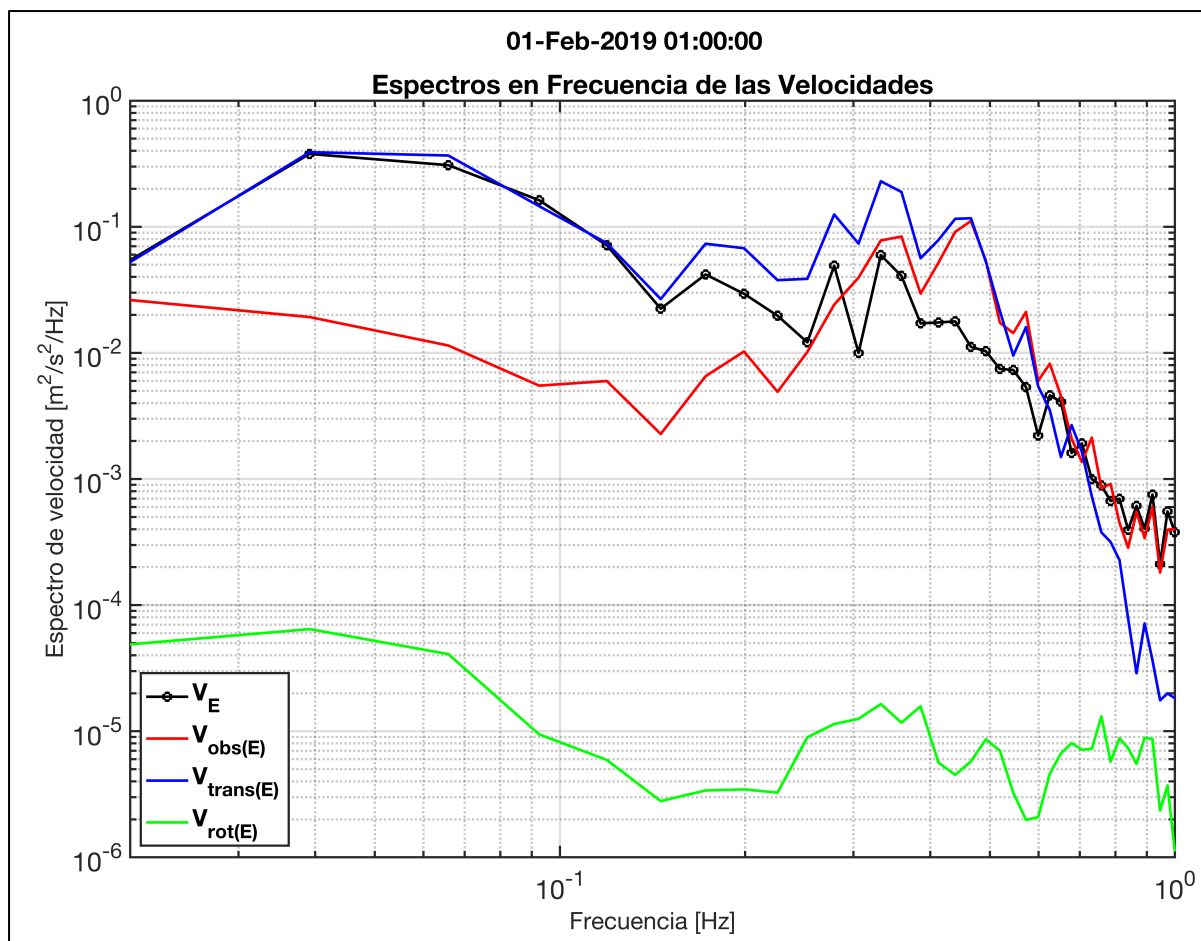


Figura 13 Espectro en frecuencia de las velocidades en condición de media (1.034 m) H_{Su} en donde la línea verde ($V_{rot(E)}$) representa la energía asociada a la velocidad de rotación de la boya, la línea azul ($V_{trans(E)}$) representa la energía asociada a la velocidad del movimiento de translación de la boya, la línea roja ($V_{obs(E)}$) representa la energía asociada a la velocidad observada (medida) por el *Vector* y la línea negra con círculos (V_E) representa la energía asociada a la suma de las tres velocidades previamente mencionadas.

Como se observa, el aporte de energía asociada al movimiento de rotación de la boya sigue sin influir significativamente en la corrección de las mediciones observadas, caso opuesto a la densidad de energía espectral del movimiento de translación de la boya, que considera una mayor densidad de energía espectral en frecuencias mayores que 0.04 Hz con respecto a las mediciones observadas por el *Vector*. No obstante, esa densidad de energía espectral no contemplada por las mediciones observadas por el *Vector* decae en la región espectral con frecuencias mayores que 0.7 Hz. Para este caso, se visualizan dos picos espectrales asociados a una frecuencia de 0.04 Hz (25 seg) y otro de menor densidad de energía espectral con frecuencia de 0.33 Hz (periodo equivalente a 3.03 seg).

