

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS



“Morfodinámica estacional de barras sumergidas en Playa Hermosa,
Ensenada, Baja California, México”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

Jesús Adrian Vidal Ruíz

Ensenada, Baja California, México Julio del 2016

Resumen

Las barras de arena ubicadas en la parte sumergida de la playa constituyen un reservorio importante del sedimento en las costas, y además, suponen la primera barrera natural de protección para la playa ante eventos extremos de oleaje; por lo tanto, es importante entender su dinámica y determinar los procesos físicos asociados a su evolución. Este estudio se enfoca en determinar la evolución espacio-temporal de las barras sumergidas en una playa intermedia. Para ello, se analizaron 19 meses (Agosto 2014 – Febrero 2016) de mediciones topográficas y batimétricas realizadas mensuales a lo largo de 3 km de playa que abarcan desde el límite superior de la sección supramareal hasta la profundidad de cierre (8 m de profundidad aproximada). Para el mismo periodo de tiempo, se obtuvieron mediciones de oleaje y corrientes con un perfilador de corrientes acústico doppler instalado a 20 m de profundidad. Estas mediciones permiten relacionar los forzamientos hidrodinámicos con la evolución morfológica mensual de las barras sumergidas. Resultados de este trabajo muestran que en los meses de verano (junio – septiembre) la barra submareal es inexistente mientras que en el límite superior de la playa intermareal, se observa la formación de una berma. Durante el invierno (noviembre – febrero) la playa típicamente presenta una barra submareal como consecuencia de eventos de erosión de la playa subaérea (intermareal y supramareal), iniciando su migración hacia mar adentro como una barra intermareal transicional, ubicándose a una profundidad máxima de 2 – 4 m (enero y marzo), alcanzando desplazamientos de hasta 200 m hacia fuera y dentro de la costa. Posteriormente entre febrero y abril la barra migra hacia la cara de la playa incorporando su sedimento a la sección subaérea. Este estudio concluye que existe un ciclo estacional en los movimientos transversales de la barra submareal, que se observan como periodos de erosión y acreción de la playa subaérea en Playa Hermosa, el volumen transitorio entre ambas secciones (subaérea y submareal) es de $\sim 400,000 \text{ m}^3$.

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
POSGRADO EN OCEANOGRAFIA COSTERA

“Morfodinámica estacional de barras sumergidas en Playa Hermosa,
Ensenada Baja California, México”

T E S I S

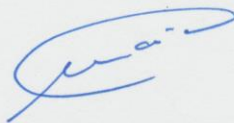
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

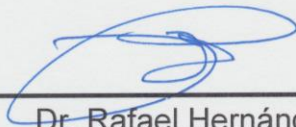
Presenta

Jesús Adrian Vidal Ruíz

Aprobada por:



Dr. Amaia Ruiz de Alegría Arzaburu
Director de tesis



Dr. Rafael Hernández Walls
Sinodal



Dr. Héctor García Nava
Sinodal

ASUNTO: Voto aprobatorio sobre trabajo de tesis de grado de Maestría.

DR. LUIS ANTONIO CUPUL MAGAÑA
COORDINADOR DE POSGRADO
E INVESTIGACION, F.C.M.

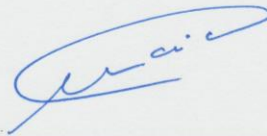
Presente.-

Después de haber efectuado una revisión minuciosa sobre el trabajo de tesis presentado por el estudiante **Jesús Adrian Vidal Ruíz** para poder presentar la defensa de su examen y obtener el grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Costera, me permito comunicarle que he dado mi voto **Aprobatorio**, sobre su trabajo titulado:

Morfodinámica estacional de barras sumergidas en Playa Hermosa, Ensenada, Baja California, México.

Esperando reciba el presente de conformidad, quedo de usted.

Ensenada, B. C., a 21 de julio de 2016



DRA. AMAIA RUIZ DE ALEGRIA ARZABURU
DIRECTORA DE TESIS

c.c.p. Expediente

ASUNTO: Voto aprobatorio sobre trabajo de tesis de grado de Maestría.

DR. LUIS ANTONIO CUPUL MAGAÑA
COORDINADOR DE POSGRADO
E INVESTIGACION, F.C.M.

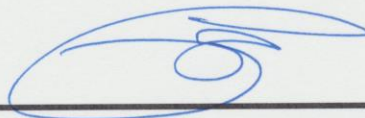
Presente.-

Después de haber efectuado una revisión minuciosa sobre el trabajo de tesis presentado por el estudiante **Jesús Adrian Vidal Ruíz** para poder presentar la defensa de su examen y obtener el grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Costera, me permito comunicarle que he dado mi voto **Aprobatorio**, sobre su trabajo titulado:

Morfodinámica estacional de barras sumergidas en Playa Hermosa, Ensenada, Baja California, México.

Esperando reciba el presente de conformidad, quedo de usted.

Ensenada, B. C., a 21 de julio de 2016



DR. RAFAEL HERNANDEZ WALLS
SINODAL

c.c.p. Expediente

ASUNTO: Voto aprobatorio sobre trabajo de tesis de grado de Maestría.

DR. LUIS ANTONIO CUPUL MAGAÑA
COORDINADOR DE POSGRADO
E INVESTIGACION, F.C.M.

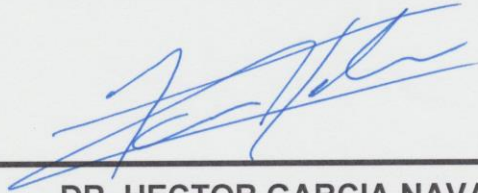
Presente.-

Después de haber efectuado una revisión minuciosa sobre el trabajo de tesis presentado por el estudiante **Jesús Adrian Vidal Ruíz** para poder presentar la defensa de su examen y obtener el grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Costera, me permito comunicarle que he dado mi voto **Aprobatorio**, sobre su trabajo titulado:

Morfodinámica estacional de barras sumergidas en Playa Hermosa, Ensenada, Baja California, México.

Esperando reciba el presente de conformidad, quedo de usted.

Ensenada, B. C., a 21 de julio de 2016



DR. HECTOR GARCIA NAVA
SINODAL

c.c.p. Expediente

DEDICATORIA

A mis amados padres Manuel Vidal Musiño y María Esther Ruiz Pérez, quiénes velaron constantemente por mí aún siendo adulto, se esforzaron por siempre brindarme lo necesario, quiénes nunca dudaron en sacrificar su propio bienestar por el mío. Me siento agradecido de haber nacido de buenos padres y ser instruido con paciencia, amor y respeto, con el objetivo de aprender a amar y servir a los demás dando siempre el mejor esfuerzo por lograr un bienestar común.

*“Instruye al niño en su camino; y aún cuando fuere viejo, no se apartará de él”
(Proverbios 22:6).*

A mi hermano Diego por siempre ser tan noble y trabajador que me enseñaste a guardar silencio y hacer las cosas, antes que renegar y no hacer nada, me demostraste que ante entornos de vida difíciles se puede perseverar y ser feliz, nunca dándose por vencido.

A mi hermano Nefi a quien extraño y espero salga triunfante de la guerra que vive combatiéndose así mismo, para que regreses con tu familia quiénes te amamos mucho.

A mi hermana Zaíra, la matadita y nerd de la familia, me enseñaste que con dedicación y esfuerzo constante se puede lograr todo lo que uno se proponga. No se que hubiera sido de mí sin tu apoyo, siempre me cuidaste de no caer en manos de arpías y ahora junto a Dan me han regalado la dicha de ser tío de Marlo y Dana mis pequeños tesoros de alegría.

A mi bella Livier Aranza Velázquez Terriquez, que llegaste arrasando cualquier expectativa que tuve sobre la mujer que llegaría para permanecer a mi lado. A ti que llenaste de inspiración mi vida y me motivaste a ser en un principio un buen amigo, después un buen novio y ahora como prometidos aspirar a ser un excelente esposo. Por siempre instarme a no darme por vencido en ningún momento y ayudarme a culminar esta etapa de mi vida estando dispuesta a ceder momentos que pudimos haber pasado juntos, con la esperanza y convicción de que todo sacrificio en su momento será restituido. Te Amo con todas mis fuerzas osa.

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Amaia Ruiz de Alegria Arzaburu, quién decidió apoyarme y confiar en mi desde un principio, haciendo posible que mis deficiencias de conocimiento no fueran un impedimento para alcanzar lo que me propusiera, no tengo palabras para expresar la gratitud que siento por transmitir con tanta paciencia, dedicación y esfuerzo su experiencia adquirida a base de arduo trabajo.

A mis sinodales, el Dr. Rafael Hernández Walls y el Dr Hector Garcia Nava por también confiar en mi y ayudarme a concluir este trabajo, con la mira de darle seguimiento a futuro.

A mis amigos y Super Dream Team: Eduardo, Julio, Adán, Ernesto, Angélica, Amaia, Hugo, Sandra, María, Carsolio, Gema, Carolina, Fernando, Diana, Mayra y Bernardo, por haber hecho posible este trabajo que requirió coordinación, esfuerzo y horas extra que fueron muy amenas cada que pudimos colaborar como equipo, convivir como amigos y en algunas ocasiones filosofar sobre la vida y de Matlab.

A cada persona que ha contribuido con un granito de arena en mi formación no solo académica sino como ser humano.

A los proyectos de CONACyT convocatoria CB-2014- 238765 e INFR – 2013 – 01I005, No. de proyectos: 205020 y 205022, a cargo de la Dra. Amaia Ruiz de Alegria Arzaburu.

También a F – PROMEP – 38/Rev – 03, SEP – 23 – 005 y proyectos internos UABC convocatoria 18, 636 (IMTENS).

INDICE

RESUMEN	I
DEDICATORIA	VI
AGRADECIMIENTOS	VIII
INDICE	IX
LISTA DE TABLAS	XI
LISTA DE FIGURAS	XII
1. INTRODUCCION	1
1.1 Zona costera y playa.....	1
1.2 Hidrodinámica costera	3
1.3 Concepto de morfodinámica de playas.....	5
1.4 Morfodinámica de las barras sumergidas.....	6
2. OBJETIVOS	10
2.1. General	10
2.2. Específicos.....	10
3. AREA DE ESTUDIO	10
4. METODOLOGIA.....	13
4.1. Mediciones morfológicas	13
4.2. Mediciones de oleaje	16
4.3. Procesamiento de mediciones morfológicas.....	17
5. RESULTADOS	22
5.1. Caracterización de oleaje	22
5.2. Variabilidad morfológica	25
5.2.1. Evolución de perfiles de playa.....	26
5.2.2. Evolución de la barra submareal	29
5.2.3. Evolución de los Modelos Digitales de Elevación (MDE).....	34

5.2.4 Evolución volumétrica	39
6. DISCUSION	43
7. CONCLUSIONES	46
8. REFERENCIAS	47

LISTA DE TABLAS

Tabla I. Condiciones promedio de H_s , T_p y Dir para los periodos entre campañas de mediciones topográficas (Figura 18).	24
Tabla II. Fechas entre las que se obtuvieron las diferencias parciales (DP) de los modelos digitales de elevación (MDE).	35

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Perfil transversal de una playa (adaptación del Shore Protection Manual, 1984, Chrzastowski, 2005) que incluye sus rasgos morfológicos y zonación. 2
- Figura 2.** Esquema de generación del oleaje (adaptado de Division of Nearshore Research, Texas A&M University-Corpus Christi, 2005)..... 4
- Figura 3.** Escalas y frecuencias de la respuesta morfodinámica entre la playa subaérea, la zona de surf y la zona de asomeramiento (adaptado de Wright, *et al.*, 1984). 6
- Figura 4.** Modelo de formación de barras en la zona de rompiente propuesto por Dally, (1987) (adaptado de Pedrozo-Acuña, 2011). 7
- Figura 5.** Esquema de un perfil de tormenta (panel de arriba) y un perfil de acreción (panel de abajo) en una playa típica (adaptado de Martínez-Ramos, S., 2013)...... 8
- Figura 6.** Vista aérea de la Península de Baja California, México y la BTS (imagen modificada de Google earth 2015)..... 11
- Figura 7.** Imágenes del área de estudio: (a) corredor turístico en la sección norte alado del puerto y un malecón, (b) rip-rap, (c) playa sur con duna natural respaldada por una laguna de agua dulce superficial y seca intermitentemente y (d) limite del área de estudio (playa sur) complejo residencial Pacífica. 12
- Figura 8.** Vista aérea de los transectos de cada perfil topo-batimétrico: (A) el corredor turístico; (B) rip-rap; (C) dunas. MET y AWAC se refieren a la ubicación de la estación meteorológica, y el perfilador acústico de olas y corrientes, respectivamente..... 14
- Figura 9.** a) GPS diferencial (antena y controladora) montado en eje con ruedas. b) GPS y ADCP montados en el boogie que es arrastrado por una embarcación. 15
- Figura 10.** ADCP tipo AWAC anclado a 20m de profundidad frente al complejo residencial Pacífica. 16

- Figura 11.** Serie de tiempo continua de los parámetros de H_s , T_p y Dir desde agosto 2014 a febrero 2016..... 17
- Figura 12.** Perfil topográfico 7 de febrero 2016. Ejemplo de un perfil que necesita ser corregido, la imagen superior derecha representa un zoom de datos fuera de lugar por corregir..... 18
- Figura 13.** Ejemplo del procesamiento de los datos batimétricos. El panel superior muestra la interpolación de los datos del GPS diferencial (azul), los de la ecosonda (rojo) y la profundidad corregida con ambas (verde). El panel inferior muestra la vista en planta de los transectos batimétricos crudos (en negro) previos a ser limpiados. 19
- Figura 14.** Vista en planta de los 30 perfiles topo-batimétricos medidos mensualmente desde agosto 2014 a febrero 2016 en PH..... 20
- Figura 15.** Vista transversal del perfil TB18 en el mes de febrero del 2016. El 0 esta referenciado al NBMI y a 2.3 m esta señalado el NPMS. El círculo con un punto negro al centro, muestra un ejemplo de identificación y marcación de la cresta de una barra submareal. 20
- Figura 16.** Ejemplo de un MDE de la diferencia parcial (DP) entre diciembre 2014 y enero 2015. Los transectos de los perfiles TB del mes de enero 2015 son las líneas blancas transversales. 22
- Figura 17.** Serie de tiempo de parámetros horarios del oleaje: altura significativa (H_s), periodo asociado al pico espectral (T_p) y dirección del oleaje incidente (Dir), medidos con el AWAC. Las barras grises señalan las fechas en que se realizaron las campañas de mediciones morfológicas..... 23
- Figura 18.** Promedios y desviaciones estándar (líneas verticales sobre los puntos) de las mediciones de H_s , T_p y Dir para los periodos definidos en Tabla I..... 25
- Figura 19.** Vista en planta de la interpolación topo-batimétrica del mes de agosto de 2015 en PH. Se resaltan 6 perfiles TB (líneas negras) sobre los 30 utilizados para realizar la interpolación (líneas blancas)..... 26

- Figura 20.** Evolución temporal del perfil TB 02 ubicado en el área de dunas. De la esquina superior izquierda a la derecha en líneas rojas solidas los meses de Ago14, Nov14 y Feb15 y en líneas rojas punteadas los meses de May15, Spp15 y Feb16. Las líneas grises son los demás meses de la serie de tiempo. 27
- Figura 21.** Evolución del perfil TB18 ubicado en la zona de rip-rap. De la esquina superior izquierda a la derecha en líneas rojas solidas están los meses de Ago14, Nov14 y Feb15, y en líneas rojas punteadas May15, Spp15 y Feb16. En líneas grises se presentan los demás meses de la serie de tiempo. 28
- Figura 22.** Evolución temporal del perfil TB30 ubicado en la zona del corredor turístico. De la esquina superior izquierda a la derecha en líneas rojas solidas los meses de Ago14, Nov14 y Feb15, y en líneas rojas punteadas May15, Spp15 y Feb16. En líneas grises se muestran los demás meses. 29
- Figura 23.** Distancias y profundidades de las crestas de la barra de agosto 2014 a febrero 2016 para los perfiles TB02 (paneles izquierdos) y TB06 (paneles derechos). Las valores de 0 representan la posición de la línea de costa y su profundidad en NBMI. 30
- Figura 24.** Distancias y profundidades de las crestas de la barra de agosto 2014 a febrero 2016 para los perfiles TB11 (paneles izquierdos) y TB18 (paneles derechos). Las valores de 0 representan la posición de la línea de costa y su profundidad en NBMI. 31
- Figura 25.** Distancias y profundidades de las crestas de la barra de agosto 2014 a febrero 2016 para los perfiles TB25 (paneles izquierdos) y TB30 (paneles derechos). Las valores de 0 representan la posición de la línea de costa y su profundidad en NBMI. 32
- Figura 26.** Variabilidad longitudinal de las crestas de la barra desde el perfil TB1 (sur) al TB30 (norte). (a) posiciones de la cresta de la barra para cada TB y toda la serie de tiempo, y distancias transversales de la barra desde la

línea de costa de referencia a lo largo de la playa (TB 1 a TB 30) (paneles b, c y d).....	33
Figura 27. Diferencias topo-batimétricas de la playa para los diferentes periodos de estudio (DP01–DP17 indicados en la Tabla II). La barra de colores muestra las diferencias de elevación en metros, y las líneas de contorno negras muestran algunas isobatas topográficas y batimétricas..	36
Figura 28. Diferencias parciales acumuladas (DPA) desde agosto 2014 a febrero 2016. La barra de colores muestra las diferencias de elevación acumuladas (en metros), y las líneas de contorno negras muestran algunas isobatas topográficas y batimétricas.....	38
Figura 29. Serie temporal de volúmenes para toda la playa (Tot) y para la sección submareal (Sub) y la subaérea comprendida por la intermareal y supramareal (IS). Los paneles de arriba abajo muestran los volúmenes totales, sin promedio y las diferencias acumuladas para la playa entera (a, d, g), la sección subaérea (b, e, h) y la submareal (c, f, i).	40
Figura 30. Serie temporal de los promedios mensuales del flujo longitudinal de energía (a, P1.0), y los volúmenes IS, Sub y Tot (paneles b, c y d).....	42

1. INTRODUCCION

1.1 Zona costera y playa

La zona costera comprende la interface entre la atmósfera, el océano y la tierra, por tanto, los procesos que operan entre estos tres sistemas son los responsables de su formación, y la interacción de dichos procesos la hacen extremadamente dinámica. Alrededor de tres cuartas parte de la población en Latino América y el Caribe vive en la zona costera (Cicin-Sain *et al.*, 1999), por tanto, las costas son de gran importancia social ya que es donde se desarrolla gran parte de las actividades económicas (Sénéchal *et al.*, 2015). Esta zona está generalmente sujeta a una fuerte antropización, y en muchos casos se ha generado la pérdida de su calidad natural, por tanto, es necesario realizar estudios sobre la evolución de las costas que ayuden a desarrollar una gestión adecuada de las mismas (Martinez-Ramos, 2013).

