

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS



**CARACTERIZACIÓN MORFODINÁMICA DE PLAYAS DE  
ARENA, CANTO RODADO Y MIXTAS EN BAHÍA TODOS  
SANTOS, B.C.**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFIA COSTERA**

PRESENTA:

**MAYRA DOLORES MARTÍNEZ MARTÍNEZ**

ENSENADA, B.C.,

ENERO DEL 2018.

## RESUMEN

La mayoría de los estudios de morfodinámica se centran en playas arenosas, dejando a un lado las playas conformadas por sedimentos gruesos y mixtos. El presente trabajo tiene como objetivo, investigar la variabilidad morfológica de playas compuestas por diferentes tamaños de sedimentos, expuestas a forzamientos hidrodinámicos similares (marea y oleaje). El estudio se realizó en cuatro playas de Bahía de Todo Santos (BTS): San Miguel (canto rodado), Granada Cove (guijarro), Stacks (mixta, de arena y guijarro) y Playa Hermosa (arenosa), durante el periodo agosto 2015 a agosto 2016. Para cumplir con este objetivo se obtuvo el oleaje incidente en cada playa a través de modelación numérica, estos datos se validaron con mediciones de un perfilador acústico Doppler. El efecto del oleaje en cada playa se evaluó por medio de mediciones topográficas y batimétricas de alta resolución espacial y temporal, dichas medición abarcan desde el límite supramareal superior hasta 10 m de profundidad. Con esto se evaluó la variabilidad morfológica y volumétrica transversal y longitudinal de las cuatro playas a escala estacional, con relación al oleaje incidente. Los resultados indican que la playa con mayor pendiente es la de guijarro ( $\tan\beta=0.25$ ) seguida por la de canto rodado ( $\tan\beta=0.17$ ) y la mixta ( $\tan\beta=0.12$ ), siendo la playa de arena la que presenta menor pendiente ( $\tan\beta=0.05$ ). El análisis volumétrico demuestra que la playa con mayor variabilidad es la de guijarro ( $\pm 202 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ), seguida por la mixta ( $\pm 156 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ) y la de canto rodado ( $\pm 132 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ), siendo la playa arena ( $\pm 61 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ) la más estable. La variabilidad volumétrica de la playa de guijarro está asociada a un transporte longitudinal, regido por eventos de rotación de playa; mientras que la variabilidad de las playas de arena y mixta están asociadas a un transporte transversal, el cual genera la presencia estacional de un escalón en la playa mixta y una barra submareal en la playa de arena. Por el contrario, en la playa de canto rodado no se logró identificar un sistema de transporte de sedimentos. Las playas estudiadas presentan una estacionalidad marcada, con condiciones menos energéticas durante verano ( $P_{ot}=2.4 \text{ kWm}^{-1}$ ) que ocasionan la acreción de la zona subaérea, asociada a sedimentos de menor tamaño; mientras que en invierno la zona subaérea se erosiona dejando expuesto sedimento de mayor tamaño debido a condiciones energéticas ( $P_{ot}=7.46 \text{ kWm}^{-1}$ ). Este estudio logró caracterizar estacionalmente la morfodinámica de las playas en BTS con base en la granulometría, pendiente de la playa y su variabilidad volumétrica, bajo condiciones de oleaje similares.

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

'CARACTERIZACIÓN MORFODINÁMICA DE PLAYAS DE ARENA, CANTO  
RODADO Y MIXTAS EN BAHÍA TODOS SANTOS, B.C.'