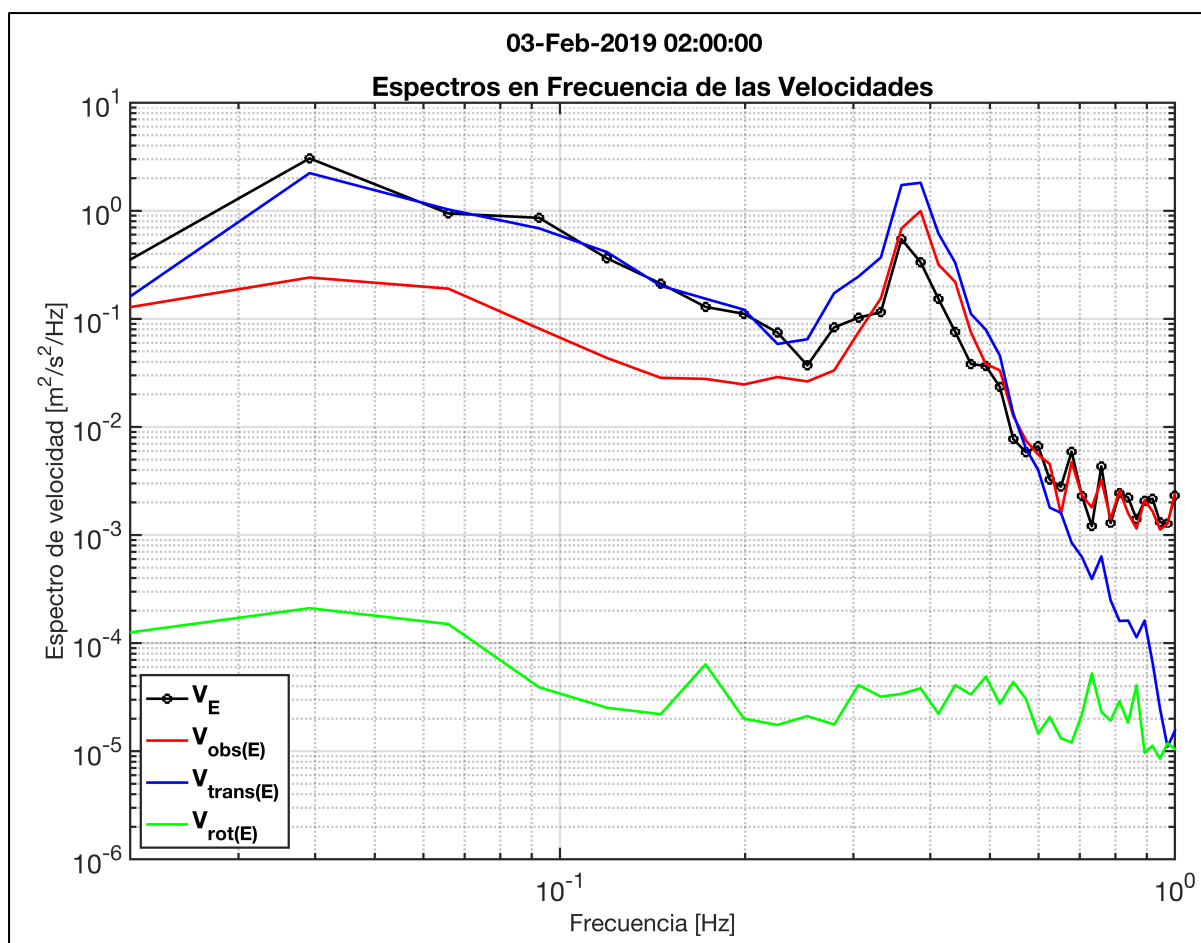


Figura 14 Espectro en frecuencia de las velocidades en condición de alta (3 m) H_{su} en donde la línea verde ($V_{rot(E)}$) representa la energía asociada a la velocidad de rotación de la boya, la línea azul ($V_{trans(E)}$) representa la energía asociada a la velocidad del movimiento de translación de la boya, la línea roja ($V_{obs(E)}$) representa la energía asociada a la velocidad observada (medida) por el *Vector* y la línea negra con círculos (V_E) representa la energía asociada a la suma de las tres velocidades previamente mencionadas.

En este tercer caso, la densidad de energía espectral asociada al movimiento de rotación de la boya sigue sin ser considerable en la corrección de las mediciones observadas, y al igual que en los casos anteriores, la densidad de energía espectral del movimiento de translación de la boya, sigue considerando una mayor densidad de energía espectral en frecuencias mayores que 0.04 Hz con respecto a las mediciones observadas por el *Vector*, el cual, decae en la región espectral con frecuencias mayores que 0.6 Hz. Para este caso, también se visualizan dos picos espectrales, uno asociado con una frecuencia de 0.04 Hz (periodo equivalente a 25 seg) y otro de menor densidad de energía del oleaje con frecuencia de 0.36 Hz (periodo equivalente a 2.77 seg).

5.2 Comparación entre Vector y Signature1000

Para comparar las mediciones realizadas por *Vector* y *Signature1000*, se consideraron Hs_u y Hs_p , estimadas a partir de cada sensor (sección 5.2.1). Finalmente, se analizaron las variables espectrales tales como $E(f)$, S_u , S_p , $\theta(f)$ y $\psi(f)$ estimados a partir del método *PUV* (sección 5.2.2).

5.2.1 Comparación entre Hs_u y Hs_p

Previamente se compararon los valores de Hs_u de *Vector* y *Signature1000*, si recordamos la Ec. 9, Hs_u está relacionada con el espectro de frecuencia ($\int E(f) df$), particularmente el espectro de frecuencia de la velocidad (S_u) que fue estimado a partir del método *PUV*. Para el caso de Hs_p en lugar de utilizar S_u , se utiliza el espectro de frecuencia en función de la presión (S_p).

Para conocer la diferencia entre Hs_u y Hs_p en ambos sensores, se generaron sus respectivas series de tiempo asociadas a cada periodo de medición, en donde se tomaron como referencia las series del sensor *Signature1000*, mostradas en las Figuras 7 y 8 en el caso de Hs_u , y las Figuras 15 y 16 en el caso de Hs_p .

En el caso de Hs_u se esperaban diferencias, ya que se estima a partir de S_u , parámetro calculado a partir de las velocidades de las partículas observadas con distintos instrumentos y diferentes sistemas de referencia, no obstante, se observaron secciones con comportamiento similar. Considerando lo anterior para Hs_p , también se esperaban diferencias entre un sensor y otro, sin embargo, los valores de la serie del *Vector* muestran amplias diferencias con respecto a la serie del *Signature1000*.

Esta situación, llevó a la idea de una posible corrección a la medición de la presión del sensor *Vector* por causa del movimiento de la boya, la cual no es considerada en la metodología seguida.