La playa es una formación costera resultante de la acumulación de sedimento no consolidado (arena, grava o canto rodado), cuya dinámica está dominada por la acción del oleaje, el viento y las mareas (Ruessink *et al.*, 2014). El límite superior de la playa suele ser una barrera física comprendida por dunas, cantiles o vegetación permanente, y el límite inferior lo define la Profundidad de Cierre, que corresponde con la ubicación donde deja de existir un transporte de sedimentos significativo. Las playas se pueden zonificar en función de la transformación del oleaje a través de la misma, así, existe la zona de asomeramiento (*shoaling*), la zona de rompiente (*surf*) y la zona de lavado (*swash*) (Figura 1). En función del nivel de las mareas, la playa se divide en playa: submareal, porción de la playa por debajo de la acción de las mareas; intermareal, zona de acción de las mareas; y supramareal, zona por encima de la acción de las mareas. La Figura 1 muestra la presencia de barras arenosas en la playa submareal, por debajo del nivel de bajamar media inferior (NBMI) y

la presencia de una berma por encima del nivel de pleamar media superior (NPMS) en el límite superior de la zona de lavado.

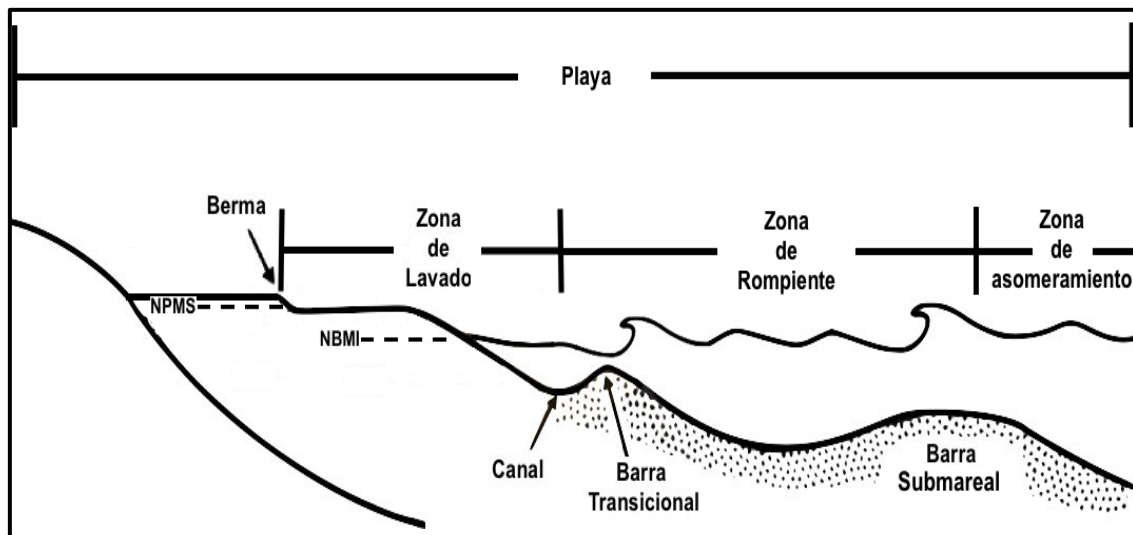


Figura 1. Perfil transversal de una playa (adaptación del Shore Protection Manual, 1984, Chrzastowski, 2005) que incluye sus rasgos morfológicos y zonación.

Las playas pueden clasificarse como reflejantes, disipativas o intermedias en función de su capacidad de disipar la energía incidente del oleaje; siendo las disipativas y las reflejantes las que más y menos energía disipan, respectivamente (Short *et al.*, 1984; Aagaard *et al.*, 2013). Las playas intermedias son aquellas que disipan y reflejan parte de la energía incidente. Todavía no se comprenden del todo los procesos físicos asociados con los cambios morfológicos que dan lugar a transiciones de estado de condiciones disipativas a reflejante en las playas intermedias (Ranasinghe *et al.*, 2004). Por otro lado, la interacción entre la altura de ola y el rango de marea al que las playas están expuestas es un factor determinante en la clasificación de las playas, el cual refleja la importancia relativa de la zona de lavado, la de surf, y los procesos de asomeramiento del oleaje (Masselink *et al.*, 1993).

Las playas también pueden ser clasificadas en función del rango mareal al que se encuentran expuestas. Las playas con un rango de marea reducido, de hasta 2 m se denominan micromareales, las de un rango intermedio entre 2 y 4 m son mesomareales, y las que se exponen a más de 4 m son macromareales (Masselink y Hughes, 2003). Las playas macromareales son generalmente las menos propensas a desarrollar barras submareales (Stive *et al.*, 2002).

1.2 Hidrodinámica costera

Para explicar los cambios morfológicos de las barras sumergidas, es necesario entender los forzamientos hidrodinámicos principales que causan el transporte del sedimento en las playas. Estos forzamientos son el oleaje, las mareas, y las corrientes asociadas tanto al oleaje como a las mareas.

Bird (2008) define el oleaje como ondulaciones en la superficie del mar producidas por la acción del viento el cual produce tensión y variaciones de presión en la superficie ocasionando que la ola crezca. El crecimiento del oleaje indica que las olas adquieren más energía, a medida que van alcanzando su máximo desarrollo, es decir aumentan su altura y longitud de onda. Entonces crecimiento del oleaje depende de la intensidad, la duración del viento y la longitud del área donde éste actúa (*fetch*), (Figura 2). El oleaje es el agente que genera la resuspensión del sedimento del fondo, que más tarde será transportado por las corrientes entre la zona submareal y supramareal de la playa, y a lo largo de la misma (Ruessink *et al.*, 2014).

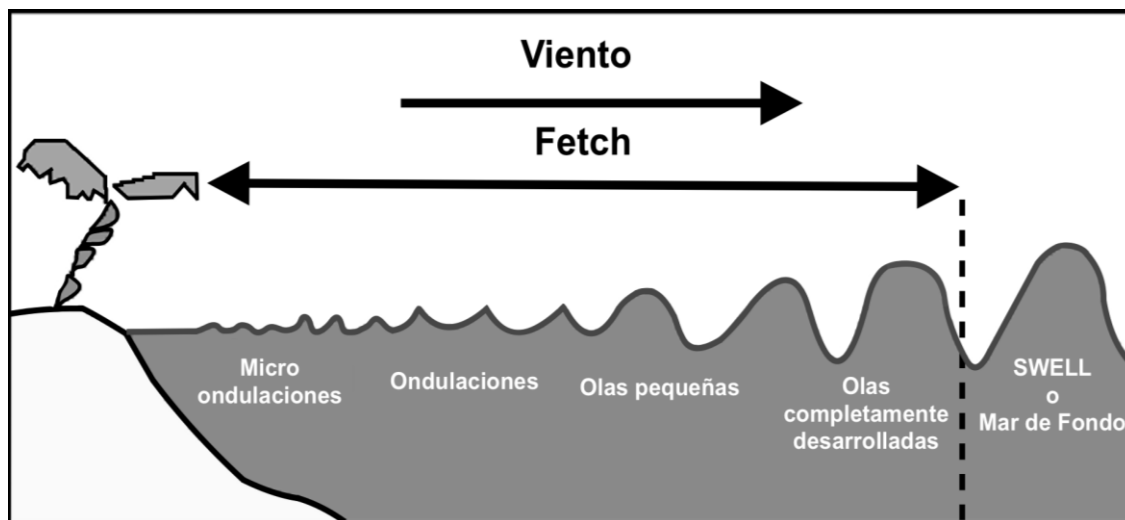


Figura 2. Esquema de generación del oleaje (adaptado de Division of Nearshore Research, Texas A&M University-Corpus Christi, 2005).

Las corrientes costeras pueden ser generadas por las mareas y por el oleaje. Las corrientes generadas por el oleaje pueden ser de tipo transversal o longitudinal. La corriente de retorno y de resaca son los dos tipos principales de flujos dirigidos hacia mar adentro desde la zona de surf (Aagaard y Vinther, 2008). La corriente de resaca (undertow) se define como una corriente lateralmente homogénea que fluye mar adentro, cerca del lecho marino, la cual puede ser percibida como un flujo aislado verticalmente que consiste en el transporte de masa hacia la costa, impulsado por el oleaje en las capas superficiales de la columna de agua (Aagaard y Vinther, 2008). Las corrientes de retorno también están confinadas lateralmente y son chorros de agua que se dirigen mar adentro desde la zona de surf, cruzando la zona de rompiente. La formación de las corrientes de retorno depende de la existencia de gradientes longitudinales de presión (set-up), causados por las variaciones en los procesos de compensación de masa y cantidad de movimiento a lo largo de la costa (Aagaard y Vinther, 2008). La corriente longitudinal o corriente litoral, se forma cuando el oleaje incide con un ángulo oblicuo respecto a la línea de costa, fluyendo a lo largo de la zona de surf (Davidson-Arnott, 2010).

1.3 Concepto de morfodinámica de playas

El enfoque morfodinámico para el estudio de playas, tiene origen en el Instituto de Estudios Costeros de la Universidad del Estado de Luisiana a finales de 1960, posteriormente formando la base del enfoque Australiano que comenzó a mediados de la década de los 70's, para finalmente ser formalizada por Wright y Thom en 1977 (Short y Jackson, 2013). La morfodinámica de playas se refiere a las interacciones entre los forzamientos hidrodinámicos, principalmente las mareas, el oleaje y sus corrientes asociadas con el lecho marino, en diferentes escalas espacio temporales (Short y Jackson, 2013).

La variabilidad morfológica de la playa responde al transporte transversal y longitudinal de sedimentos que ocurre en la misma. La posición de la barra a través y a lo largo de la playa varía con el tiempo, y resulta de la interacción con el oleaje incidente. Es decir, los cambios morfológicos de las barras sumergidas están relacionados con la variabilidad temporal del oleaje, que típicamente es la variación estacional (invierno - verano) o los cambios inmediatos causados por oleaje de tormenta (H_{s12}) (Pape *et al.*, 2010a).

Wright *et al.*, (1984) explican que existen dos modos de intercambio entre la playa subaérea y la zona de asomeramiento. Muestran que puede existir una respuesta rápida asociada a la redistribución de sedimento contenidos entre la playa subaérea y la zona de surf, y una respuesta más lenta entre la zona de surf y la zona de asomeramiento. Por tanto, esto explica que puede existir un desfase de la variabilidad morfológica entre la playa la subaérea y la submareal (Figura 3).

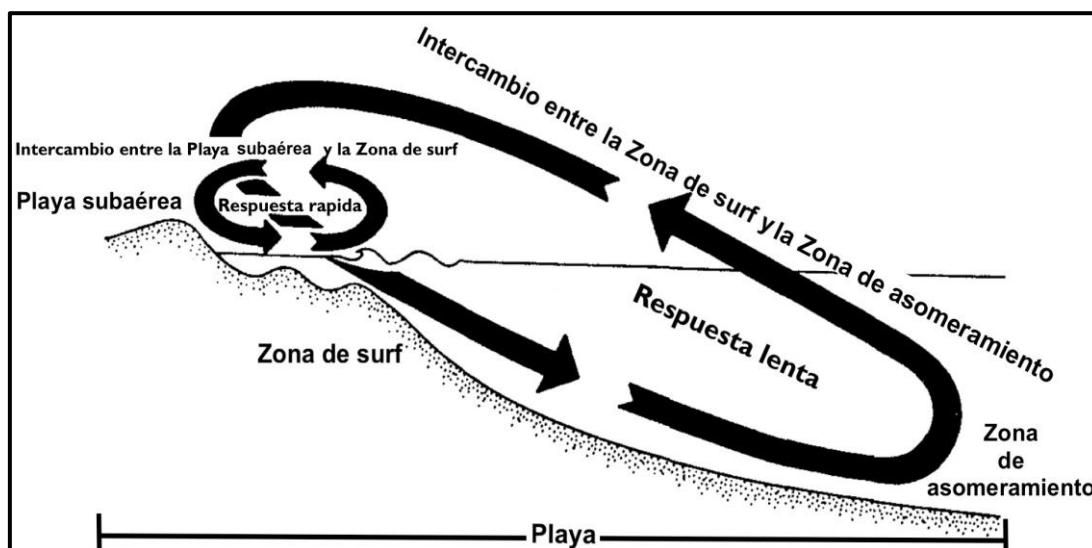


Figura 3. Escalas y frecuencias de la respuesta morfodinámica entre la playa subaérea, la zona de surf y la zona de asomeramiento (adaptado de Wright, *et al.*, 1984).

1.4 Morfodinámica de las barras sumergidas

La mayoría de playas arenosas presentan barras de arena sumergidas, que son acumulaciones de arena ubicadas por debajo del nivel de bajamar. Las barras suelen ser dinámicas, con respecto a su posición y forma, bajo diversas condiciones hidrodinámicas a diferentes escalas espacio-temporales (Zheng *et al.*, 2014). Las barras de arena sumergidas son rasgos morfológicos típicos de playas disipativas e intermedias (Aagaard *et al.*, 2013). Las playas disipativas exhiben una morfología casi uniforme a lo largo de la costa y barras con pendientes suaves y un relieve vertical relativamente pequeño, a diferencia de las playas intermedias, que presentan barras más prominentes con pendientes más pronunciadas hacia tierra que hacia el mar (Aagaard *et al.*, 2013).

Greenwood (2005) menciona que en los últimos 50 años se han propuesto un gran número de hipótesis específicas para explicar la formación de barras y todas implican mecanismos de convergencia para el transporte de sedimentos. Una de las teorías más aceptadas es la propuesta por Dally (1987) quien menciona que las barras de arena se forman como resultado de la

convergencia de sedimento en el punto de rompiente, a través del transporte hacia la costa, asociado con la asimetría del oleaje incidente y el transporte de fondo hacia el mar inducido por la corriente de resaca (Figura 4).

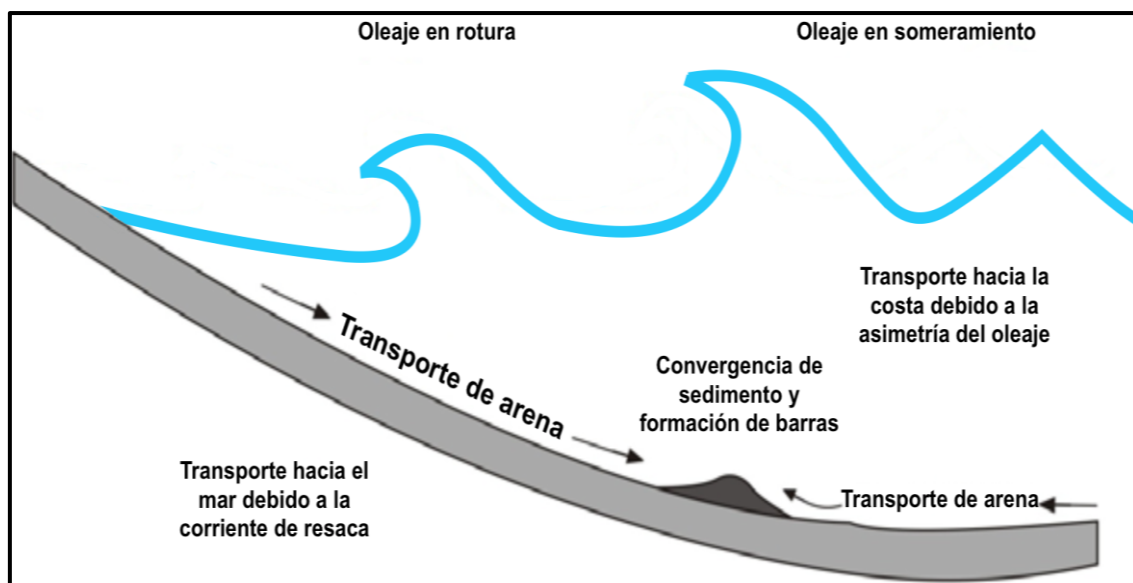


Figura 4. Modelo de formación de barras en la zona de rompiente propuesto por Dally, (1987) (adaptado de Pedrozo-Acuña, 2011).

La dinámica morfológica de las barras sumergidas responde principalmente a la acción del oleaje de alta y baja energía (Sénéchal *et al.*, 2015). Durante condiciones energéticas, dominadas por la presencia de tormentas, ocurre la erosión del material de la playa subaérea (supramareal e intermareal) que en muchos casos es la berma. El sedimento erosionado se transporta hacia la parte sumergida (Ruessink *et al.*, 2014; Sénéchal *et al.*, 2015) hasta situarse en una profundidad cercana al punto de rotura en forma de una barra sumergida. Este proceso genera un cambio en la pendiente de la playa, haciéndola más pronunciada y provocando, al mismo tiempo, un retroceso de la línea de costa (cara de la playa). Durante las condiciones de baja energía de oleaje (típicamente en verano) la playa subaérea gana sedimento a medida que la barra sumergida se va acercando a la cara de la playa (Ruessink *et al.*, 2014; Sénéchal *et al.*, 2015) (Figura 5).