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

MAYRA DOLORES MARTÍNEZ MARTÍNEZ

Aprobada por:



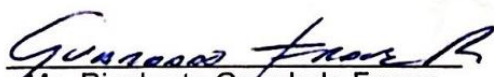
\_\_\_\_\_  
Dra. Amaia Ruiz de Alegria Arzaburu  
Directora de tesis



\_\_\_\_\_  
Dr. Héctor García Nava  
Sinodal



\_\_\_\_\_  
Dr. Jorge Cedesma Vázquez.  
Sinodal



\_\_\_\_\_  
Mc. Rigoberto Guardado France  
Sinodal

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

**DRA. LUS MERCEDES LÓPEZ ACUÑA**  
**COORDINADORA DE POSGRADO**  
**E INVESTIGACIÓN, F.C.M.**  
**Presente.-**

Después de haber efectuado una revisión minuciosa sobre el trabajo de tesis presentado por la estudiante **Mayra Dolores Martínez Martínez** 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:

CARACTERIZACIÓN MORFODINÁMICA DE PLAYAS DE ARENA, CANTO  
RODADO Y MIXTAS EN BAHÍA TODOS SANTOS, B.C.

Esperando reciba el presente de conformidad, quedo de usted.

Ensenada, B. C., a 16 de enero de 2018



**DRA. AMAIA RUIZ DE ALEGRIA ARZABURU**  
**DIRECTOR DE TESIS**

c.c.p. Expediente

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

**DRA. LUS MERCEDES LÓPEZ ACUÑA**  
**COORDINADORA DE POSGRADO**  
**E INVESTIGACIÓN, F.C.M.**  
**Presente.-**

Después de haber efectuado una revisión minuciosa sobre el trabajo de tesis presentado por la estudiante **Mayra Dolores Martínez Martínez** 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:

CARACTERIZACIÓN MORFODINÁMICA DE PLAYAS DE ARENA, CANTO  
RODADO Y MIXTAS EN BAHÍA TODOS SANTOS, B.C.

Esperando reciba el presente de conformidad, quedo de usted.

Ensenada, B. C., a 16 de enero de 2018

  
\_\_\_\_\_  
**DR. HÉCTOR GARCÍA NAVA**  
**SINODAL**

c.c.p. Expediente

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

**DRA. LUS MERCEDES LÓPEZ ACUÑA**  
**COORDINADORA DE POSGRADO**  
**E INVESTIGACIÓN, F.C.M.**  
**Presente.-**

Después de haber efectuado una revisión minuciosa sobre el trabajo de tesis presentado por la estudiante **Mayra Dolores Martínez Martínez** 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:

CARACTERIZACIÓN MORFODINÁMICA DE PLAYAS DE ARENA, CANTO  
RODADO Y MIXTAS EN BAHÍA TODOS SANTOS, B.C.

Esperando reciba el presente de conformidad, quedo de usted.

Ensenada, B. C., a 16 de enero de 2018

  
DR. JORGE LEDESMA VAZQUEZ  
SINODAL

c.c.p. Expediente

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

**DRA. LUS MERCEDES LÓPEZ ACUÑA**  
**COORDINADORA DE POSGRADO**  
**E INVESTIGACIÓN, F.C.M.**  
**Presente.-**

Después de haber efectuado una revisión minuciosa sobre el trabajo de tesis presentado por la estudiante **Mayra Dolores Martínez Martínez** 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:

CARACTERIZACIÓN MORFODINÁMICA DE PLAYAS DE ARENA, CANTO  
RODADO Y MIXTAS EN BAHÍA TODOS SANTOS, B.C.

Esperando reciba el presente de conformidad, quedo de usted.

Ensenada, B. C., a 16 de enero de 2018

  
M.C. RIGOBERTO GUARDADO FRANCE  
SINODAL

c.c.p. Expediente

## DEDICATORIA

A mis padres **Guillermina Martínez** y **Sebastián Martínez**, porque a ustedes les debo todo lo que soy y aunque no siempre entienden lo hago siempre han estado allí para mí. Gracias padres, porque sin ustedes yo no estaría aquí, los amo con todo mi corazón.

A mi hermana **Saira Martínez** por estar siempre a mi lado, por ser mi escape en esos momentos de desesperación y ser mi apoyo en aquellos en los que me sentí caer. Las personas crecemos y aunque no nos guste, en la vida siempre habrá cambios, pero a pesar de todo y aun cuando el proceso de adaptación sea difícil, sé que siempre estarás allí para mí como yo para ti. Te amo y gracias por darme el mejor regalo que he recibido hasta ahora.