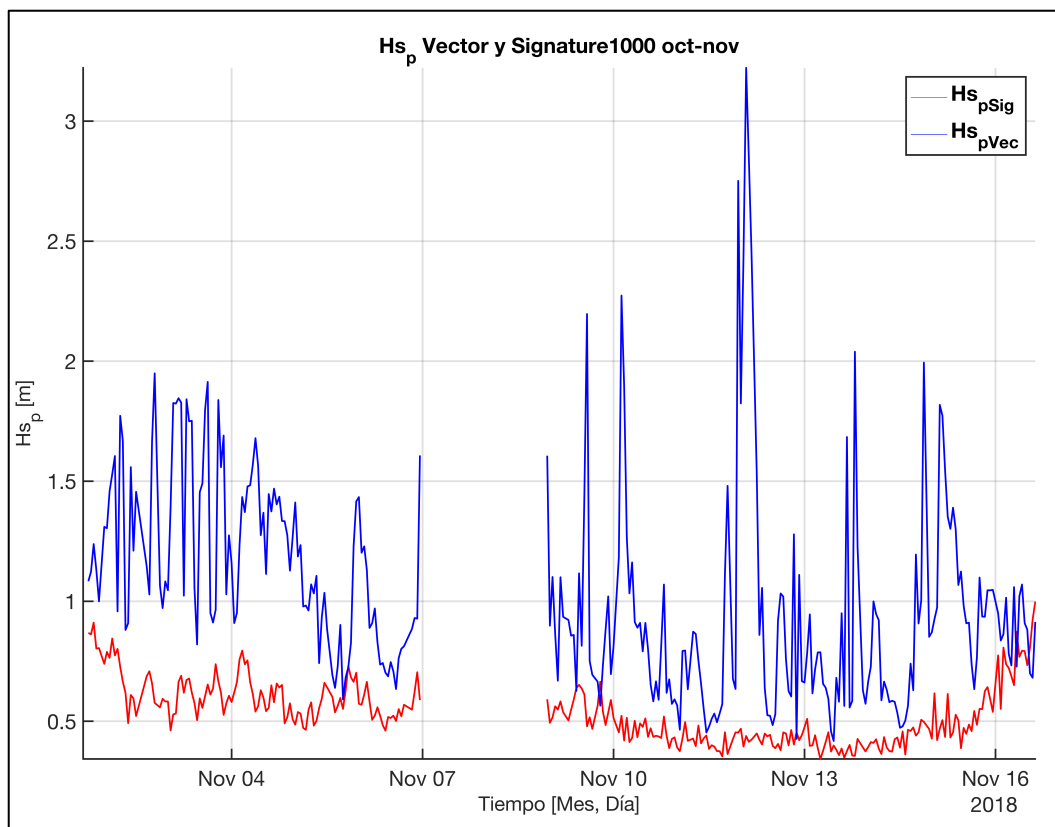


Figura 15 Hs_p del periodo octubre-noviembre para la serie del Vector (línea azul) y Signature1000 (línea roja).

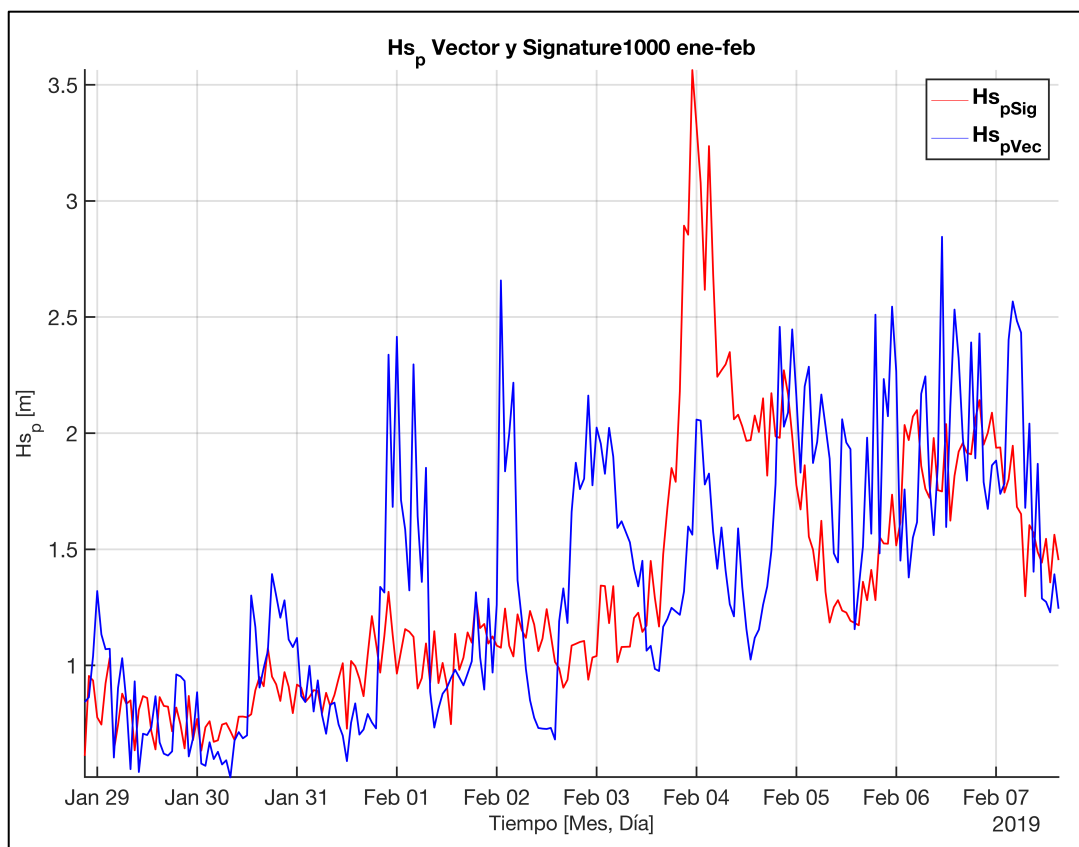


Figura 16 Hs_p del periodo enero-febrero para la serie del Vector (línea azul) y Signature1000 (línea roja).

5.2.2 Comparación de las variables espectrales

Como parte final del presente trabajo, se estimaron (utilizando el método *PUV*) y compararon las variables espectrales $E(f)$, S_u , S_p , (Figuras 17 y 18), $\theta(f)$ (Figura 19) y $\psi(f)$ (Figura 20).