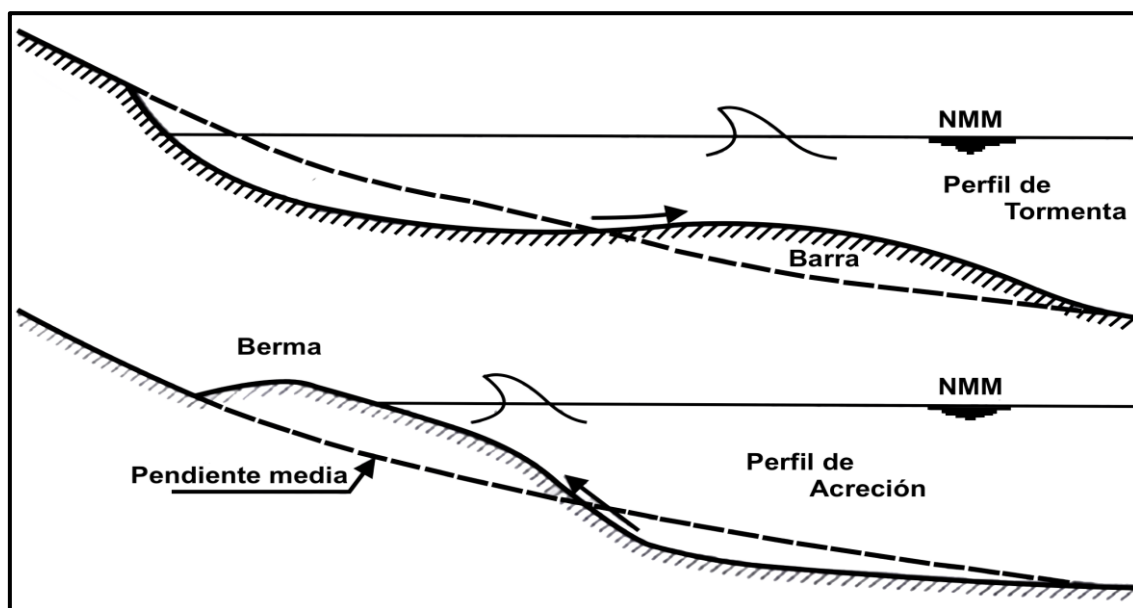


Figura 5. Esquema de un perfil de tormenta (panel de arriba) y un perfil de acreción (panel de abajo) en una playa típica (adaptado de Martínez-Ramos, S., 2013).

El proceso de acercamiento de la barra sumergida puede ser interpretado como la recuperación de la playa subaérea, debido a que las corrientes que genera el oleaje estarán dirigidas hacia la cara de la playa. Durante este proceso se da la dominancia de la corriente de la asimetría del oleaje (deriva de Stokes) sobre la corriente de resaca (Aagaard *et al.*, 2013). Esta corriente actúa sobre las barras de arena, y las lleva hacia la línea de costa, resultando en un perfil con una amplia berma en la parte superior de la playa intermareal y haciendo desaparecer la barra sumergida (Figura 5) (García-Ramos, 2003).

Existen numerosos estudios científicos sobre la dinámica de las barras sumergidas (e.g. Masselink *et al.*, 2006; Pape *et al.* 2010a; Yuhi *et al.*, 2015). La mayoría de ellos determinan la evolución morfológica de barras mediante mediciones indirectas utilizando sensores remotos (Ranasinghe *et al.*, 2004; Castelle *et al.*, 2007; Sénéchal *et al.*, 2015; Walstra *et al.*, 2016) o a través de resultados de modelación numérica (Cohn *et al.*, 2014; Zheng *et al.*, 2014; Pape *et al.*, 2010a y 2010b).

La mayoría de los estudios sobre dinámica estacional de las barras sumergidas han utilizado imágenes de video, como Ranasinghe *et al.*, (2004) quienes analizaron 4 años de variabilidad morfodinámica en la zona de surf, que les permitió desarrollar con éxito un esquema fenomenológico, para clasificar diferentes estados intermedios de playa según la morfología de las barras, que a su vez está asociada a las condiciones energéticas del oleaje incidente. También encontraron que las playas intermedias sufren un reinicio morfológico ante eventos de tormenta, resultando en la formación de una barra longitudinal, independiente del estado de la playa antes de la tormenta. Recientemente Sénéchal *et al.*, (2015) examinaron imágenes de 3 años de la posición de las barras y la línea de costa e identificaron un rango de desplazamiento promedio de 120 m en la sección transversal dentro de la zona de surf. Estos autores sugieren que las barras siguen un patrón estacional de movimiento relacionado a las variaciones trasversales de la línea de costa en representación de los estados de acreción y erosión de la playa.

Muchos de estos estudios indican que sigue haciendo falta mejorar la comprensión de los procesos físicos que rigen la variabilidad de las barras submareales a corto, mediano y largo plazo. En particular, existe la necesidad de medir de forma directa la posición y geometría de las barras para poder estimar con mayor precisión su variabilidad morfológica.

2. OBJETIVOS

2.1. General

Estudiar el comportamiento estacional de las barras sumergidas en una playa intermedia.

2.2. Específicos

- * Determinar la variabilidad morfológica mensual de las barras sumergidas en asociación con los cambios morfológicos de la playa submareal, intermareal y supramareal.
- * Caracterizar las condiciones del oleaje para los periodos de mediciones morfológicas.
- * Asociar la variabilidad morfológica estacional de las barras sumergidas a través y a lo largo de la playa con las condiciones de oleaje.

3. AREA DE ESTUDIO

Playa Hermosa (PH) es una playa intermedia que se encuentra en la ciudad de Ensenada, dentro de la Bahía de Todos Santos (BTS), en la península de Baja California, México (Figura 6). El área de estudio cubre aproximadamente 3 km de costa y abarca desde el límite superior de la playa supramareal hasta la profundidad de cierre.



Figura 6. Vista aérea de la Península de Baja California, México y la BTS (imagen modificada de Google earth 2015).

Playa Hermosa contiene estructuras costeras como un corredor turístico en la sección norte alado del puerto, un malecón y un enrocamiento (rip-rap) en la sección central (Figura 7). La playa sur conserva una duna natural respaldada por una laguna de agua dulce superficial y seca intermitentemente (Figura 7). La playa subaérea amurallada es 80 – 120 m de ancho, mientras que la sección no amurallada posee un ancho de 220 – 240 m. La playa supramareal, frente al paseo marítimo llega a estar 6.5 m por encima del NBMI y 3.5 m arriba, en la sección protegida por el rip-rap y el área del Malecón. La playa supramareal compuesta por dunas tiene una elevación máxima de 10 m por encima de NBMI (Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2015). El estudio parte desde el terraplén aledaño al espigón sur del puerto de ensenada hasta el complejo residencial Pacifica.



Figura 7. Imágenes del área de estudio: (a) corredor turístico en la sección norte alado del puerto y un malecón, (b) rip-rap, (c) playa sur con duna natural respaldada por una laguna de agua dulce superficial y seca intermitentemente y (d) limite del área de estudio (playa sur) complejo residencial Pacifica.

La playa es mesomareal, con un rango promedio de mareas de 2.3 m, y una marea de tipo mixta y semidiurna. El oleaje anual promedio está caracterizado por un periodo asociado al pico espectral (T_p) de 11 s y a una altura significativa (H_s) de 1 m, siendo de hasta 4 m con un periodo de 15 s en condiciones de tormenta. Un estudio de oleaje en aguas someras, realizado por Martínez-Díaz-de León *et al.*, (2008) reporta una H_s promedio de 0.3 - 0.7 m (invierno 2004 - 2005) con H_s que rebasan los 2 m bajo condiciones de tormenta con T_p mínimos de 3.6 s y máximos de 21 s. En este estudio se reporta una incidencia neta del oleaje proveniente del oeste, no obstante a lo largo del presente trabajo se establece un rango de 250° a 290° , con el fin de destacar como suroeste a los valores menores a 270° y noroeste a valores mayores.

Los vientos que interactúan en la región presentan velocidades promedio de $\sim 4 \text{ ms}^{-1}$ con una dirección predominante del sureste y se encuentran fuertemente

influenciados por el centro de alta presión localizado en el Océano Pacífico y un centro de baja presión al NE de Baja California cuya variabilidad espacio-temporal genera cambios estacionales en la dirección y magnitud del viento (Castro R. y A. Martínez, 2010; Larrañaga-Fu, 2013). BTS presenta un sistema de brisas muy marcado, con vientos de mar a tierra durante el día, y vientos de menor intensidad de tierra a mar durante la noche. Entre los meses octubre-marzo se presentan eventos esporádicos de vientos de tierra hacia el mar de corta duración (días) con baja humedad y alta temperatura, denominados vientos Santana (Larrañaga-Fu, 2013).

Los cambios estacionales de las propiedades físicas del agua en la BTS se derivan de procesos que ocurren en el océano abierto, por lo que el agua presente en la zona está relacionada con la dinámica del sistema de la Corriente de California. Se ha evidenciado que las corrientes dentro de la BTS son dominadas principalmente por el viento, mientras que las corrientes generadas por las mareas son despreciables, y siendo las corrientes más intensas en primavera y verano (Cervantes-Audelo, 2013). Estudios numéricos muestran dos patrones de corrientes superficiales: en verano el viento del norte y noroeste genera una corriente que sigue la línea de costa desde San Miguel hasta Punta Banda, y en invierno el viento del sur y sureste invierten el flujo (Cervantes-Audelo, 2013). A pesar de la existencia de varios estudios de corrientes en BTS, los estudios sobre las corrientes costeras son muy limitados (Ruiz de Alegría-Arzaburu et al., 2016).

4. METODOLOGIA

4.1. Mediciones morfológicas

Con el fin de analizar los cambios morfológicos estacionales a través y a lo largo de PH, se obtuvieron mediciones topográficas y batimétricas mensuales a lo largo de 3 km de playa durante un periodo de 19 meses comprendido entre

agosto 2014 y febrero 2016. Las mediciones morfológicas cubren un total de 30 perfiles topo-batimétricos espaciados 100 m entre sí (Figura 8). La playa tiene una pendiente promedio de $\tan\beta = 0.025$ y un diámetro de sedimento promedio de $D_{50} = 0.25$ mm.



Figura 8. Vista aérea de los transectos de cada perfil topo-batimétrico: (A) el corredor turístico; (B) rip-rap; (C) dunas. MET y AWAC se refieren a la ubicación de la estación meteorológica, y el perfilador acústico de olas y corrientes, respectivamente.

Los levantamientos topográficos fueron realizados en condiciones de marea baja, utilizando un GPS diferencial (Leica GS14) referenciado al NBMI y montado sobre un eje con dos ruedas (Figura 9 a). Se obtuvieron mediciones continuas cada 1 s de las posiciones en coordenadas UTM X, UTM Y y alturas elipsoidales con una precisión del orden de centímetros (< 5 cm). Las mediciones de campo estaban referenciadas a una base fija instalada en la azotea del Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO).

Las mediciones batimétricas se realizaron durante marea alta con una embarcación en la cual se instaló, un Perfilador de Corrientes Acústico Doppler con función de ecosonda (ADCP, Hydrosurveyor M9 de SONTEK) acoplado a un GPS diferencial. Ambos instrumentos fueron montados en un boogie adaptado para ser arrastrado por la embarcación sobre 30 perfiles transversales (Figura 9 b). El ADCP-M9, opera en tres frecuencias automáticas: 3 MHz para profundidades menores a 5m; 1 MHz para profundidades entre 5 y 40 m; y 0.5 MHz en función de ecosonda en profundidades de 40 a 80 m. Las mediciones del M9 son enviadas vía radio a la computadora de campo donde se almacenan.

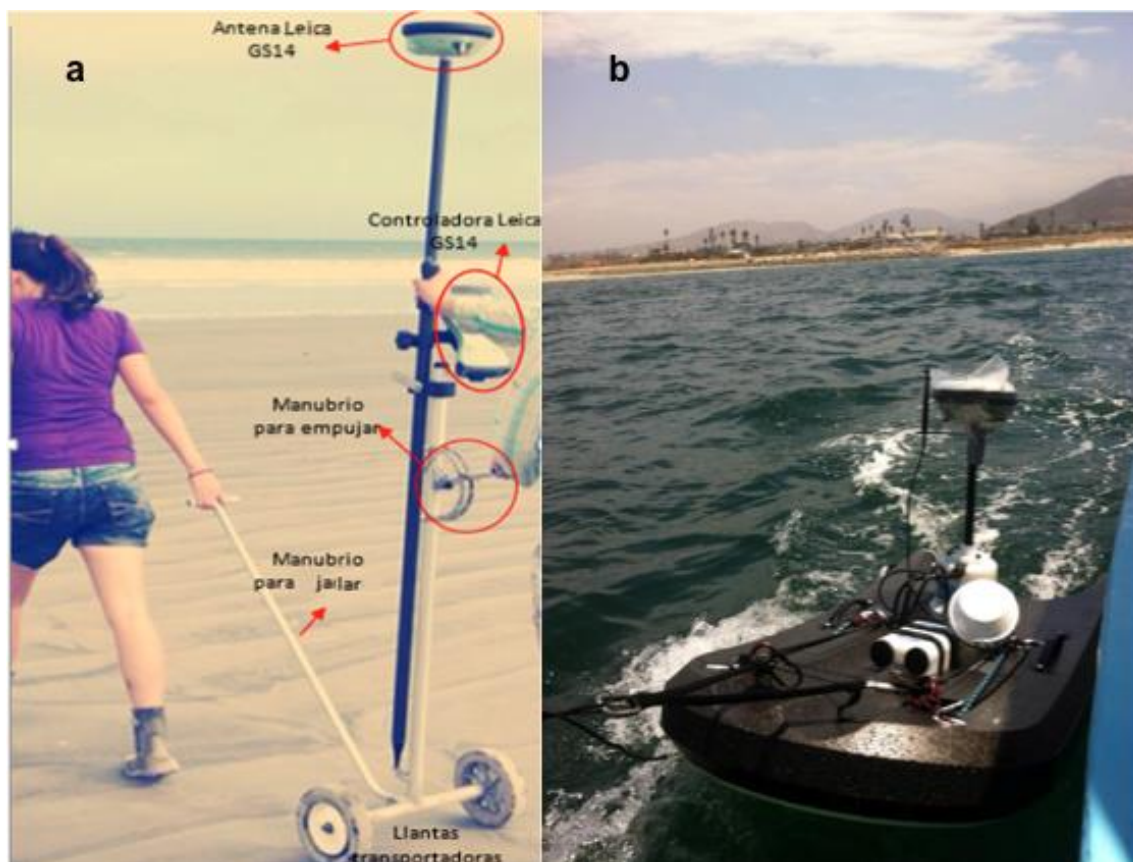


Figura 9. a) GPS diferencial (antena y controladora) montado en eje con ruedas. b) GPS y ADCP montados en el boogie que es arrastrado por una embarcación.

4.2. Mediciones de oleaje

Con el fin de conocer las condiciones de oleaje durante los periodos de mediciones morfológicas, se tomaron datos puntuales a través de un ADCP tipo AWAC (Acoustic Wave and Current Profiler) instalado a 20 m de profundidad hacia el sur de BTS (ver localización en Figura 8) frente a Pacifica. El AWAC (Figura 10) se programó para tomar mediciones horarias de oleaje a 1Hz durante 17 minutos.

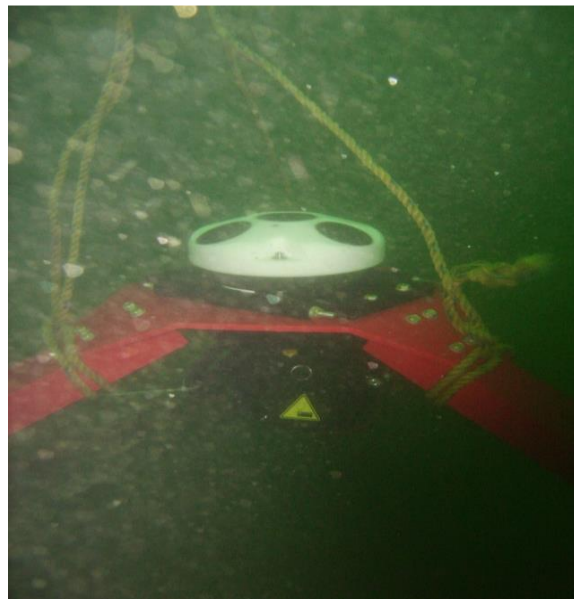


Figura 10. ADCP tipo AWAC anclado a 20m de profundidad frente al complejo residencial Pacifica.

Para caracterizar el tipo de oleaje incidente en la playa se utilizaron las variables de altura significativa (H_s), el periodo asociado al pico espectral (T_p) y la dirección incidente del oleaje (Dir). La Figura 11 muestra la serie de tiempo continua de estos parámetros desde agosto 2014 a febrero 2016.

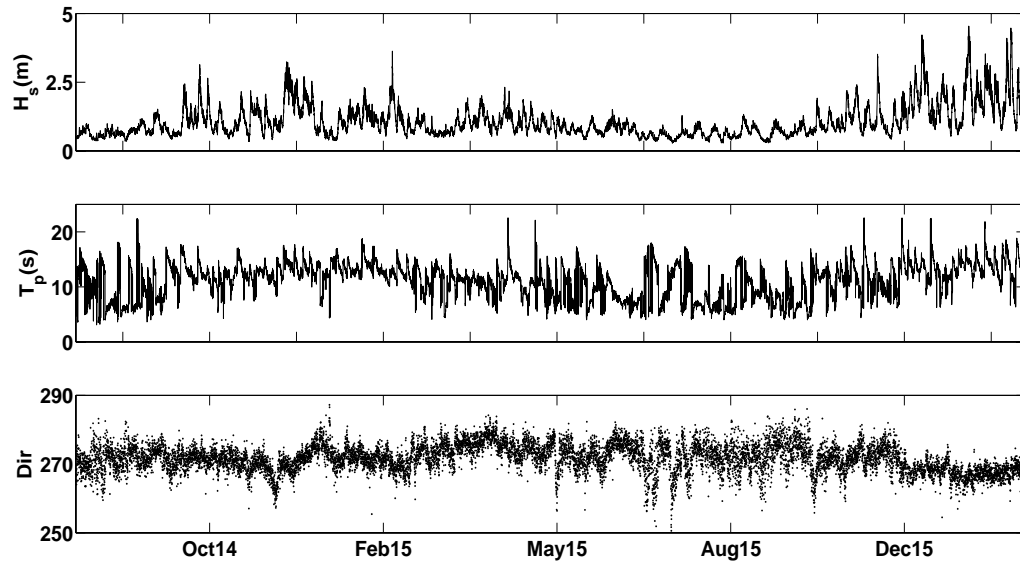


Figura 11. Serie de tiempo continua de los parámetros de H_s , T_p y Dir desde agosto 2014 a febrero 2016.