A mi sobrinita **Itzayana Martínez** desde que supe que estabas en camino cambiaste mi vida y no puedo expresar lo bello que fue para mí el tenerte en mis brazos cuando naciste y lo difícil que fue el estar lejos de ti. Esto es lo que soy y este trabajo es la causa de no haber podido estar contigo todo el tiempo que me hubiera gustado, sin embargo, no fue tiempo perdido y espero que cuando tengas edad suficiente leas esto y sepas que eres la luz de mi vida y que me motivaste en cada paso que di para lograrlo, te amo.

## AGRADECIMIENTOS

Primero que nada quiero agradecer a **mi familia**, por ser los pilares de mi vida y darme la fortaleza para seguir a delante cada día.

A **Rene Arteaga Martínez** por apoyarme a lo largo de todo este tiempo, con altas y bajas siempre estuviste allí para cualquier cosa que necesité y aun cuando al final las cosas se pusieron difíciles no me dejaste caer. Espero que nuestros caminos sigan juntos.

Gracias a mi directora de tesis el **Dra. Amaia Ruiz de Alegria Arzaburu** por aceptarme como estudiantes y brindarme su apoyo, consejos y conocimiento necesario para la elaboración de esta tesis. Además de ser tan paciente, entregada y siempre tener la puerta abierta.

Gracias a mis sinodales por haber aceptado guiarme en la realización de este trabajo y por los consejos aportados; **M.C. Rigoberto Guardado France**, **Dr. Jorge Ledesma Vázquez** y al **Dr. Héctor García Nava**.

A todo nuestro equipo de trabajo (recientemente bautizado como MORDICS): **Amaia, Julio, Adrián, Angélica, Carsolio, Gema, Tadashi, Gil y Sandra**, por el trabajo en equipo que logramos, la coordinación y el esfuerzo con el que cada uno contribuye día a día. No solo se compartimos el trabajo, sino momentos maravillosos y experiencias gratificantes.

A **Julio López Castillejos** porque todos se pudieron dar cuenta que no hubo día que te dejara en paz. Además de ser un compañero y gran amigo, fuiste

un gran apoyo no solo en cuestiones personales sino también en la realización de este trabajo. Sin ti me hubiera vuelto loca (aunque creo te volví loco a ti).

A mis grandes amigos **Nadia, Eli, Deise, Flor, Rocío, Camila y Oswaldo** por brindarme su amistad incondicional y dejarme experiencias muy valiosas. Cada uno de ustedes represento un escape de los momentos de estrés y un apoyo en los momentos difíciles. Los quiero a todos.

Al Dr. **Adán Mejía** gracias por tu apoyo, confianza y paciencia. Me abriste las puertas de tu cubículo en un momento de necesidad y me dejaste quedarme hasta concluir este trabajo. No tengo palabras para agradecerte el apoyo brindado.

Al Dr. **Walter Daesslé** gracias por el apoyo brindado y prestar el equipo cuando tuve que analizar mis muestras de sedimento. Siempre fuiste muy paciente y accesible, aun cuando se presentaron varios inconvenientes.

A CONACyT por proporcionar la beca y los fondos necesarios para el estudio de esta maestría y la realización del proyecto.

Así como al proyecto interno #636, 2015–2016 UABC 18ª Convocatoria Interna: Impacto de Tormentas en las Playas de Ensenada (IMTENS).

A cada persona que contribuyo con un granito de arena no solo en este trabajo sino también en mi formación académica y personal. Que no son menos importantes si no que por mi falta de memoria y espacio no aparecen aquí, les agradezco por brindarme su apoyo a lo largo de mi formación.