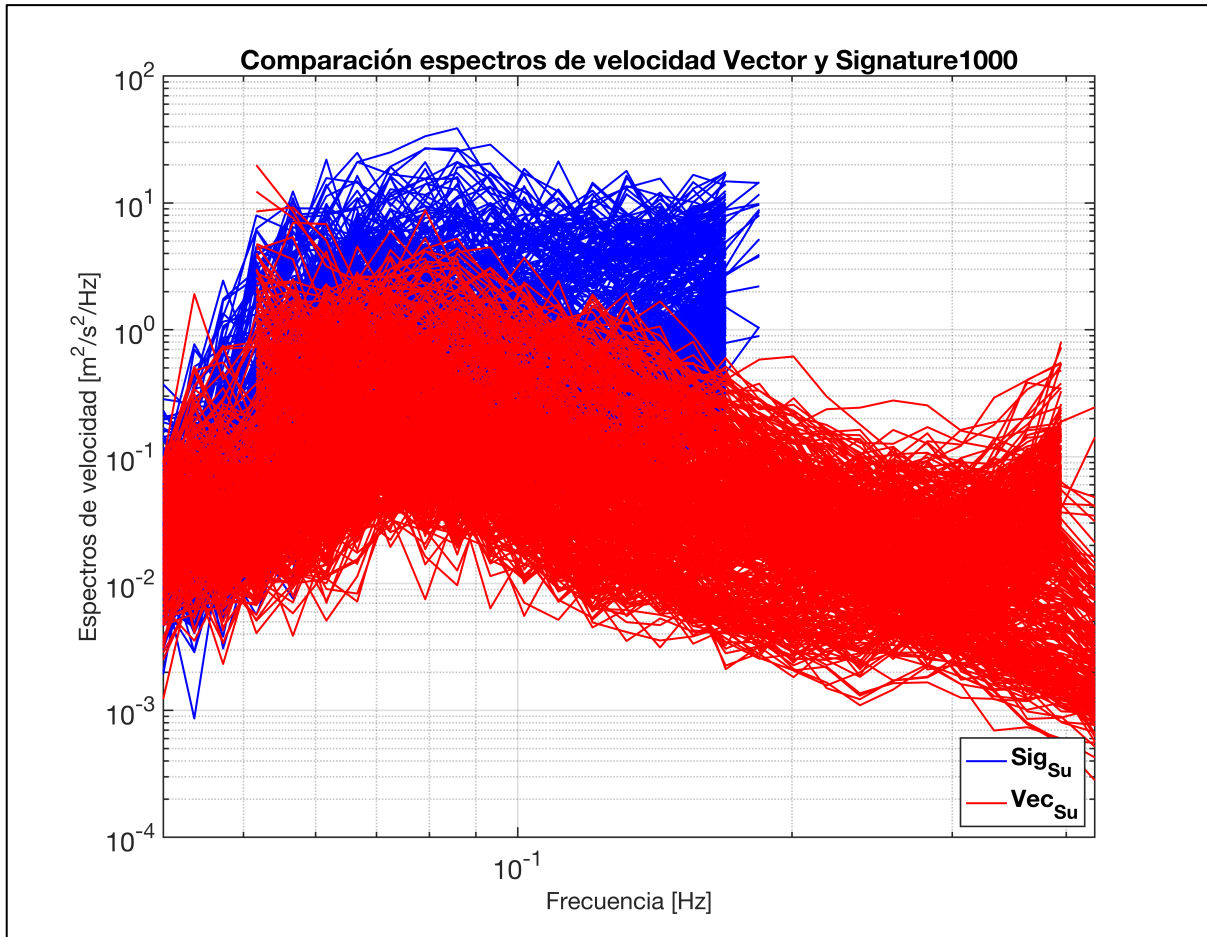


Figura 17 Comparación espectros de velocidad Vector y Signature1000 en donde presentan todos los datos de S_u del registro, en rojo los correspondientes a la serie de Vector, en azul los correspondientes a la serie de Signature1000.

Para conocer el comportamiento de S_u se compararon las mediciones de ambos sensores a lo largo de los dos periodos de medición. Para la serie del *Vector*, se pueden observar dos intervalos de frecuencias en los que fue común tener asociado un pico espectral, el primero (y más energético) en el intervalo de 0.06 (16.6 seg) a 0.09 Hz (11.1 seg), el segundo intervalo se presentó entre 0.3 (3.3 seg) y 0.4 Hz (2.5 seg). Por otro lado, se encontró que en la serie del *Signature1000* el intervalo asociado al pico espectral estaba ubicado entre 0.06 (16.66 seg) y 0.08 Hz (12.5 seg), sin embargo, para esta serie no se logran resolver frecuencias mayores a 0.18 Hz (5.5 seg) a causa de la atenuación que se da en la señal de la velocidad por la profundidad, por ello no se muestran señales después de esa frecuencia.