A partir de la serie temporal de H_s , T_p y Dir se calculó el flujo longitudinal de la energía del oleaje, $P_{1.0}$, (Ecuación 1) el cual está empíricamente asociado a la tasa del transporte longitudinal de sedimentos (Ruessink *et al.*, 2000; Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2010).

$$P_{1.0} = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_p \sin\theta \cos\theta \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del agua de mar, g la gravedad, H_s la altura significativa, T_p el periodo asociado al pico espectral y θ igual a Dir la dirección incidente del oleaje (Tabla I). Nótese que la Dir fue elegida de tal forma que el oleaje incidente del noroeste (suroeste) resulta en un valor positivo (negativo) (Ruessink *et al.*, 2000).

4.3. Procesamiento de mediciones morfológicas

Con el fin de determinar las variaciones morfológicas de la playa intermareal y supramareal se procesaron las mediciones topográficas mensuales a través de

rutinas escritas en Matlab©. Estas mediciones necesitaron de una limpieza preliminar para eliminar datos erróneos (Figura 12).

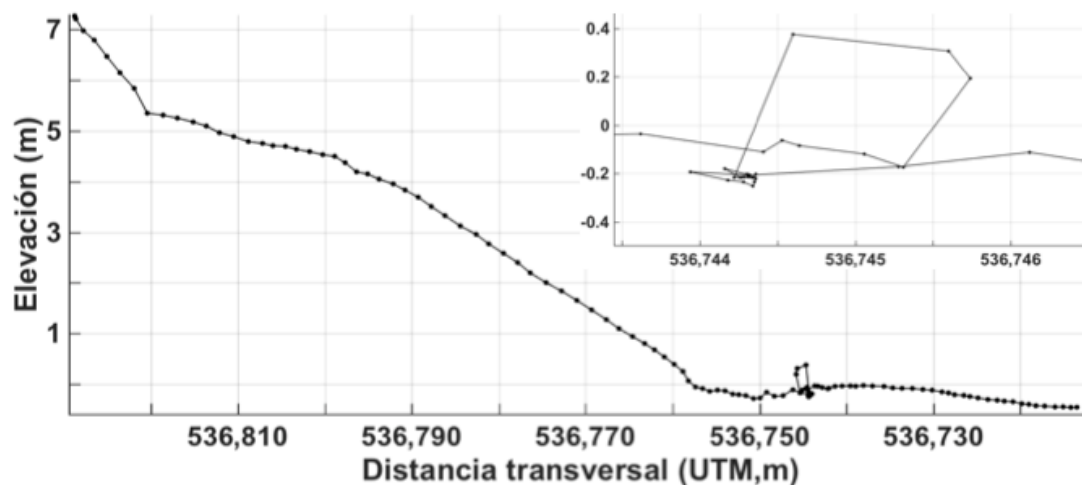


Figura 12. Perfil topográfico 7 de febrero 2016. Ejemplo de un perfil que necesita ser corregido, la imagen superior derecha representa un zoom de datos fuera de lugar por corregir.

Las mediciones batimétricas ofrecen información morfológica de la playa submareal. El procesamiento de estas mediciones requiere de la sincronización de los datos del GPS con los del ecosonda. Una vez sincronizados, se interpolan y se suman para obtener las profundidades corregidas (denominado batimetría). Una vez obtenida la batimetría corregida, se procede a la eliminación de mediciones desubicadas además de los giros generados durante la ruta de la embarcación y poder, así, aislar cada uno de los transectos recorridos (Figura 13).

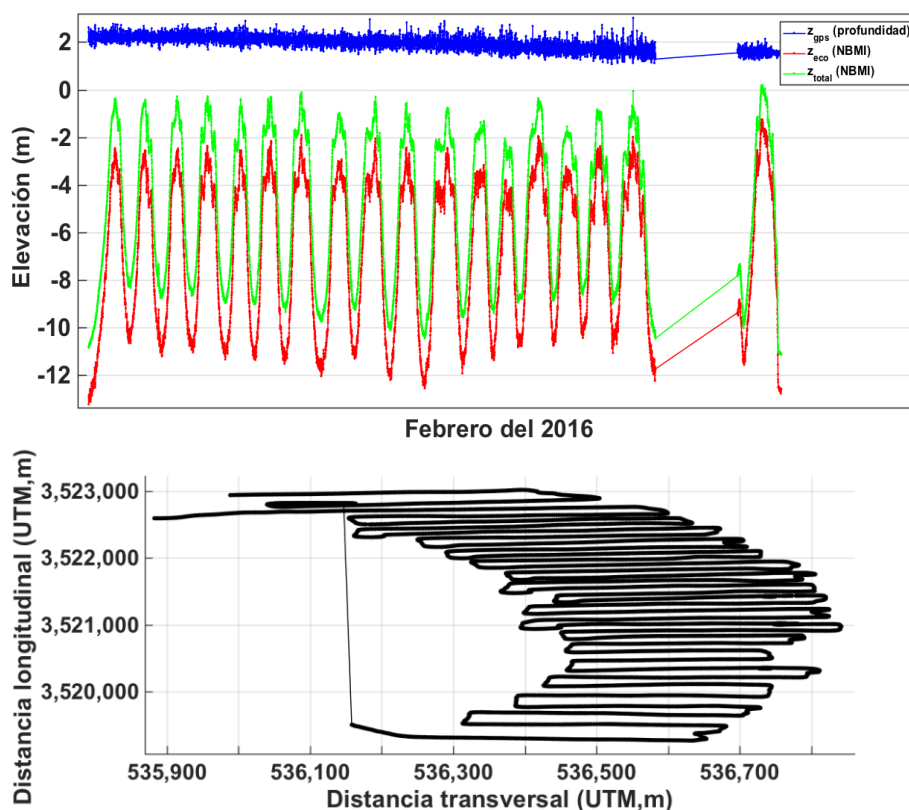


Figura 13. Ejemplo del procesamiento de los datos batimétricos. El panel superior muestra la interpolación de los datos del GPS diferencial (azul), los de la ecosonda (rojo) y la profundidad corregida con ambas (verde). El panel inferior muestra la vista en planta de los transectos batimétricos crudos (en negro) previos a ser limpiados.

Una vez procesados los datos de los perfiles topográficos y batimétricos, se unifican, dando lugar a la generación de una matriz topo-batimétrica que abarca tanto la playa subaérea (intermareal y supramaral) como la playa submareal (sumergida) (Figura 14).

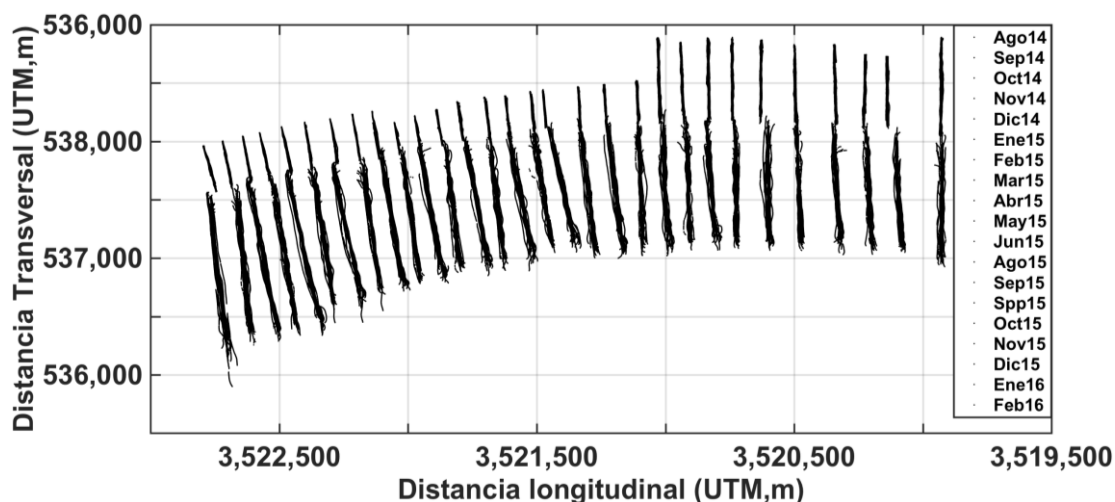


Figura 14. Vista en planta de los 30 perfiles topo-batimétricos medidos mensualmente desde agosto 2014 a febrero 2016 en PH.

Con el fin de identificar rasgos morfológicos importantes (e.g. posición y dimensión de barras sumergidas y bermas), se separó cada uno de los 30 perfiles topo-batimétricos de la matriz generada (Figura 15). La identificación de las posiciones de crestas de las barra submareales se realizó individualmente para cada perfil topo-batimétrico, extrayendo la coordenada de la ubicación de su cresta (x, y, z).

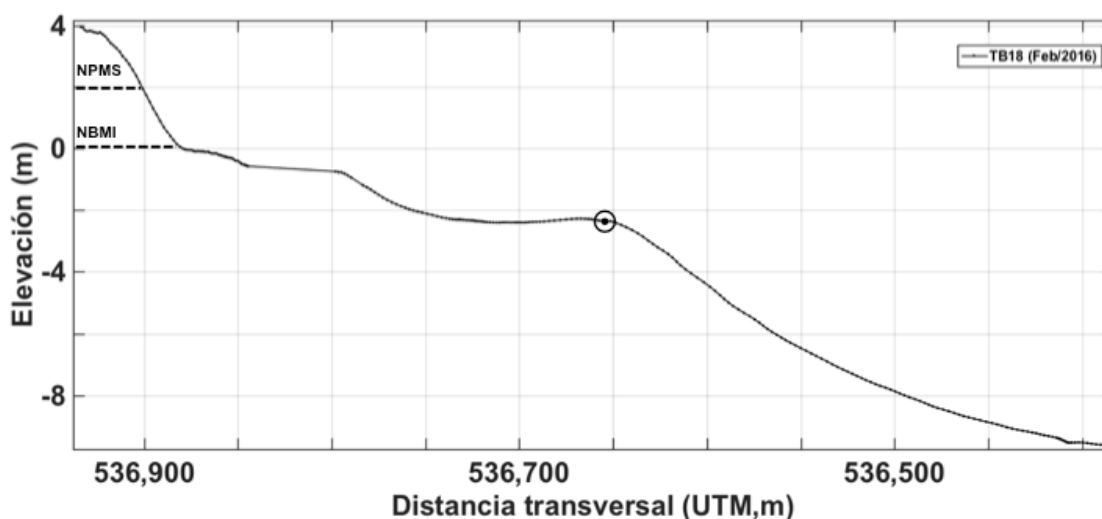


Figura 15. Vista transversal del perfil TB18 en el mes de febrero del 2016. El 0 esta referenciado al NBMI y a 2.3 m esta señalado el NPMS. El círculo con un punto negro al centro, muestra un ejemplo de identificación y marcación de la cresta de una barra submareal.

Con el fin de analizar la variabilidad volumétrica de la playa subaérea y sumergida (submareal) se calculó el área de cada perfil topo-batimétrico (perfil TB) a través de su integración mediante el método trapezoidal (Ecuación 2). Con el método de integración trapezoidal se obtiene una aproximación del área bajo la curva de una función dividiéndola en n secciones entre un par de puntos y se aproxima el área de cada sección mediante un trapecio. La ecuación aproximada para este cálculo es:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N (x_{n+1} - x_n)[f(x_n) + f(x_{n+1})] \quad (2)$$

donde $(x_{n+1} - x_n)$ es el espacio consecutivo entre cada par de puntos.

Para el cálculo del volúmenes se estimó el promedio de las áreas entre cada perfil TB y se multiplicó por la distancia entre los perfiles $(\frac{A_1+A_2}{2} * d)$. Finalmente se sumaron los volúmenes calculados entre los perfiles y se obtuvo el volumen total de la sección de playa de estudio.

Con el fin de evaluar las diferencias morfológicas ocurridas durante los diferentes meses, se interpolaron linealmente los perfiles topo-batimétricos y se obtuvieron superficies tridimensionales o Modelos Digitales de Elevación (MDE). Las diferencias parciales (DP#) entre los diferentes MDE en el tiempo, proporcionaron información sobre los cambios morfológicos transversales y longitudinales de la playa (Figura 16). La suma acumulada de las diferencias obtenidas (DPA#) muestran la evolución morfológica de la playa en el tiempo de estudio.

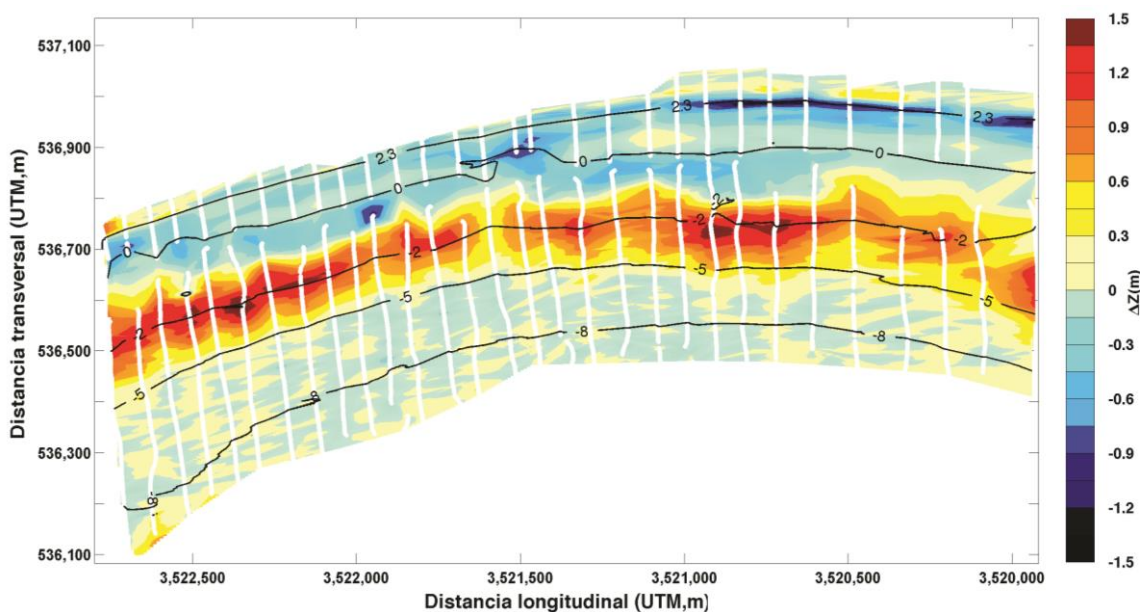


Figura 16. Ejemplo de un MDE de la diferencia parcial (DP) entre diciembre 2014 y enero 2015. Los transectos de los perfiles TB del mes de enero 2015 son las líneas blancas transversales.

5. RESULTADOS

En esta sección se presentan, por un lado, los resultados de la caracterización de las condiciones de oleaje durante el periodo de estudio, y por otro, los de la variabilidad morfológica mensual de la playa. Al final de esta sección se evalúan las variaciones estacionales de las barras submareales en relación a las condiciones de oleaje para cada periodo de estudio.

5.1. Caracterización de oleaje

La Figura 17 muestra la serie de tiempo de los parámetros horarios de oleaje: periodo asociado al pico (T_p), altura significativa (H_s) y dirección de incidencia. Desde agosto 2014 a febrero 2016 las condiciones de oleaje promedio fueron H_s de 1 m con un T_p asociado de 11 s y una Dir de $\sim 268^\circ$ suroeste. Las barras grises en la Figura 17 muestran las fechas en las que se realizaron las mediciones topográficas y batimétricas en PH. La Tabla I muestra las condiciones promedio de H_s , T_p y Dir para los periodos entre campañas de mediciones topográficas (periodos entre líneas grises de Figura 17).

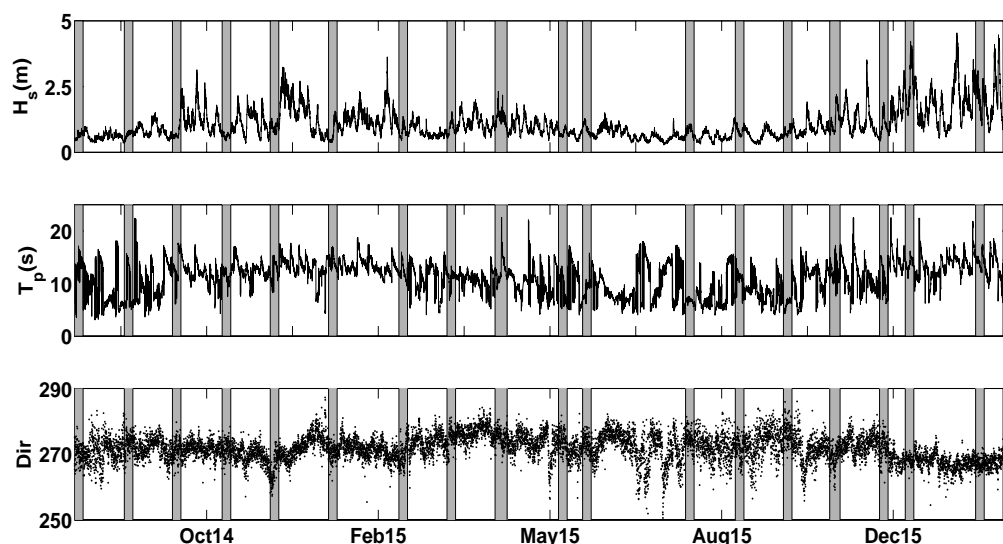


Figura 17. Serie de tiempo de parámetros horarios del oleaje: altura significativa (H_s), periodo asociado al pico espectral (T_p) y dirección del oleaje incidente (Dir), medidos con el AWAC. Las barras grises señalan las fechas en que se realizaron las campañas de mediciones morfológicas.