# INDICE

Página

<b>RESUMEN</b> .....	<b>I</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>VII</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>XII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>XVII</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. CONCEPTOS BÁSICOS .....	1
1.1.1. ZONA COSTERA Y PLAYA .....	1
1.1.2. MORFODINÁMICA DE PLAYAS .....	2
1.1.3. CLASIFICACIÓN DE PLAYAS .....	3
1.1.3.1.- Clasificación por disipación de energía .....	4
1.1.3.1.1.- <i>Playas disipativas</i> .....	4
1.1.3.1.2.- <i>Playas intermedias</i> .....	4
1.1.3.1.3.- <i>Playas reflejantes</i> .....	5
1.1.3.2.- Clasificación por composición .....	6
1.3.2.1.- <i>Playas de grava</i> .....	7
1.3.2.2.- <i>Playas mixtas de arena y grava</i> .....	7
1.3.2.3.- <i>Playas de grava compuesta</i> .....	8
1.2. ANTECEDENTES .....	9
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>14</b>
2.1. GENERAL .....	14
2.2. ESPECÍFICOS .....	14
<b>3. AREA DE ESTUDIO</b> .....	<b>15</b>
3.1. SAN MIGUEL (SM) .....	15
3.2. STACKS (STX) .....	17
3.3. GRANADA COVE (GC) .....	18
3.4. PLAYA HERMOSA (PH) .....	18
<b>4. METODOLOGÍA</b> .....	<b>20</b>
4.1. MEDICIONES DE OLEAJE .....	20
4.2. MEDICIONES SEDIMENTOLÓGICAS .....	21
4.3. MEDICIONES MORFOLÓGICAS .....	24
4.4. PROCESAMIENTO DE MEDICIONES MORFOLÓGICAS .....	25
4.5. CÁLCULO DE VOLÚMENES .....	28

<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>30</b>
5.1. CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE .....	30
5.2. CARACTERIZACIÓN SEDIMENTOLÓGICA.....	33
5.2.1. Playa de canto rodado .....	34
5.2.2. Playa de guijarro .....	34
5.2.3. Playa mixta.....	35
5.2.4. Playa de arena .....	37
5.3. EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA DE PERFILES.....	39
5.3.1. Playa de canto rodado .....	39
5.3.2. Playa de guijarro .....	43
5.3.3. Playa mixta.....	46
5.3.4. Playa de arena .....	49
5.4. EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA DE LOS MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN (MDE).....	53
5.4.1. PLAYA DE CANTO RODADO .....	53
5.4.2. PLAYA DE GUIJARRO .....	56
5.4.3. PLAYA MIXTA.....	59
5.4.4. PLAYA DE ARENA .....	62
5.5. VARIABILIDAD VOLUMÉTRICA .....	65
5.5.1. PLAYA DE CANTO RODADO .....	65
5.5.2. PLAYA DE GUIJARRO .....	66
5.5.3. PLAYA MIXTA.....	67
5.5.4. PLAYA DE ARENA .....	68
<b>6. DISCUSIÓN .....</b>	<b>70</b>
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>80</b>
<b>8. REFERENCIAS.....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>90</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Página
<b>Figura 1.</b> Representación esquemática del perfil de playa, con sus límites y rasgos morfológicos. Se muestra su zonación en función de la profundidad (arriba), en función del nivel de marea (mitad) y en función del oleaje (abajo), (adaptado del Shore Protection Manual de 1984, en Pedrozo-Acuña, 2011) .....	1
<b>Figura 2</b> Esquema de los componentes geológicos, morfológicos e hidrodinámicos que conforman el modelo morfodinámico costero (modificado de Short, 1999). .....	2
<b>Figura 3</b> Modelo morfológico de perfil de playa. La morfología del perfil depende de la velocidad de caída adimensional, $\Omega$ , y del rango relativo de marea, TR (Masselink y Short, 1993). .....	6
<b>Figura 4</b> Representación esquemática de los tres tipos de playas de grava, en corte transversal: a) Playa de grava, b) Playa MSG, c) Playa compuesta y d) Playa de arena (modificado de Jennings y Shulmeister, 2002). .....	9
<b>Figura 5</b> Localización de la zona de estudio dentro de la Bahía Todos Santos. De lado izquierdo se realiza una localización general de la BTS (imagen modificada de Google earth 2018), mientras que del lado derecho se señalan las distintas playas de estudio ( recuadros) dentro de BTS, los puntos de salida del modelo de oleaje SWAN (círculos) y la ubicación del perfilador acústico (estrella) .....	15
<b>Figura 6</b> Playa San Miguel: zona norte de la playa frente a las casas (foto superior) y zona sur frente al estacionamiento (foto inferior), tomadas durante bajamar en diciembre 2015. ....	16
<b>Figura 7.</b> Playa Stacks en agosto 2015 (foto superior) y febrero 2016 (foto inferior) durante bajamar. ....	17
<b>Figura 8</b> Playa de Granada Cove durante marea baja tomada desde el extremo sur en enero 2016. ....	18
<b>Figura 9</b> Playa Hermosa durante marea baja, tomada desde el extremo norte en abril 2017. ....	19
<b>Figura 10.</b> Serie de tiempo de parámetros de oleaje medidos con el ADCP tipo AWAC a 20 m de profundidad (rojo) y modelados a partir de datos del modelo WW3 a cinco metros de profundidad (azul): altura significativa ( $H_s$ ), periodo asociado al pico espectral ( $T_p$ ) y dirección incidente (Dir). .....	20
<b>Figura 11.</b> Cuadrante para caracterizar el sedimento de playas de cantos rodados. ....	23
<b>Figura 12.</b> Variabilidad del $D_{50}$ (mm) a lo largo de PH y a través del tiempo (de agosto 2015 a agosto 2016). El 0 m representa el límite norte (cerca del Puerto de Ensenada) y 2,867 m el extremo sur. ....	23
<b>Figura 13.</b> Levantamiento topográfico por medio de dGPS diferencial: (a) de forma continua con el dGPS montado sobre un eje móvil en la playa	