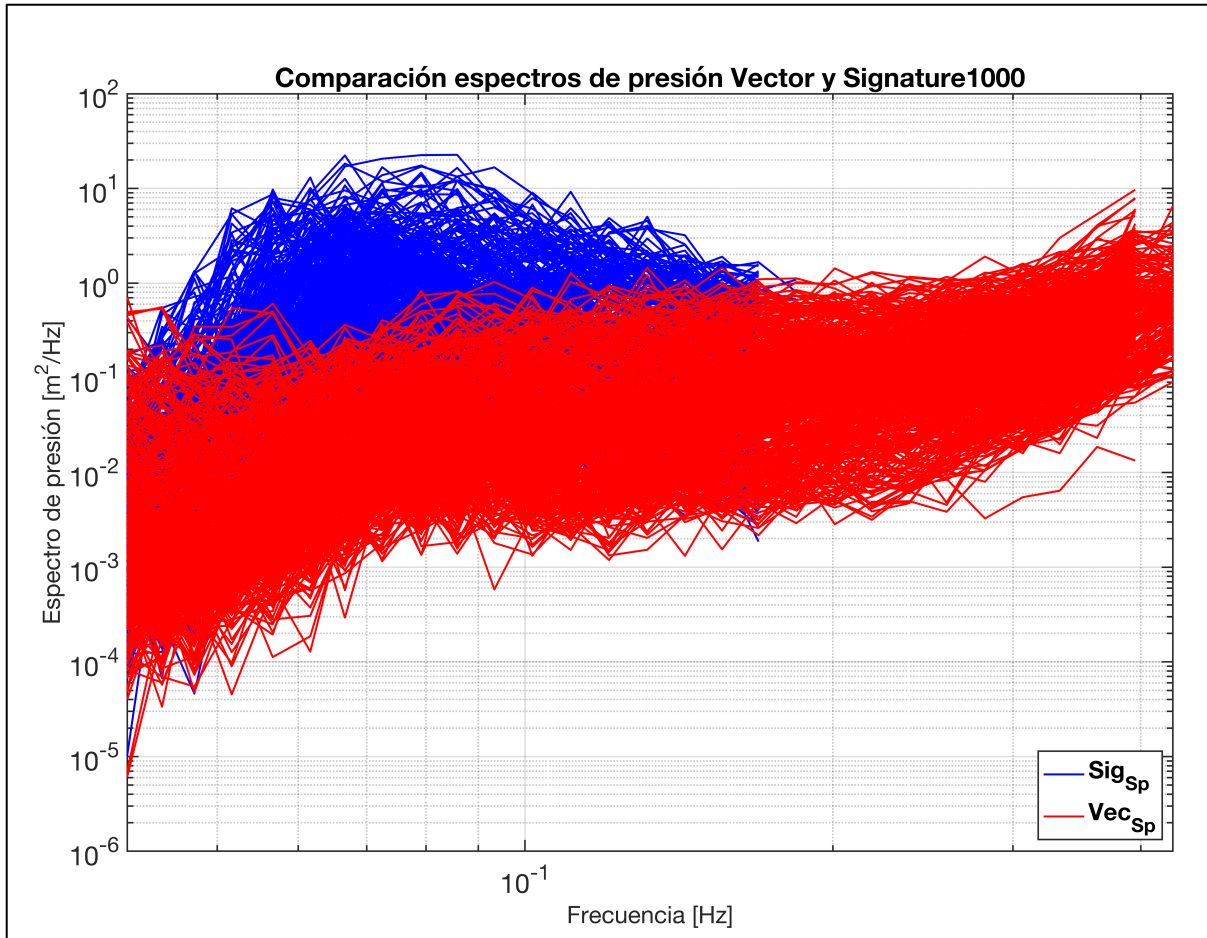


Figura 18 Comparación espectros de velocidad *Vector* y *Signature1000* en donde presentan todos los valores de S_p del registro, en rojo los correspondientes a la serie de *Vector* y en azul los correspondientes a la serie de *Signature1000*.

Para el caso de S_p , la señal generada a partir del *Signature1000* tiene un comportamiento similar a la señal que se observa con S_u del *Signature1000*, por otra parte, la serie del *Vector* presenta un comportamiento distinto a la señal de S_u del *Vector*.

Algo que destacar en ambas comparaciones, es la diferencia en los niveles de densidad de energía espectral, la cual se ve influenciada por la presión debido al factor de escalamiento presente en el método *PUV*. Al considerar esta relación, se refuerza la idea de una posible corrección a las mediciones de presión.