En la Tabla I se observa que la dirección predominante de incidencia de oleaje proviene del noroeste con algunas variaciones del suroeste. En condiciones de invierno se observa una H_s promedio de 1.5 m, con un T_p asociado de 13 s (relacionado a un oleaje energético), mientras que en condiciones de verano la H_s promedio es de 0.6 m con un T_p asociado de 9 s (relacionado a un oleaje menos energético). En promedio, la dirección del oleaje incidente es del noroeste. La diferencia en la intensidad y dirección del oleaje es muy notable entre el primer y segundo invierno (Tabla 1 secciones grises con letra blanca); presentándose en promedio una H_s máxima de 1.2 m con T_p de 13 s y dirección $\theta = 270^\circ$ (DTB05) el primer invierno a comparación de H_s máxima de 2 m con T_p de 14 s y dirección $\theta = \sim 267^\circ$ (DTB16) el segundo invierno. Las diferencias entre el primer y segundo verano (Tabla 1, secciones en gris con letra negra) fueron menores, con condiciones de H_s máxima de 0.62 m con T_p de 12 s y dirección $\theta = \sim 270^\circ$ (DTB01) el primer verano y H_s máxima de 0.68 m con T_p de 9 s y dirección $\theta = 272^\circ$ el segundo verano (DTB11).

Tabla I. Condiciones promedio de H_s , T_p y Dir para los periodos entre campañas de mediciones topográficas (Figura 18).

DTB#	Inicio	Final	H_s (m)	T_p (s)	Dir (θ)
DTB 01	12-Ago-2014	17-Ago-2014	0.625	12.286	270.282
DTB 02	18-Ago-2014	15-Sep-2014	0.613	8.402	271.545
DTB 03	16-Sep-2014	13-Oct-2014	0.826	11.210	271.768
DTB 04	14-Oct-2014	11-Nov-2014	1.147	11.675	271.623
DTB 05	12-Nov-2014	12-Ene-2015	1.267	12.907	270.707
DTB 06	13-Ene-2015	22-Feb-2015	1.203	13.134	271.171
DTB 07	23-Feb-2015	22-Mar-2015	0.819	11.126	273.633
DTB 08	23-Mar-2015	21-Abr-2015	1.185	11.018	276.297
DTB 09	22-Abr-2015	26-May-2015	0.946	10.044	273.279
DTB 10	27-May-2015	09-Jun-2015	0.755	10.241	271.565
DTB 11	10-Jun-2015	08-Ago-2015	0.682	9.399	272.164
DTB 12	9-Ago-2015	06-Sep-2015	0.653	8.424	271.884
DTB 13	7-Sep-2015	04-Oct-2015	0.653	8.079	273.991
DTB 14	05-Oct-2015	01-Nov-2015	0.985	10.857	270.689
DTB 15	02-Nov-2015	29-Nov-2015	1.177	11.134	273.034
DTB 16	30-Nov-2015	14-Dic-2015	2.020	14.375	267.960
DTB 17	15-Dic-2015	24-Ene-2016	1.840	13.508	267.364
DTB 18	25-Ene-2016	09-Feb-2016	1.800	13.305	267.730

La Figura 18 muestra los datos promediados de la Tabla I a demás de las desviaciones estándar de los parámetros de oleaje. Estos resultados muestran que existe una estacionalidad muy marcada en las condiciones de oleaje. En los meses de verano (junio – septiembre; DTB01 – 02 y DTB10 – 13; datos en gris con letra blanca Tabla I) el oleaje es de baja energía, con $H_s = 0.6 - 0.7$ y $T_p = 9 - 12$ s. En los meses de invierno (noviembre – febrero; DTB05 – 07 y DTB16 – 18; datos en gris con letra negra Tabla I) el oleaje es de mayor energía, con $H_s = 1.2 - 2$ m y $T_p = 12 - 14$ s. En los meses de transición de septiembre a noviembre y de marzo a junio (DTB03 – 04, DTB07 – 10 y DTB14 – 15; datos en blanco Tabla I) la altura del oleaje y su periodo asociado se encuentra en valores intermedios de $H_s = 0.8 - 1.1$ m y $T_p = 10 - 11$ s.

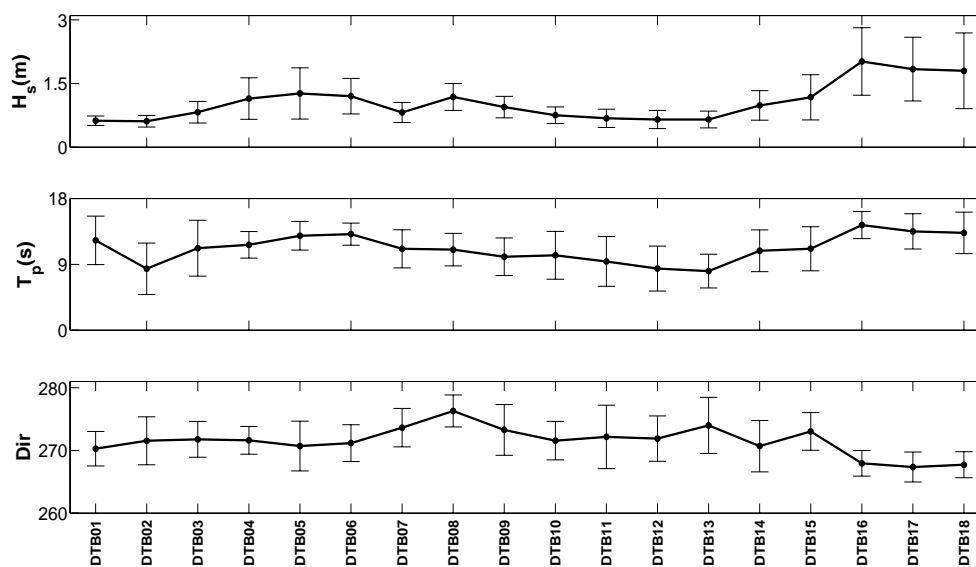


Figura 18. Promedios y desviaciones estándar (líneas verticales sobre los puntos) de las mediciones de H_s , T_p y Dir para los periodos definidos en Tabla I.

5.2. Variabilidad morfológica

Con las mediciones topo-batimétricas se analizó la evolución morfológica de la playa de estudio. Primero se determinó la variabilidad transversal de la playa estudiando los cambios morfológicos en algunos perfiles topo-batimétricos (TB) (Figura 19). Después, se evaluó el movimiento transversal de las crestas de las barras sumergidas en el periodo de agosto 2014 a febrero 2016, y se relacionó con las diferentes condiciones de oleaje para determinar los cambios estacionales. Posteriormente se analizaron los modelos digitales de elevación (MDE) para determinar los cambios morfológicos ocurridos mensualmente en las diferentes secciones de la playa (supramareal, intermareal y submareal) e identificar los periodos de acreción y erosión a lo largo y a través de la playa. Por último, se analizaron las variaciones volumétricas totales y por secciones de playa, y se relacionaron con la presencia o ausencia de barras sumergidas.

5.2.1. Evolución de perfiles de playa

Para realizar un estudio detallado de la variabilidad transversal que ocurre en la playa, se seleccionaron los perfiles TB 02, 18 y 30 (Figura 19), como los más representativos de entre todos los transectos medidos. La selección de los perfiles TB se basó en la calidad del empate topo-batimétrico de las mediciones de campo.

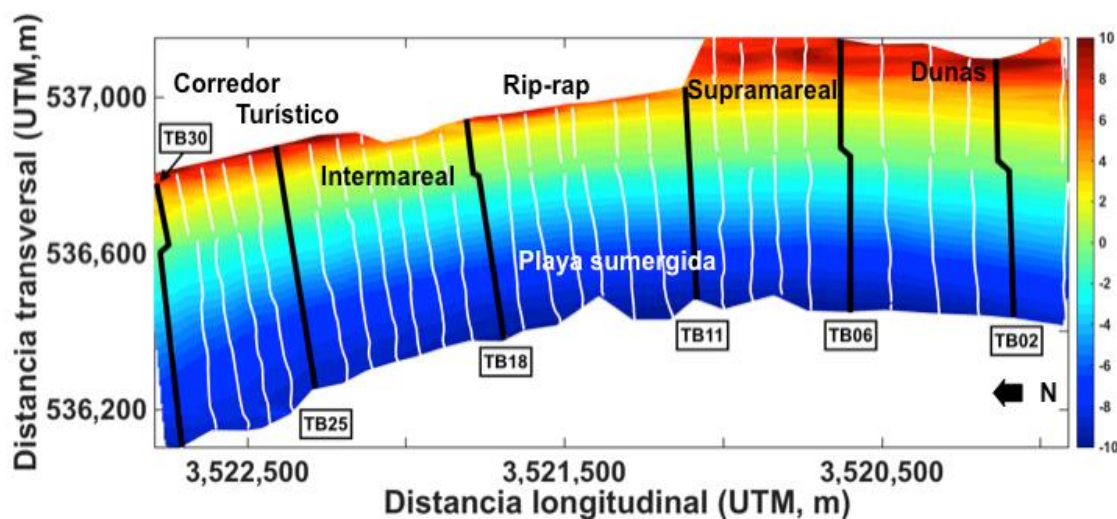


Figura 19. Vista en planta de la interpolación topo-batimétrica del mes de agosto de 2015 en PH. Se resaltan 6 perfiles TB (líneas negras) sobre los 30 utilizados para realizar la interpolación (líneas blancas).

Las Figuras 20, 21 y 22, muestran la evolución temporal de los diferentes perfiles TB, resaltando en rojo los meses que representan, ejemplarmente, un perfil con la playa subaérea recuperada, uno de transición (inicia la migración de la barra mar adentro) y uno con una barra submareal bien definida y playa subaérea erosionada. De fondo, en gris claro, se muestran los demás perfiles de la serie de tiempo. El orden evolutivo de los perfiles en las Figuras 20, 21 y 22, es agosto 2014 en la esquina superior izquierda a febrero 2016 en la esquina inferior derecha. Nótese que la abreviatura Spp15 también corresponde al mes de septiembre del 2015.

La Figura 20 muestra la evolución temporal del perfil TB02 se observa la presencia de una berma en la parte supramareal y ausencia de barras submareales durante los meses de verano (Ago14, Nov14 y Spp15). En los meses de invierno (Feb15 y Feb16) la playa subaérea se erosiona y se observa la formación de una barra submareal a 2 – 4 m de profundidad. La playa subaérea se erosionó menos en Feb15 y la barra sumergida fue más pequeña y somera que en Feb16, donde la erosión de la playa subaérea fue mayor al igual que la barra submareal formada en aguas más profundas.

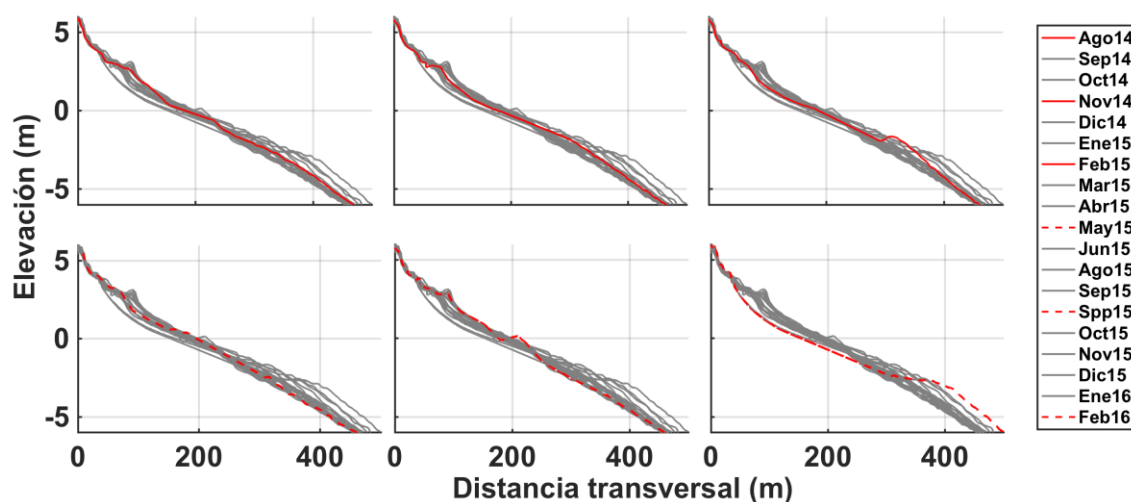


Figura 20. Evolución temporal del perfil TB 02 ubicado en el área de dunas. De la esquina superior izquierda a la derecha en líneas rojas solidas los meses de Ago14, Nov14 y Feb15 y en líneas rojas punteadas los meses de May15, Spp15 y Feb16. Las líneas grises son los demás meses de la serie de tiempo.

La Figura 21 muestra la evolución temporal del perfil TB18 con una pendiente más abrupta e irregular que el TB02 (Figura 20). En este perfil se dificulta visualizar la presencia de la berma. No se observan barras sumergidas en los meses de verano (Ago14, May15 y Spp15). A diferencia del perfil TB02, en este perfil se aprecia el inicio de la formación de una barra submareal en Nov14 que progresivamente migra mar adentro hasta formarse completamente en Feb15. Al igual que en TB02, en Feb16 la erosión de la playa subaérea es mayor que

en Feb15, lo cual contribuye a la formación de una barra más grande en aguas más profundas.

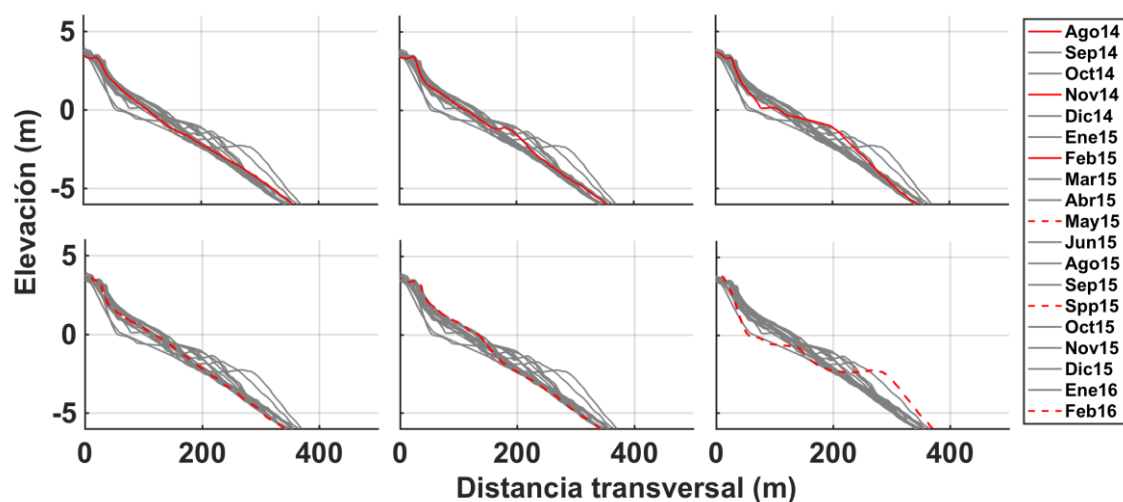


Figura 21. Evolución del perfil TB18 ubicado en la zona de rip-rap. De la esquina superior izquierda a la derecha en líneas rojas solidas están los meses de Ago14, Nov14 y Feb15, y en líneas rojas punteadas May15, Spp15 y Feb16. En líneas grises se presentan los demás meses de la serie de tiempo.

La Figura 22 muestra la evolución temporal del perfil TB30, que presenta una pendiente menos pronunciada que TB18 (Figura 21). El perfil muestra la presencia de una berma y ausencia de barra sumergida en los meses de verano (Ago14 y Spp15). En Nov14 y Spp15 se aprecia la formación de una barra por debajo del NBMI, la cual es transitoria hacia mar adentro. Las barras submareales se acaban de formar en los meses de Feb 15 y 16 asociado a la erosión de la playa subaérea. Al igual que en los otros perfiles, la erosión de la playa subaérea es mayor en Feb16 que en Feb15, consecuentemente, la barra sumergida es de mayor tamaño y más profunda en Feb16.

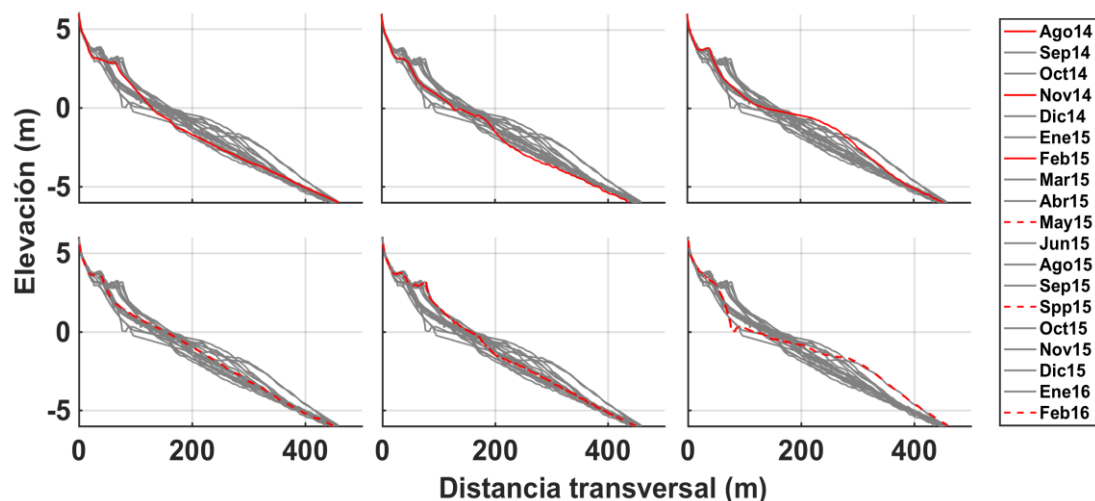


Figura 22. Evolución temporal del perfil TB30 ubicado en la zona del corredor turístico. De la esquina superior izquierda a la derecha en líneas rojas solidas los meses de Ago14, Nov14 y Feb15, y en líneas rojas punteadas May15, Spp15 y Feb16. En líneas grises se muestran los demás meses.