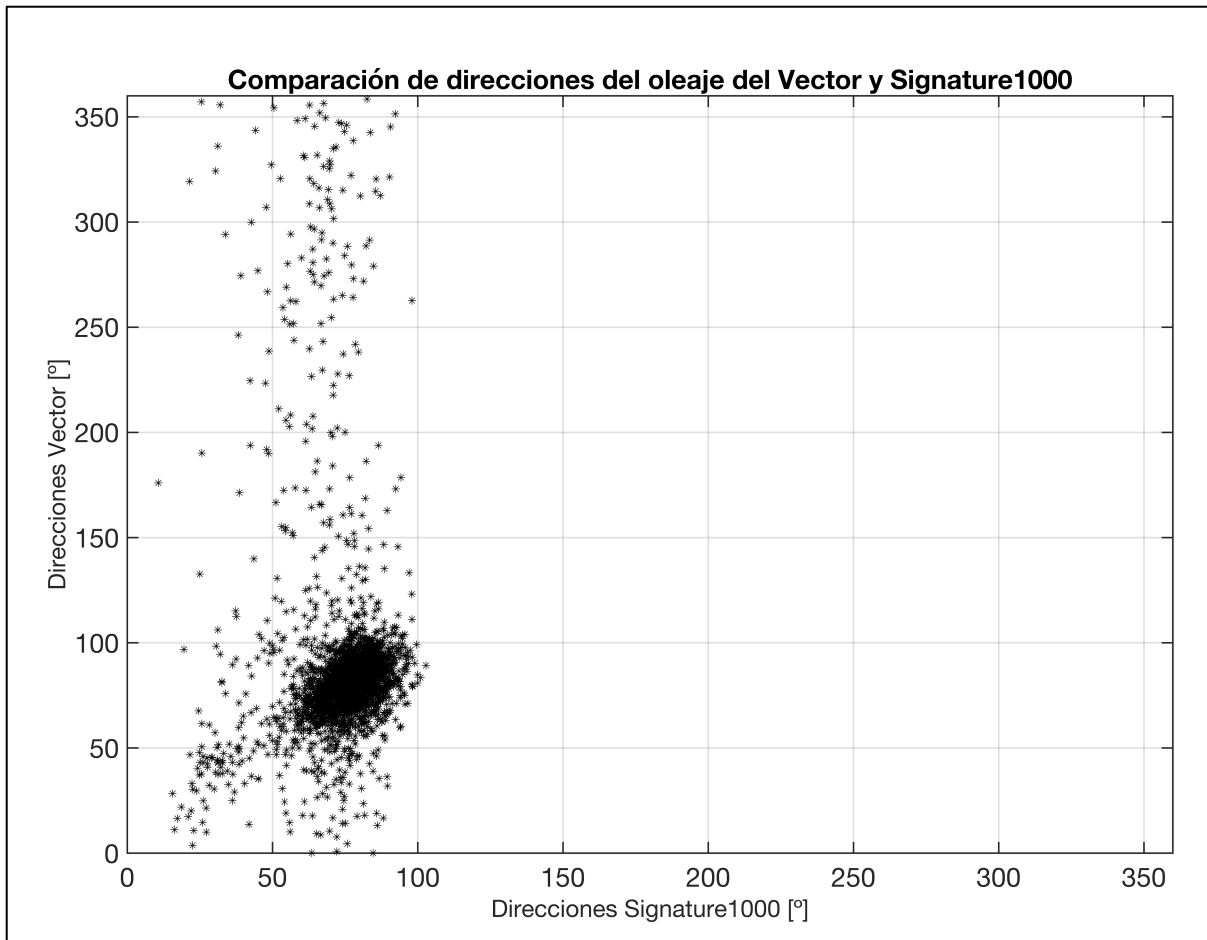


Figura 19 Comparación de direcciones del oleaje del *Vector* y *Signature1000* correspondientes a las frecuencias de todo el registro.

El segundo parámetro espectral comparado, es la dirección de propagación del oleaje en cada banda de frecuencia para un sistema de referencia azimutal, en la que se observa una fuerte relación en el rango de 50 a 100°, sin embargo, se presentan variaciones asociadas principalmente a las mediciones del *Vector*, y aunque de manera general se tiene una buena relación en la dirección, dicha variabilidad podría asociarse con una posible falta de corrección en los valores de la presión del *Vector*.

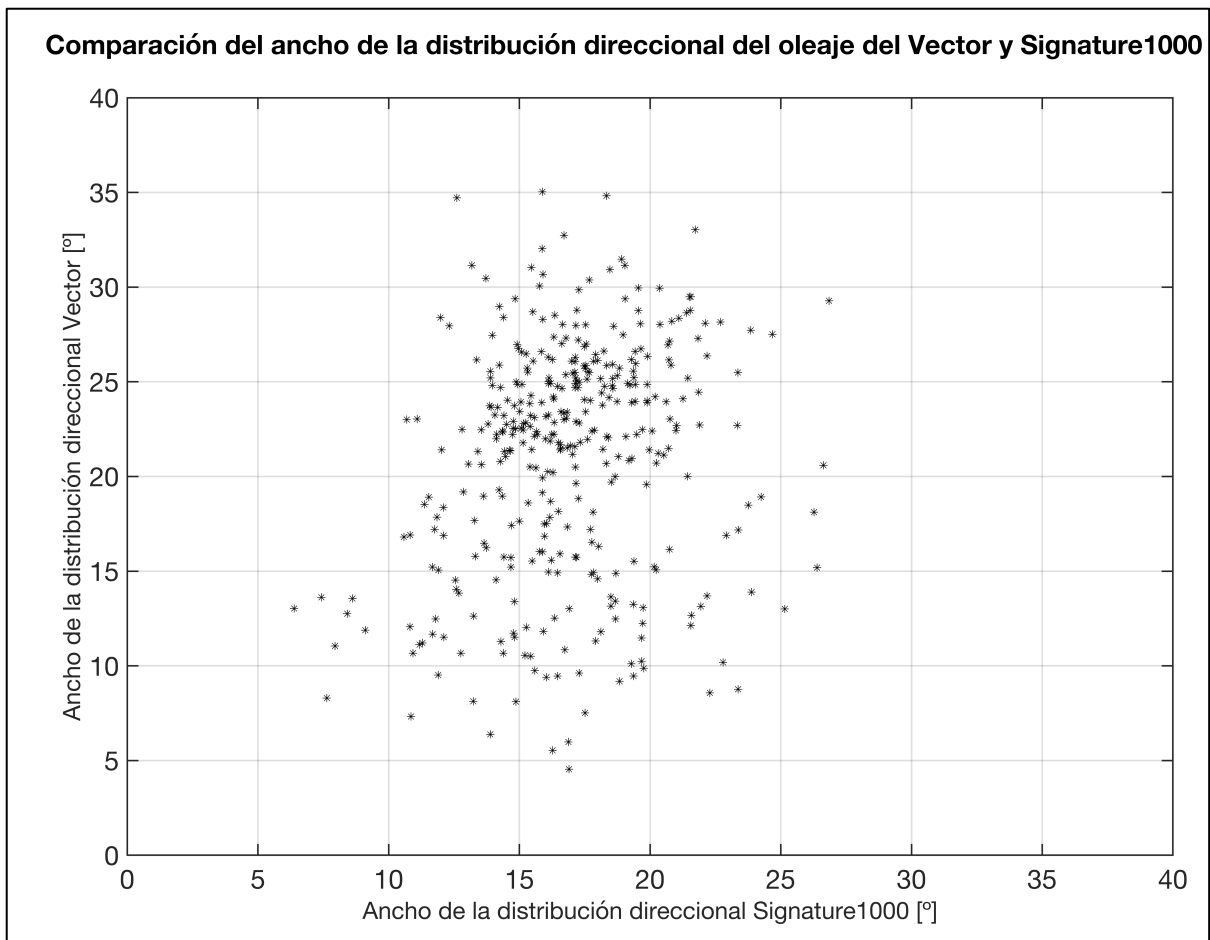


Figura 20 Comparación del ancho de la distribución angular del oleaje del *Vector* y *Signature1000* correspondientes a las frecuencias de todo el registro.

El tercer y último parámetro espectral comparado, es el ancho de distribución direccional del oleaje en cada banda de frecuencia, en esta comparación se observa una densidad de puntos ubicados entre 15 y 25 ° para ambos sensores, sin embargo también se presenta variabilidad para ambos sensores.

6. Conclusiones y recomendaciones

A partir de las mediciones de velocidad de las partículas del fluido obtenidas con sensor *Vector* instalado en la BOC, fue posible estimar el espectro direccional ($E(f)$, $\theta(f)$ y $\psi(f)$) y un parámetro del oleaje (H_s), una vez que se utiliza un método para corregir las velocidades por el efecto del movimiento de la boya. El sensor *Vector* contiene una Unidad de Movimiento Inercial con lo que se registran los seis grados de libertad del movimiento de la boya.