5.2.2. Evolución de la barra submareal

Con el fin de determinar la migración transversal de la barra submareal, se realizaron series de tiempo con la posición de las crestas para los perfiles TB 02, 06, 11, 18, 25 y 30 (Figura 19), los cuales fueron seleccionados por ser los más representativos por su calidad para mostrar las posiciones de crestas de las barra submareales .

Se utilizó la línea de costa de Ago14 ($z=0$ m NBMI) como referencia para determinar las distancias y profundidades transversales de las crestas de la barra para cada mes. La línea de costa seleccionada de Ago14 (LC) es la primera medición de la serie de tiempo y corresponde con condiciones de verano en ausencia de barra sumergida.

La Figura 23 muestra la distancia y profundidad de la cresta de la barra para TB02 y TB06 desde agosto 2014 a febrero 2016. En TB02 la barra se forma en Oct14 a 1 m de profundidad y a 100 m de la línea de costa mientras que en TB06 la barra se ubica a esa profundidad en Nov14. La cresta de la barra se

ubica a una profundidad máxima de ~2 m en Ene15 desplazándose 90 y 60 m en TB02 y TB06, respectivamente, desde su posición a 1 m de profundidad. A partir de Ene15 la barra empieza a migrar hacia la cara de la playa volviendo a su posición de origen y ubicándose a menos de 1 m de profundidad en Abr15. Durante el verano la barra es inexistente y ésta se vuelve a formar a finales de Sep15 a menos de 1 m de profundidad y a 75 m de la línea de costa tanto en TB02 como en TB06. Desde Sep15 hasta Feb16 la barra se aleja alrededor de 150 m mar adentro ubicándose a una profundidad máxima de 3.2 y 2.7 m en TB02 y TB06, respectivamente.

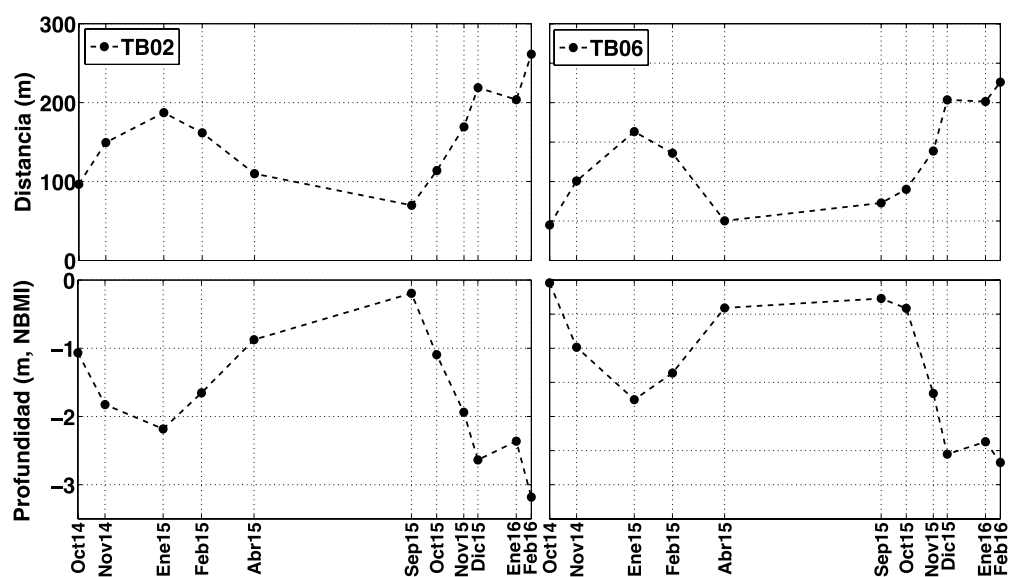


Figura 23. Distancias y profundidades de las crestas de la barra de agosto 2014 a febrero 2016 para los perfiles TB02 (paneles izquierdos) y TB06 (paneles derechos). Los valores de 0 representan la posición de la línea de costa y su profundidad en NBMI.

En TB11 y TB18, las barras se empiezan a formar en Oct14 alrededor de 0.5 m de profundidad (Figura 24). En TB11, la cresta de la barra avanza progresivamente alejándose de la costa hasta 100 m desde Oct14 a Mar15 desde una profundidad de 0.3 m hasta 2 m. Durante el mes de Mar15 a Abr15 la barra muestra un retroceso drástico de 110 m hacia la línea de costa, migrando desde una profundidad de 2 m hasta 0.1 m. TB18 muestra un

desplazamiento de la barra de ~100 m desde Oct14 a Ene15, hasta ubicarse a 1.5 m de profundidad. A diferencia de TB11, la barra se mueve ligeramente hacia la costa (hasta 60 m) desde Ene15 a Mar15, ubicándose a ~1 m de profundidad. Desde Sep15 a Feb16 ambos perfiles TB11 y TB18 muestran un alejamiento gradual de la barra desde la línea de costa (0.1 m de profundidad) a aguas profundas, ubicándose en Feb16 a una profundidad de 3 m y 2.3 m en TB11 y TB18, respectivamente, después de haber realizado un desplazamiento de más de 150 m en ambos casos.

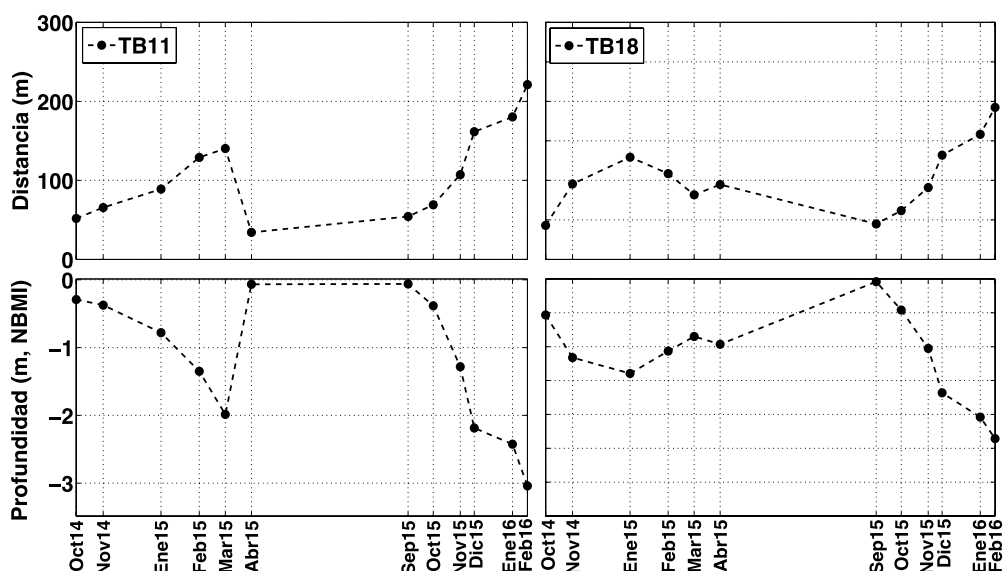


Figura 24. Distancias y profundidades de las crestas de la barra de agosto 2014 a febrero 2016 para los perfiles TB11 (paneles izquierdos) y TB18 (paneles derechos). Las valores de 0 representan la posición de la línea de costa y su profundidad en NBM.

Para TB25 se observa que la barra migra hacia aguas profundas desde Oct14 a Dic14, recorriendo 100 m desde 1 a 2 m de profundidad, y desde Dic14 a Abril15 vuelve hacia la cara de la playa ubicándose a 0.3 m de profundidad (Figura 25). En TB30 la barra migra desde 0.3 m hacia mar adentro a casi 2 m de profundidad también de Oct14 a Dic14, y vuelve para Abr15 a 0.7 m de profundidad recorriendo 50 m (Figura 25). La barra sigue el mismo patrón en ambos perfiles desde Sep15 a Feb16, migra desde aguas someras de menos

de 0.5 m a 2 m de profundidad, recorriendo alrededor de 150 m. A diferencia de los otros perfiles estudiados, en estos dos la barra muestra poco movimiento entre Oct15 y Nov15, disminuyendo su profundidad.

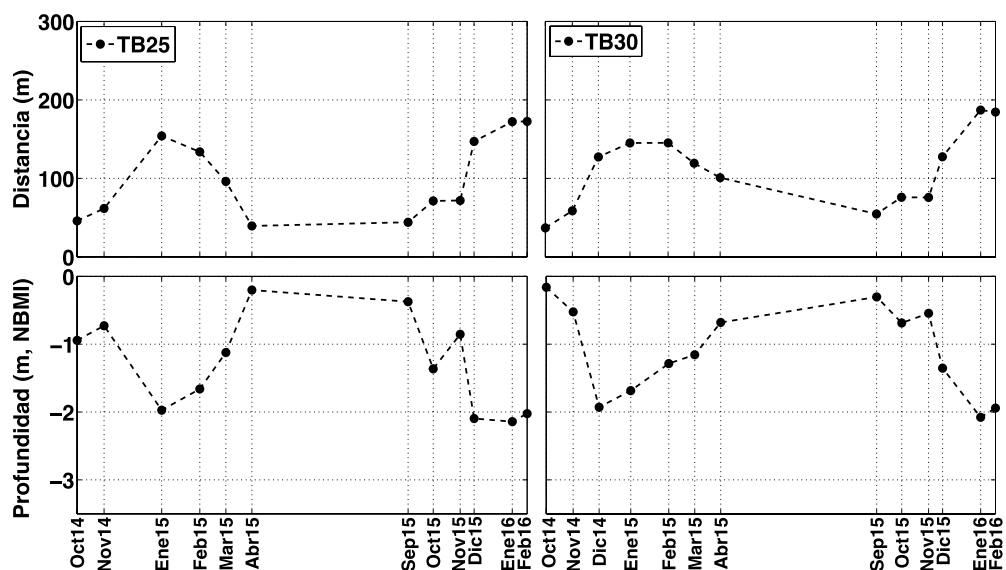


Figura 25. Distancias y profundidades de las crestas de la barra de agosto 2014 a febrero 2016 para los perfiles TB25 (paneles izquierdos) y TB30 (paneles derechos). Los valores de 0 representan la posición de la línea de costa y su profundidad en NBMI.

El panel superior de la Figura 26 muestra la variabilidad longitudinal de la posición transversal de la cresta de la barra para el periodo de estudio. Muestra que la mayor variabilidad ocurren en la sección sur de la playa (TB1 a TB 8). Los paneles (b), (c) y (d) de la Figura 26 muestran la variabilidad longitudinales de las crestas para los periodos de alejamiento y acercamiento de la barra, respecto de LC.

Durante el alejamiento de la barra entre Oct14 y Feb15 (Figura 26 b) se observa que la mayor variabilidad transversal de la posición de la cresta ocurre en los extremos sur y norte (de 100 a 210 m en sur y de 50 a 150 m en norte) mientras que en la parte central de la playa se presenta menor movimiento de la barra

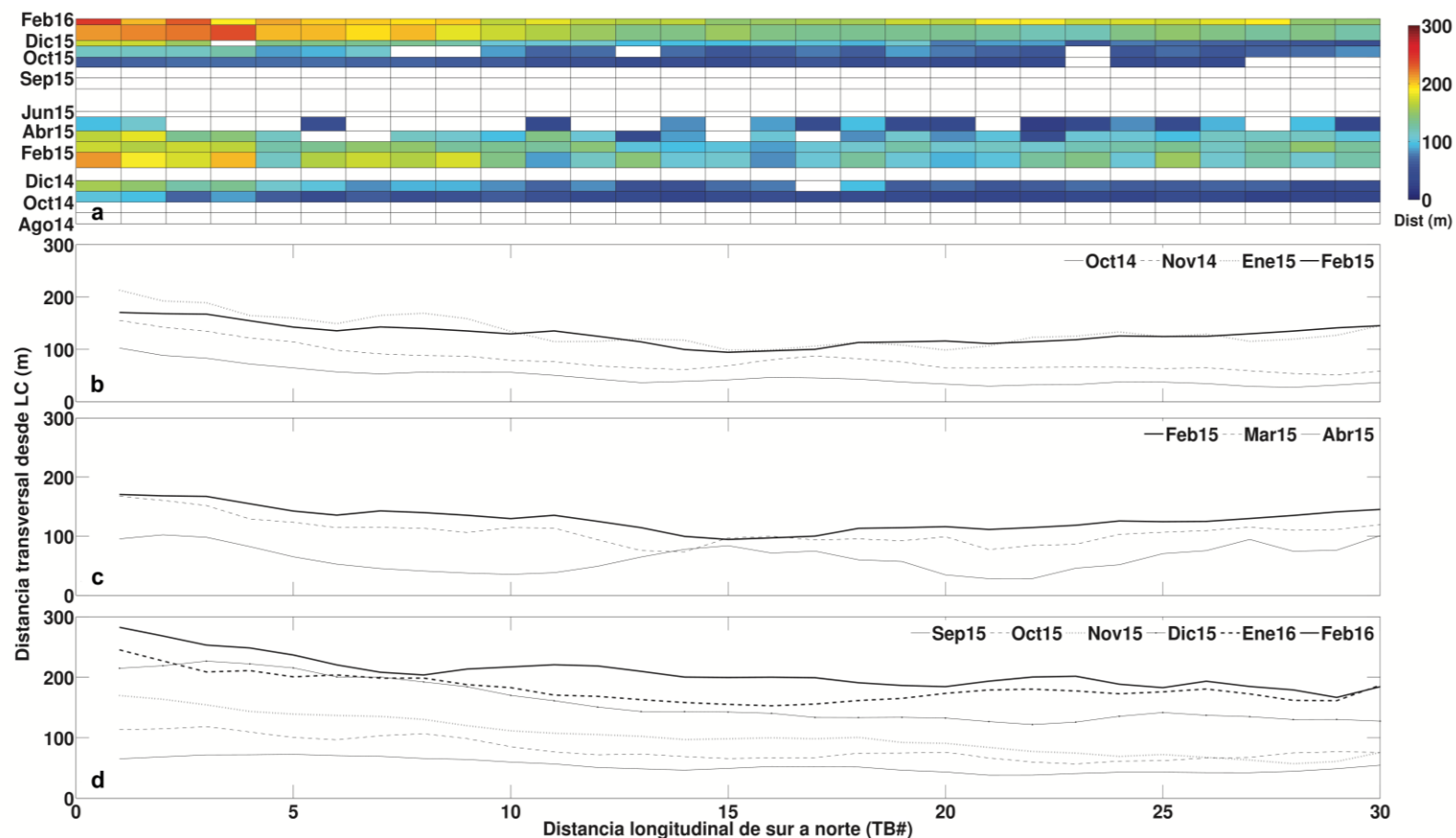


Figura 26. Variabilidad longitudinal de las crestas de la barra desde el perfil TB1 (sur) al TB30 (norte). (a) posiciones de la cresta de la barra para cada TB y toda la serie de tiempo, y distancias transversales de la barra desde la línea de costa de referencia a lo largo de la playa (TB 1 a TB 30) (paneles b, c y d).

Durante el movimiento de la barra hacia la playa subaérea de Feb15 a Abr15 (Figura 26 c) se observa que en la sección sur de la playa para Abr15 las crestas vuelven a una posición similar que en Oct14, mientras que en la sección media y norte la barra no se acerca tanto a la parte subaérea, sobre todo en la mitad que muestra muy poco acercamiento.

En la Figura 26 d se muestra el alejamiento de la cresta de la barra de Sep15 a Feb16. Se observa un mayor alejamiento que en el anterior invierno (de Oct14 a Feb15), de casi 300 m desde la LC en el sur y de 200 m en el extremo norte. A diferencia de los movimientos de la barra de Oct14 a Abr 15 (Figura 26 b y c), durante el último invierno, las crestas de la barra se desalinean con la LC de referencia.

5.2.3. Evolución de los Modelos Digitales de Elevación (MDE)

La evolución morfológica de las barras submareales está asociada con pérdidas volumétricas entre la playa emergida y la sumergida. Con el fin de entender los cambios morfológicos transversales y longitudinales ocurridos en la playa supramareal, intermareal y submareal, se restaron los modelos digitales de elevación (MDE) para los diferentes meses de muestreo y se obtuvieron diferencias parciales (DP) (Tabla II). La Figura 27 muestra los resultados de las DP realizadas entre los diferentes meses, y la Figura 28 representa las diferencias parciales acumuladas (DPA) para el periodo de estudio.

Tabla II. Fechas entre las que se obtuvieron las diferencias parciales (DP) de los modelos digitales de elevación (MDE).

DP#	Fecha inicial	Fecha final
DP01	Ago14	Sep14
DP02	Sep14	Oct14
DP03	Oct14	Nov14
DP04	Nov14	Ene15
DP05	Ene15	Feb15
DP06	Feb15	Mar15
DP07	Mar15	Abr15
DP08	Abr15	May15
DP09	May15	Jun15
DP10	Jun15	Ago15
DP11	Ago15	Sep15
DP12	Sep15	Spp15
DP13	Spp15	Oct15
DP14	Oct15	Nov15
DP15	Nov15	Dic15
DP16	Dic15	Ene16
DP17	Ene16	Feb16

La Figura 27 muestra las diferencias morfológicas tanto de la playa subaérea como la sumergida para los diferentes meses de muestreo. En general se observa que la playa muestra una estacionalidad muy marcada, y los cambios morfológicos más notables se dan de forma transversal entre la playa supramareal e intermareal (subaérea) y la playa submareal. Las diferencias morfológicas en los meses de verano (DP01 y DP08–DP12) indican que la playa subaérea recibe sedimento (acreción en isobata mayor a 0 m). Durante los meses de otoño (DP02 y DP13) se observa que parte del sedimento de la playa subaérea se empieza a desplazar hacia la playa submareal, y se observa la formación de una barra transicional en la parte intermareal baja.

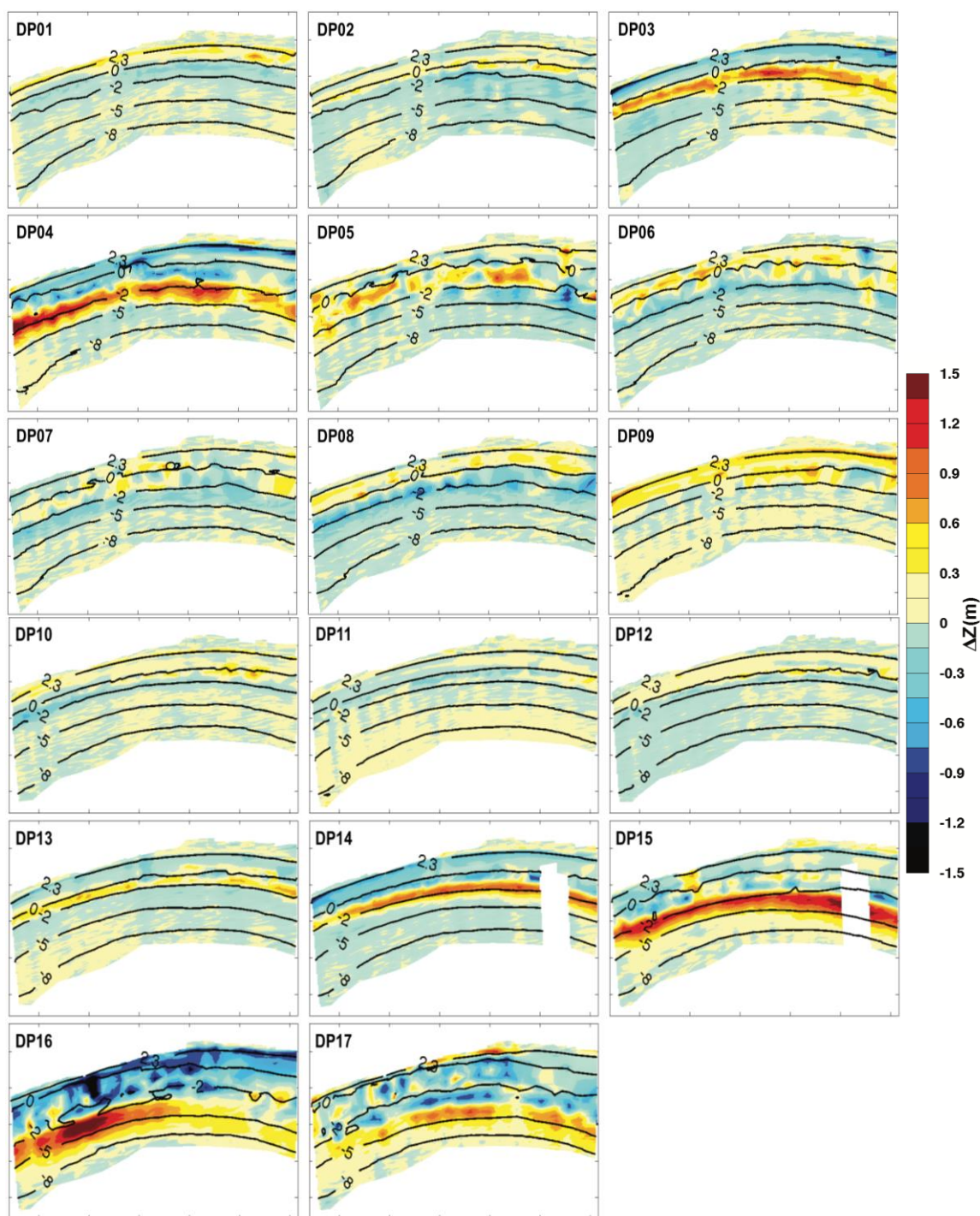


Figura 27. Diferencias topo-batimétricas de la playa para los diferentes periodos de estudio (DP01–DP17 indicados en la Tabla II). La barra de colores muestra las diferencias de elevación en metros, y las líneas de contorno negras muestran algunas isobatas topográficas y batimétricas.

Entre los meses octubre y enero (DP03–4 y DP14–16) ocurre una pérdida de sedimento significativa en la playa subaérea y se mueve mar adentro formando una barra submareal longitudinalmente bien definida. Desde febrero a abril se observa que el sedimento acumulado a profundidades de 2 a 5 m se mueve hacia la playa intermareal, contribuyendo a la recuperación de la playa subaérea (DP05–7 y DP17). A pesar de que los cambios morfológicos más notables ocurren a través de la playa, existe una variabilidad longitudinal entre las secciones norte y sur (e.g. DP04, DP15 y DP16) lo que sugiere que en ciertos periodos las corrientes longitudinales redistribuyen sedimento a lo largo de la playa .

En la Figura 28 se representa la evolución morfológica de la playa (subaérea y sumergida) desde agosto 2014 a febrero 2016. Desde agosto a octubre 2014 se observa acreción en la playa subaérea y ligera erosión en la parte submareal cercana (DP01–DPA01 y DPA09–12). A partir de noviembre la playa submareal se empieza a erosionar y se observa la acumulación de ese sedimento en el límite inferior de la zona intermareal (DPA02 y DPA13). Los cambios morfológicos más notables ocurren entre diciembre y febrero (DPA3–4 y DPA14–16) donde se observa erosión vertical muy notable de más de 1.5 m en la playa subaérea (colores azules oscuros) y acreción de la misma magnitud a lo largo de la playa submareal (profundidades entre 2 y 5 m). Entre marzo y junio se transporta la arena desde la playa submareal a la subaérea, contribuyendo a la recuperación de la playa intermareal (DPA5–8).

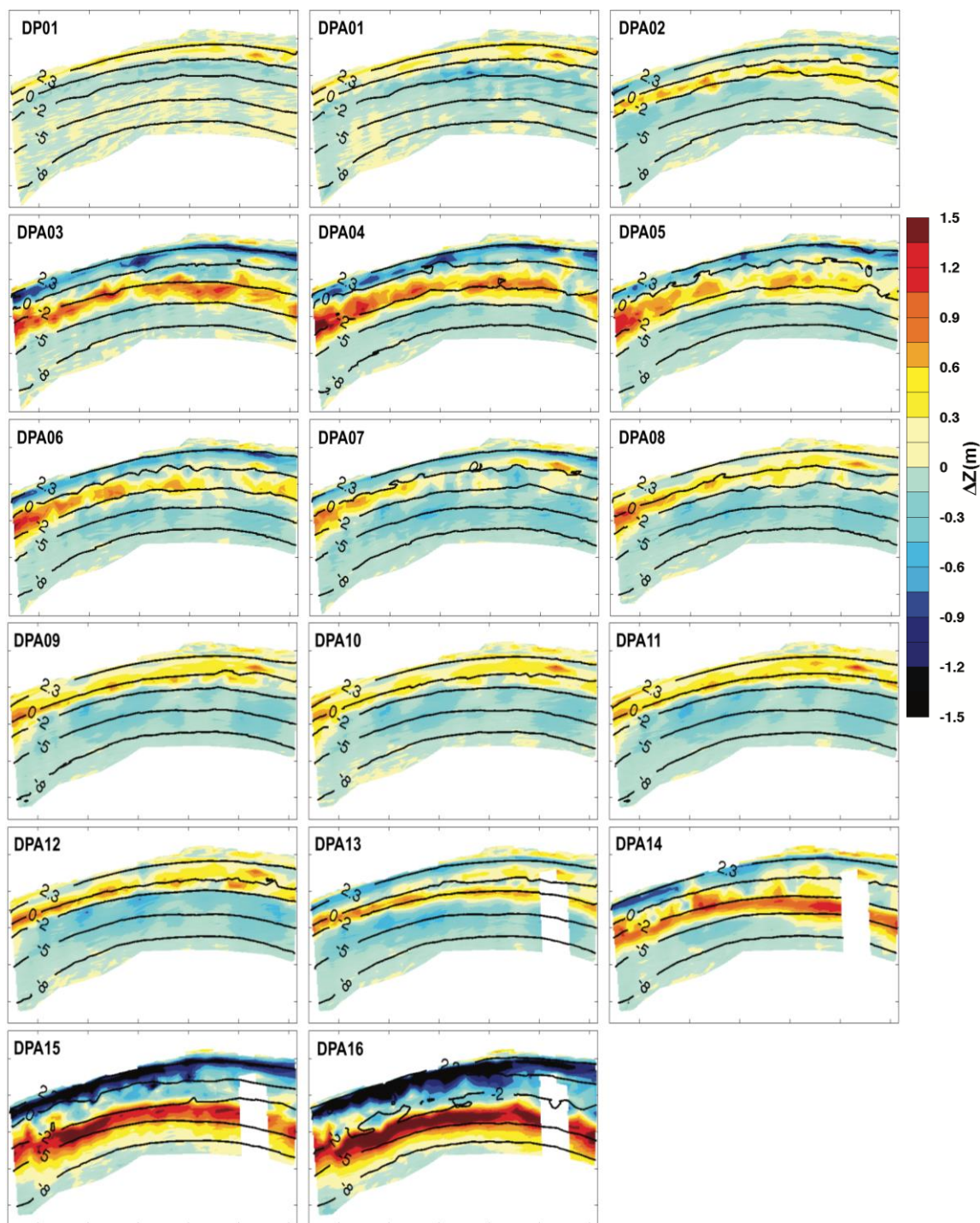


Figura 28. Diferencias parciales acumuladas (DPA) desde agosto 2014 a febrero 2016. La barra de colores muestra las diferencias de elevación acumuladas (en metros), y las líneas de contorno negras muestran algunas isobatas topográficas y batimétricas.

5.2.4 Evolución volumétrica

Para cuantificar los cambios morfológicos de la playa se calcularon las variaciones volumétricas en toda la playa de estudio (Tot) (desde -9 a 5.5 m de elevación). Después se le restó el promedio del volumen total de la playa para el periodo de agosto 2014 a febrero 2016 y se obtuvieron los volúmenes sin promedio (Dem). Finalmente se calcularon las diferencias acumuladas de los volúmenes (Cum) con el fin de entender la evolución volumétrica de toda la playa. Por último, se decidió realizar estos mismos cálculos solamente para la zona submareal (Sub) y para la playa subaérea (IS), por separado.

Los resultados volumétricos están representados en la Figura 29. Los paneles superiores muestran la evolución temporal del volumen total de la playa (a), el de la sección subaérea (IS, b) y la sumergida (c). Los paneles superiores muestran que solamente alrededor del 14% del volumen total de la playa se encuentra en la parte IS, mientras que el 86 % del volumen se encuentra en la Sub. Se observa que las variaciones de volumen entre IS y Sub son opuestas, por ejemplo, de Oct15 a Feb16 se observa una ganancia de $\sim 400,000 \text{ m}^3$ en la parte Sub, mientras que en la parte IS se pierden $\sim 350,000 \text{ m}^3$. Esto demuestra que a pesar de que el intercambio de sedimento es principalmente transversal, existe una pequeña porción de arena que se mueve de forma longitudinal.

La sección subaérea de la playa (IS) muestra un comportamiento estacional típico, con el máximo de volumen entre septiembre y octubre y el mínimo entre enero y febrero. La mayor pérdida volumétrica ocurrió entre finales de septiembre del 2015 y febrero del 2016, con una erosión de $\sim 350,00 \text{ m}^3$ a lo largo de los casi 3 km de playas lineales (Figura 29 b). La playa submareal también muestra un comportamiento estacional, pero opuesto al de IS; con el máximo volumen en enero y el mínimo en octubre (Figura 29 c). Mientras que las variaciones volumétricas mensuales en IS son graduales (Figura 29 b), en la parte submareal los cambios son abruptos, la acreción se da típicamente en

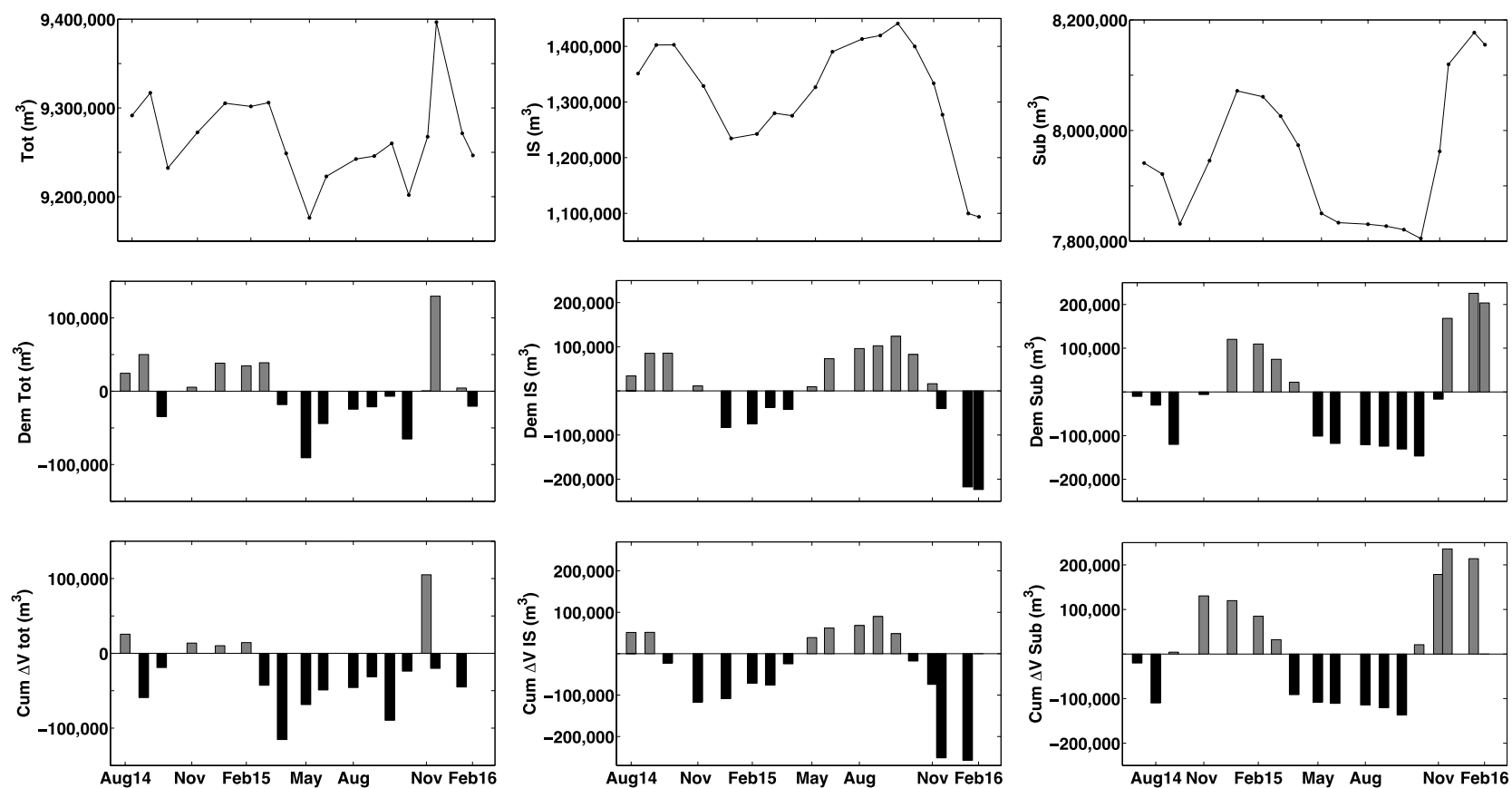


Figura 29. Serie temporal de volúmenes para toda la playa (Tot) y para la sección submareal (Sub) y la subaérea comprendida por la intermareal y supramareal (IS). Los paneles de arriba abajo muestran los volúmenes totales, sin promedio y las diferencias acumuladas para la playa entera (a, d, g), la sección subaérea (b, e, h) y la submareal (c, f, i).

dos meses (entre octubre y enero) mientras que la erosión es lenta y dura la mayor parte del año (entre enero y octubre) (Figura 29 c).

La evolución volumétrica de toda la playa no mantiene una estacionalidad como tal dado que se ve afectada por los cambios longitudinales (Figura 29 a). La variabilidad volumétrica total es de $\sim 200,00 \text{ m}^3$ y se observan valores máximos, principalmente en septiembre y diciembre/enero, y mínimos en octubre y mayo. La variabilidad volumétrica total de la playa en porcentaje indica que partiendo de 60% en Ago14, aumenta 10% para Sep14, pierde 35% en Oct14, recupera 27% de lo perdido y se mantiene en un 62% de Ene15 a Mar15. De Mar15 a May15 se observa una pérdida del 50% respecto del volumen anterior (Mar15), recuperándose 35% de May15 a Sep15. Pierde 27% para Oct15, y se recupera significativamente para Dic15, pero finalmente sufre una pérdida, quedando solo un $\sim 40\%$ del volumen total para Feb16.

Los volúmenes sin promedio muestran las tendencias de erosión y acreción de la playa (Figura 29 d, e, f). Los resultados para el volumen total muestran que la erosión fue ligeramente mayor que la acreción; el periodo de acreción duró hasta marzo 2015, y posteriormente ocurrieron pérdidas, excepto en diciembre 2015 que ganó sedimento (Figura 29 d). En los paneles e y f de la Figura 29 se observa que la playa subaérea (IS) pierde sedimento en periodos cortos (de octubre a enero) y se recupera de forma gradual en periodos largos (de enero a octubre), mientras que la tendencia de pérdida y recuperación de la playa submareal (Sub) es inversa, con una rápida acreción y lenta erosión.

La evolución volumétrica de la playa total y las secciones IS y Sub están representadas en la Figura 29 paneles g, h, i. La comparación del volumen total de la playa durante el periodo de estudio muestra una pérdida neta de aproximadamente 20%. de Ago14 a Feb16.

Con el fin de entender la relación entre el transporte longitudinal con los cambios volumétricos, se graficó la serie de tiempo de los diferentes volúmenes junto con el flujo longitudinal de energía ($P_{1,0}$) (Figura 30). Se observa que las tendencias del volumen total pueden estar relacionadas con el flujo longitudinal de energía (Figura 30 a, d), pero con un desfase temporal. Sin embargo, los volúmenes IS y Sub no parecen estar tan relacionados con el flujo longitudinal de energía. Esto puede sugerir que individualmente el comportamiento de los volúmenes en IS y Sub es estacional y transversal, pero la suma de ambos deja de tener un comportamiento estacional y su variabilidad parece estar relacionada a la energía longitudinal.