Al procesar los datos del sensor *Vector* y el sensor *Signature1000* utilizando el método *PUV*, fue posible realizar comparaciones entre los distintos parámetros espectrales. Se encontraron similitudes en los espectros de velocidad (S_u), también se mostró una buena correlación en la dirección. Por otra parte, existieron diferencias en las variables de $E(f)$ utilizando el espectro de presión (S_u), H_s y $\psi(f)$, dichas diferencias pueden tener relación con la manera en que ambos sensores realizan sus mediciones, o un efecto no estudiado perteneciente a la dinámica de la boya, el cual agregue un grado de error a las mediciones.

El aporte por la corrección por el movimiento translacional de la boya hacia las mediciones de velocidad observadas por el sensor *Vector* en el eje horizontal, se vuelve más relevante cuando el oleaje presenta condiciones con alturas relativamente altas. La corrección por el movimiento rotacional de la boya hacia las mediciones de velocidad observadas por el sensor *Vector* en el eje horizontal, es mínima y no representa algún cambio considerable.

El efecto del movimiento de la boya es principalmente notorio en las frecuencias bajas en el espectro de frecuencia de las velocidades. Al momento de corregir las observaciones por el movimiento de la boya, se incorporan señales con frecuencia relativamente bajas las cuales modifican el pico espectral y la forma del mismo espectro.

Considerando las Figuras 15, 16 y 18, se propone que, en trabajos posteriores se realice un análisis de la presión para evaluar la posibilidad de una corrección a dichas mediciones por causa del movimiento de la boya. Además, se recomienda considerar la componente vertical de la velocidad en lugar de la presión. A partir de la V_{Upward} se puede determinar la elevación de la superficie libre con base en la teoría lineal del oleaje, y así utilizar el mismo método y el código WDS modificado para estimar el espectro direccional.

Referencias

- Ardhuin, F., J. E. Stopa, B. Chapron, F. Collard, R. Husson, R. E. Jensen, J. Johannessen, A. Mouche, M. Passaro, G. D. Quartly, V. Swail, and I. Young, 2019: Observing Sea States. *Front. Mar. Sci.* 6:124. doi: 10.3389/fmars.2019.00124
- Bendat, J. y A. Piersol, 2010: Random Data Analysis and Measurement Procedures. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Son, Inc.
- Galván-Pozos, D. E., 2020: Reporte de condición de operación de dispositivos in- situ. Reporte. CEMIE-Océano Etapa 5.
- Gordon, L., y A. Lohrmann, 2002: Near-Shore Doppler Current Meter Wave Spectra. *Ocean Wave Measurement and Analysis (2001)*, doi:10.1061/40604(273)4.
- Holthuijsen, L. H., 2007: Waves in oceanic and coastal waters, Delft University of Technology y UNESCO-IHE
- Jeans, G., C. Primrose, N. Descusse, B. Strong, and P. van Weert, 2003: A comparison between directional wave measurements from the RDI workhorse with waves and the datawell directional waverider. Proceedings of the IEEE/OES Seventh Working Conference on Current Measurement Technology, 2003., doi:10.1109/ccm.2003.1194303.
- León-Guzmán, J., D. E. Galván-Pozos, F. J. Ocampo-Torres, M. E. Leyva-Ollivier, 2019: Reporte de condición de operación de dispositivos *in- situ*. Reporte. CEMIE-Océano Etapa 5.
- Longuet-Higgins, M. S., D. E. Cartwright, y N. D. Smith, 1963: Observations of the directional spectrum of the sea waves using the motions of a floating buoy.” *Ocean Wave Spectra*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ., pp. 111-136.
- Velasco, W. y S. Nylund, 2019: Performance improvement for ADCPs on surface buoys. Nortek Group. IEEE/OES Twelfth Current, Waves and Turbulence Measurement (CWTM), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/CWTM43797.2019.8955135.
- Villas-Bôas, A. B., F. Ardhuin, A. Ayet, M. A. Bourassa, P. Brandt, B. Chapron , B. D. Cornuelle, J. T. Farrar, M. R. Fewings, B. Fox-Kemper, S. T. Gille, C. Gommenginger, P. Heimbach, M. C. Hell, Q. Li, M. R. Mazloff, S. T. Merrifield, A. Mouche, M. H. Rio, E. Rodriguez, J. D. Shutler, A. C. Subramanian, E. J. Terrill, M. Tsamados, C. Uebmann, y E. van Sebille, 2019: Integrated Observations of Global Surface Winds, Currents, and Waves: Requirements and Challenges for the Next Decade. *Front. Mar. Sci.* 6:425. doi: 10.3389/fmars.2019.00425
- Wyatt, L. R., 1997: The ocean wave directional spectrum. *Oceanography* 10(2):85–89, <https://doi.org/10.5670/oceanog.1997.31>

Apéndice A

Espectro y energía del oleaje

Para obtener información sobre el oleaje en este proyecto, se propone estimar el *espectro direccional* utilizando registros de un velocímetro acústico montado en una boya. Se ha optado por el uso de este método, ya que describe de manera detallada cómo es la distribución de energía en el campo de olas en función de la frecuencia y la dirección de propagación.

Como se explica en Holthuijsen (2007), para estimar el espectro en función de la frecuencia, se inicia con la descripción de la serie de tiempo de elevaciones de la superficie $\eta(t)$ como una serie de Fourier, al considerar un registro con duración “ D ” en donde el oleaje, puede representarse como la suma de un número discreto de componentes armónicas, cada una con su respectiva frecuencia característica tal que:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi f_i t + \alpha_i).$$

ec. 1a

Donde a_i y α_i son la amplitud y la fase respectivamente, y cada frecuencia $f_i = i/D$ ($i = 1, 2, 3 \dots$), con ello, el intervalo de frecuencia entre cada componente armónica es $\Delta f = 1/D$.