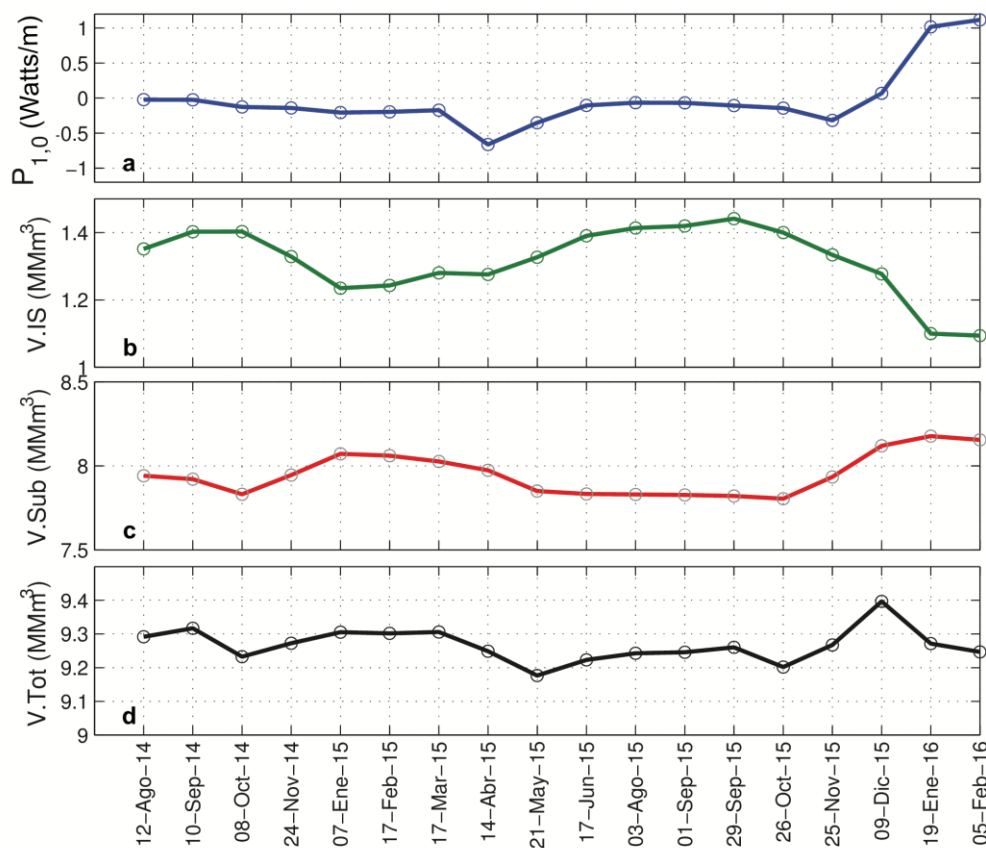


Figura 30. Serie temporal de los promedios mensuales del flujo longitudinal de energía (a, $P_{1,0}$), y los volúmenes IS, Sub y Tot (paneles b, c y d).

6. DISCUSION

Con base en mediciones morfológicas e hidrodinámicas de alta resolución espacio-temporal colectadas de agosto 2014 a febrero 2016, el presente estudio provee, por primera vez, resultados sobre la variabilidad morfológica de la barras sumergida en Playa Hermosa (Ensenada, B.C.). Este trabajo contribuye al conocimiento general sobre la variabilidad transversal y longitudinal de barras de arena en playas intermedias mesomareales.

Las mediciones hidrodinámicas recabadas desde octubre 2013 a febrero 2016 muestran que el oleaje tiene un comportamiento estacional muy marcado. Siendo del noroeste con una mayor altura y periodo largo ($H_s = 1.2\text{--}2$ m y $T_p = 12\text{--}14$ s) durante el invierno (noviembre – febrero) y principalmente del suroeste de menor altura y periodo más corto ($H_s = 0.6\text{--}0.7$ m y $T_p = 9\text{--}12$ s) en verano (junio – septiembre). Estos resultados difieren de lo reportado por Martínez-Díaz-de León *et al.*, (2008) dado que ellos reportan oleaje de menor altura para el invierno del 2004 al 2005.

El estudio de la evolución transversal de la playa mostró la formación de una berma durante las condiciones de oleaje de verano (agosto 2014–mayo 2015) y acreción en la sección subaérea (intermareal y supramareal). Durante esos meses, la barra submareal estaba ausente. Para los meses de oleaje de invierno (febrero 2015–2016) sucedió lo contrario, la playa subaérea mostro erosión y ausencia de una berma y se observó la formación de una barra submareal. En los meses de transición entre verano e invierno se mostró un desprendimiento de la berma y el inicio de la formación de una barra cerca al nivel de bajamar. La variabilidad morfológica estacional de la playa coincide con lo descrito por el modelo propuesto por Shepard (1950), además, corresponde con los cambios morfológicos de playas intermedias sugeridos por Aagaard *et al.*, (2013) y Sénéchal *et al.*, (2015), entre otros.

Los resultados obtenidos con los modelos digitales de elevación (MDE) ofrecen, además de las variaciones transversales, conocimiento sobre los cambios morfológicos longitudinales. La playa muestra homogeneidad longitudinal en los cambios morfológicos ocurridos tanto en invierno (noviembre – febrero) como en verano (junio – septiembre). Durante el invierno, se muestra erosión de la playa subaérea, de hasta 1.5 m, y el material erosionado se deposita en la parte sumergida (2 – 5 m de profundidad) mostrando una acreción de hasta 1.5 m. La respuesta morfológica es inversa durante el verano. La mayor variabilidad morfológica longitudinal en la playa se presenta durante los periodos de transición entre verano e invierno (marzo – junio y septiembre – noviembre). El estudio de Sénéchal *et al.*, (2015) muestra una estacionalidad similar para una playa expuesta a condiciones de oleaje similares.

La evolución volumétrica de la playa muestra que alrededor del 14 % del volumen total está representado por la playa subaérea, mientras que el resto lo comprende la sección sumergida. Por tanto, este estudio demuestra la importancia de evaluar la morfodinámica de la playa submareal. Durante el periodo de estudio se observaron variaciones volumétricas de hasta 400,000 m³ entre la sección sumergida y subaérea. En promedio, existe un desbalance de alrededor de 50,000 m³ entre ambas secciones, indicando que esa cantidad será transportada longitudinalmente, y ocurre principalmente en los periodos de transición (octubre y mayo). El intercambio volumétrico principal de la playa se da de forma transversal, lo cual es típico de playas de bolsillo o de bahía (e.g. Masselink y Hughes, 2003), y va de acuerdo con los valores bajos de flujo de energía longitudinal obtenidos (promedio de 1,000 Watts/m) (Shand, 2007).

La playa presenta una sola barra submareal, que se evidencia a partir de octubre a 1 m de profundidad, ubicándose los 4 m al final del invierno, y vuelve hacia la cara de la playa para abril. Por tanto, la barra tiene un comportamiento estacional muy marcado y relacionado a las condiciones de oleaje, como el

descrito por Price *et al.*, (2012), Cohn *et al.*, (2014) y Ruessink *et al.*, (2016) entre otros. Este estudio demuestra que la cresta de la barra se desplaza en promedio hasta 200 m hacia dentro y fuera de la costa, alcanzando hasta 4 m de profundidad. Estos resultados coinciden con lo descrito por Sénéchal *et al.*, (2015) quienes indican desplazamientos de la cresta de la barra de hasta 120 m ubicándose a profundidades de 3.5 m ante la incidencia de un oleaje similar. Yuhi *et al.*, (2015) encontraron que los desplazamientos de la barras respecto a la línea de costa fueron de entre 100 y 200 m alcanzando profundidades de hasta 2 m. Este estudio demuestra que existen diferencias longitudinales en la posición de la cresta de la barra, dándose la mayor variabilidad en la sección sur de la playa, similar a lo descrito por Ruessink *et al.*, (2000), quienes asumen que dichas diferencias son causadas por la redistribución de sedimento y movimiento longitudinal no uniforme, durante el desarrollo de características alternantes entre el acercamiento y alejamiento de crestas de la barra respecto de la línea de costa.

La mayoría de los estudio sobre la dinámica de barras sumergidas se centran en entender los cambios transversales. Sin embargo, existe una necesidad de investigar la variabilidad longitudinal de las barras. En un futuro se espera ampliar base de datos cubriendo toda la franja arenosa de la bahía y ampliando el periodo de estudio. Se prevé que se puedan integrar las mediciones colectadas en un modelo numérico morfodinámico (e.g. Delft3D, XBeach) para poder predecir la dinámica de las barras submareales bajo condiciones hidrodinámicas futuras.

7. CONCLUSIONES

Mediciones morfológicas e hidrodinámicas recabadas entre agosto 2014 y febrero 2016 a lo largo de 3 km de Playa Hermosa (Baja California) indican que la variabilidad morfológica de las barras sumergidas es estacional. La playa presenta una sola barra sumergida, y esta es evidente en los meses de oleaje intenso durante el invierno y desaparece en verano, cuando el oleaje es moderado. La formación de la barra submareal ocurre a partir de octubre, migra hasta 200 m mar adentro hasta ubicarse a una profundidad de 4 m en febrero. Entre febrero y abril la barra se desplaza hacia la cara de la playa, incorporando su sedimento a la sección subaérea. El volumen desplazado es del orden de 400,000 m³, siendo el intercambio volumétrico principal de forma transversal, y alrededor del 10 % es transportado longitudinalmente. Estudios futuros pretenden ampliar el área de estudio abarcando toda la sección arenosa de Bahía Todos los Santos, además de ampliar el periodo de investigación para poder evaluar las variaciones interanuales de la morfodinámica de la barra.

8. REFERENCIAS

Aagaard, T., y N. Vinther, 2008. Cross-shore currents in the surf zone: rips or undertow?. *Journal of Coastal Research*, 24: 561–570.

Aagaard, T., B. Greenwood y M.G. Hughes, 2013. Sediment transport on dissipative, inter- mediate and reflective beaches. *Earth-Science Reviews*, 124: 32–50.

Army Corps of Engineers, 1984: Shore Protection Manual. Coastal Engineering Research Center, Department of the Army, 1(4) 544.

Bird, E.C.F., 2008. Coastal geomorphology: an introduction. 2nd edition. John Wiley & Sons, Chichester.

Castelle, B., P. Bonneton, H. Dupuis y N. Sénéchal, 2007. Double bar beach dynamics on the high-energy meso-macrotidal french aquitanian coast: a review. *Marine geology*, 245(1): 141–159.

Castro R. y A. Martínez, 2010. Variabilidad espacial y temporal del campo de viento. En: Gaxiola-Castro G, Durazo R (eds.), *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997–2007: Diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*. 129–147.

Cervantes-Audelo, I.G., 2013. Análisis de circulación y dispersión en la Bahía Todos Santos, Baja California. Tesis de Maestría. Universidad del Mar, Oaxaca, México; 61.

Chrzastowski, M. J., 2005. Beach Features. In: Schwartz, M. L. (ed.), *Encyclopedia of Coastal Science*. Dordrecht, The Netherlands: Springer; 145–146.

Cicin-Sain, B., R. W. Knecht, and N. Foster, eds., 1999. Trends and Future Challenges for U. S. National Ocean and Coastal Policy August 1999. Proceedings of a Workshop. January 22, 1999. Washington, D.C.

Cohn, N., P. Ruggiero, J. Ortiz, D.J. Walstra, 2014. Investigating the role of complex sandbar morphology on nearshore hydrodynamics. In: Green, AN and Cooper, JAG (eds.), Proceedings 13th International Coastal Symposium (Durban, South Africa), Journal of Coastal Research, Special Issue No. 70.

Dally, W.R., 1987. Longshore bar formation—surf beat or undertow?. Coastal Sediments '87, ASCE, New York, 71–86.

Davidson-Arnott, R.G.D., 2010. Introduction to Coastal Processes and Geomorphology. Cambridge University Press, Cambridge, England, 442.

Division of Nearshore Research, Texas A&M University-Corpus Christi. [en línea]: documentación de fuentes electrónicas en el Internet. 2005. [fecha de consulta: 30 Mayo 2016]. Disponible en: <<http://lighthouse.tamucc.edu/Waves/CoastalErosion>>.

García-Ramos, S., 2003. Predicción de los cambios en el perfil de playa mediante parámetros simples. Tesis de licenciatura. Universidad Politécnica de Catalunya, España; 78.

Greenwood, B., 2005. Bars. In: Schwartz, M. L. (ed.), Encyclopedia of Coastal Science. Dordrecht, The Netherlands: Springer; 120–129.

Hallermeier, R.J., 1981. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate, Coastal Engineering, 4: 253–277.

Larrañaga-Fu, M.J., 2013. Variabilidad de la circulación superficial en la Bahía Todos Santos, Baja California, México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California, México; 67.

Martínez-Ramos, S., 2013. Estudio morfodinámico de una playa lineal. Aplicación al caso de Gandía. Trabajo final de maestría. Universidad Politécnica de Valencia, España, 45.

Martinez-Diaz-de Leon, A., Lizarraga-Arciniega, J. R., Delgado-Gonzalez, O., Galindo-Bect, L. A., Torres-Navarrete, C. R., Blanco-Betancourt, R., Gil-Silva, E., Cano-Cetina, R., 2008. Influencia del oleaje invernal en el crecimiento longitudinal de la barra del Estero de Punta Banda, Bahía de Todos Santos, Baja California, México. *Ciencias Marinas*, 34(1) 69–76.

Masselink, G., A. Kroon y R.G.D. Davidson-Arnott, 2006. Morphodynamics of intertidal bars in wave-dominated coastal settings: a review. *Geomorphology* 73, 33–49.

Masselink, G. y M.G. Hughes, 2003. *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. Edward Arnold, London, 354.

Masselink, G., A.D. Short, 1993. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual model. *Journal of Coastal Research* 9 (3), 785–800.

Pape, L., Y. Kuriyama, y B.G. Ruessink, 2010a, Models and scales for cross-shore sandbar migration, *J. Geophys. Research*, 115.

Pape, L., N. G. Plant, y B.G. Ruessink, 2010b, On cross-shore migration and equilibrium states of nearshore sandbars, *J. Geophys. Research.*, 115.

Pedrozo-Acuña, A., 2011. Procesos costeros y morfodinámica de playas, México. Instituto de Ingeniería UNAM, 240.

Ranasinghe, R., G. Symonds, K. Black, R. Holman, 2004. Morphodynamics of intermediate beaches: a video imaging and numerical modelling study. *Coast. Eng.*, 51, 629–655.

Ruessink, B.G., y R. Ranasinghe, 2014. Beaches. In: Masselink, G., and Gehrels R. (ed.), *Coastal Environments & Global Change*. American Geophysical Union: Wiley. Hardcover, (7) 149–176.

Ruessink, B.G., I.M.J. van Enckevort, K.S. Kingston, M.A. Davidson, 2000. Analysis of observed two- and three-dimensional nearshore bar behaviour. *Marine Geology* 169, 161–183.

Ruiz de Alegria-Arzaburu, A. y G. Masselink, 2010. Storm response and beach rotation on a gravel beach, Slapton Sands, U.K. *Marine Geology*, 278(1-4): 77–99.

Ruiz de Alegria-Arzaburu, A., H. Garcia-Nava, E. Gil-Silva, G. Desplan-Salinas, 2015. A morphodynamic comparison of walled and non walled beach sections, Ensenada beach, México. Instituto de Investigaciones Oceanológicas, UABC, Ensenada, México, 10.

Ruiz de Alegria-Arzaburu, A.; M.A. Arreola-Cortez, H. García-Nava, R. Hernández-Walls, y A. Mejía-Trejo, 2016. The effects of beach morphology variations on the profile of nearshore currents on a gently sloping mesotidal beach. In: Vila-Concejo, A.; Bruce, E.; Kennedy, D.M., and McCarroll, R.J. (eds.), *Proceedings of the 14th International Coastal Symposium (Sydney, Australia)*. *Journal of Coastal Research*, Special Issue, No. 75, 257–261.

Sénéchal, N., G. Coco, B. Castelle y V. Marieu, 2015. Storm impact on the seasonal shoreline dynamics of a meso- to macrotidal open sandy beach (Biscarrosse, France), *Geomorphology*, 228, 448–461.

Shand, R.D., 2007. Bar splitting: system attributes and sediment budget implications for a net offshore migrating bar system. *Journal of Coastal Research*, SI 50 (Proceedings of the 9th International Coastal Symposium), pg – pg. Gold Coast, Australia, ISBN.

Short A.D. y D.W.T. Jackson, 2013. Beach Morphodynamics. In: John F. Shroder (ed.) *Treatise on Geomorphology*, 10:106–129.

Short, A.D., 1984. Temporal change in beach type resulting from a change in grain size. *Search* 15 (7–8), 228–230.

Shepard, F.P., 1950. Beach cycles in southern California. Technical Memo 20, Beach Erosion Board. US Army Corps of Engineering, Washington DC.

Stive, M.J.F., S.J.C Aarninkhof, L. Hamm, H. Hanson, M. Larson, K. Winjberg, R.J. Nicholls, M. Capobianco, 2002. Variability of shore and shoreline evolution. *Coastal Engineering* 47, 211–235.

Walstra, D.-J.R., D.A. Wesselman, E.C. van der Deijl, B.G. Ruessink, 2016. On the Intersite Variability in Inter-Annual Nearshore Sandbar Cycles. *J. Mar. Sci. Eng.*, 1–20.

Wright , L.D., S.K. May, A.D. Short, y M.O. Green, 1984. Beach and surf zone equilibria and response times. *Proc. 19 th Coastal Engineering Conf.*, Houston, Vol. 2, 2150–2164.

Yuhi, M.; Matsuyama, M.; Hayakawa, K., 2016. Sandbar Migration and Shoreline Change on the Chirihama Coast, Japan. *J. Mar. Sci. Eng.*, 4; 40.

Zheng, J., C. Zhang, Z. Demirbilek, L. Lin, 2014. Numerical study of sandbar migration under wave-undertow interaction. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 140(2):146–159.