Mediante el Análisis de Fourier, se pueden determinar los valores de amplitud para cada frecuencia, con lo cual se puede estimar su espectro. No obstante, el espectro de amplitud por si solo puede ser impreciso, por lo cual se hacen (M) repeticiones del espectro de amplitud para promediarlo y con ello reducir la incertidumbre del mismo.

$$\bar{a}_i = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M a_{i,m}.$$

ec. 2a

En donde $a_{i,m}$ es el valor de a_i con respecto a la secuencia de repetición m y M es el total de repeticiones. Sin embargo, es más significativo distribuir la varianza de cada componente de

ola $\frac{1}{2}\overline{a_i^2}$, en lugar de la distribución de amplitud, ya que, la varianza tiene una mayor relevancia estadística. Además, la suma de las varianzas de los componentes de las olas es equivalente a la varianza de la suma de los componentes de las olas (por ejemplo, la elevación de la superficie), caso contrario a la amplitud. Otro motivo por el cual se utiliza la varianza, es la relación de proporcionalidad que existe entre esta variable y la energía de las olas.

Para este punto se ha obtenido al espectro de varianza $\frac{1}{2}\overline{a_i^2}$ de manera discreta en donde sólo se han considerado a las frecuencias presentes en $f_i = i/D$, no obstante, en el océano todas las frecuencias están presentes. Para resolver este problema, se debe distribuir la varianza sobre el intervalo de frecuencia $\Delta f = 1/D$, dando como resultado la densidad de varianza $\frac{1}{2}\overline{a_i^2}/\Delta f$ para cada frecuencia. Sin embargo, obtener la densidad de varianza de esta manera, ocasiona que el espectro presente discontinuidades entre una banda de frecuencia y otra. Para solucionar esto, se aproxima a cero el intervalo Δf ($\Delta f \rightarrow 0$) tal que:

$$E(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} \frac{1}{2} \overline{a^2} \quad \text{o} \quad E(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} E \left\{ \frac{1}{2} \underline{a^2} \right\},$$

ec. 3a

en donde el promedio de la varianza $\frac{1}{2}\overline{a^2}$, es remplazado por el valor esperado $E\{\frac{1}{2}\underline{a^2}\}$, de esta manera podemos representar cuanto contribuye una banda de frecuencia Δf de Δvar a la varianza total como:

$$\Delta var = \int_{\Delta f} E(f) df.$$

ec. 4a

Algo que destacar es la definición de la varianza con respecto a la elevación de la superficie $\eta(t)$, la cual se define como el cuadrado del promedio de $\eta(t)$ que se representa como:

$$Varianza = \overline{\eta^2} = E \left\{ \underline{\eta^2} \right\} = \sum_{i=1}^N E \left\{ \frac{1}{2} \underline{a_i^2} \right\}.$$

ec. 5a

Con ello, la manera de representar la varianza en un espectro continuo sería con:

$$Varianza = \overline{\eta^2} = \int_0^\infty E(f)df.$$

ec. 6a

Tomando en cuenta lo anterior, mediante $E(f)$ obtenemos una descripción con mayor precisión estadística de la elevación de la superficie del mar y no solo eso, como se mencionó previamente, existe una relación entre la varianza y la energía de las olas (por unidad horizontal de superficie), la cual se calcula al multiplicar $E_{varianza}(f)$ por la densidad del mar y la gravedad, con lo que se obtiene $E_{energía}(f)$.

$$E_{energía}(f) = \rho g E_{varianza}(f).$$

ec. 7a

Una equivalencia que podemos encontrar de $E(f)$, es $E(\omega)$, ya que $f = 1/T$ (donde T es el periodo del armónico de la ola), puede ser formulado en términos de frecuencia en radianes $\omega = 2\pi/T$, con esta equivalencia, también se debe adecuar $\cos(2\pi ft + \alpha)$ a $\cos(\omega t + \alpha)$.

Hasta ahora, solo se ha desarrollado la explicación del espectro en una sola dimensión, para desarrollar el espectro direccional del oleaje se deben considerar las tres dimensiones (x,y,t) y la dirección (θ) en las que se propagan las olas.

$$\eta(x, y, t) = \text{acos}(\omega t - kx \cos(\theta) - ky \sin(\theta) + \alpha),$$

ec. 8a

en donde $k = 2\pi/L$ es el número de onda y L es la longitud de la onda.

Al igual que el espectro en una dimensión, el espectro en 3 dimensiones puede ser representado como la suma de muchas ondas armónicas que se están propagando, pero, en este caso se considera la relación de dispersión ($\omega^2 = gk \tanh(kd)$) de las olas, la cual, describe que a cada número de onda k (componente espacial) corresponde una frecuencia ω (componente temporal) y viceversa, por lo tanto de ser un espectro tridimensional, pasa a

ser un espectro bidimensional en términos de ω (o k) que comparten índice i y θ que adquiere el índice j .

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{a_{i,j}}{2} \cos(\omega_i t - k_i x \cos(\theta_j) - k_i y \sin(\theta_j) + \alpha_{i,j}).$$

ec. 9a

De esta manera, tenemos la representación del espectro en dos dimensiones en su forma discreta, y como se mostró anteriormente, esta representación puede ser transformada a una forma continua (ec. 10) para así, obtener el espectro de densidad de varianza en dos dimensiones.

$$E(\omega, \theta) = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \lim_{\Delta\theta \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta\omega \Delta\theta} E\{\frac{1}{2} \underline{a^2}\}.$$

ec.10a

El espectro $E(\omega, \theta)$ muestra como la varianza de $\underline{\eta(x, y, t)}$ es distribuida sobre las frecuencias y direcciones, así como el espectro en una dimensión muestra como la varianza se distribuye sobre las frecuencias. Por lo tanto el volumen de $E(\omega, \theta)$ es igual al total de la varianza $\underline{\eta^2}$ de la elevación de la superficie del mar.

$$\underline{\eta^2} = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} E(\omega, \theta) d\theta d\omega.$$

ec. 11a

Finalmente, podemos obtener el espectro unidimensional (el cual no posee información sobre dirección) a partir del espectro direccional, al eliminar la información direccional por integración (para cada frecuencia).

$$E(\omega) = \int_0^{2\pi} E(\omega, \theta) d\theta.$$

ec. 12a