arenosa (Playa Hermosa); y (b) de forma puntual en la playa de canto rodado (Granada Cove). .....	24
<b>Figura 14.</b> Levantamiento batimétrico usando ADCP y dGPS montados en el 'hydroboard' y arrastrados a un costado de la embarcación. ....	25
<b>Figura 15.</b> Procesamiento de datos topo-batimétricos. (a) Sincronización de los datos del GPS diferencial (azul), los de la ecosonda (rojo) y la profundidad corregida (verde); (b) Vista en planta de los transectos batimétricos crudos (en negro), los datos a eliminar (en verde); (c) Limpieza de un perfil topográfico; y (d) ejemplo de la matriz de perfiles topo-batimétricos (TB) para todo el periodo de estudio para la playa Stacks. ....	26
<b>Figura 16.</b> Evolución del perfil topo-batimétrico TB1 de la playa de arena (PH), elevación referenciada al NBMI. La línea negra discontinua representa el primer mes de muestreo (Ago15), la línea azul continua representa el mes de febrero mientras que la línea roja continúa el mes de abril. En líneas grises se muestran el resto de los meses.....	27
<b>Figure 17.</b> Ejemplo de un MDE en playa STX;(a) diferencias parciales (DP) entre los meses de agosto 2015 y octubre 2016. (b) diferencias acumuladas (DPA) entre agosto 2015 y agosto 2016.Las líneas negras muestran los perfiles TB medidos. ....	28
<b>Figura 18.</b> Ejemplo del cálculo del área del perfil TB3 de STX para diciembre 2015.....	29
<b>Figura 19.</b> Diferencia en la serie de tiempo de parámetros de oleaje medidos con el AWAC a 20 m de profundidad (rojo) y modelados a partir de datos del modelo WW3 (azul): altura significativa ( $H_s$ ), periodo asociado al pico espectral ( $T_p$ ) y dirección incidente (Dir). Se representa la diferencia entre ambas series de tiempo se representa en verde. ....	30
<b>Figura 20.</b> Serie de tiempo de los parámetros de oleaje obtenidos en el modelo SWAN para cada playa. De arriba hacia abajo: altura significativa ( $H_s$ ), periodo asociado al pico espectral ( $T_p$ ), dirección incidente (Dir) y la potencia del oleaje (Pot) para las playas de: de canto rodado (SM) en azul, playa mixta (STX) en rojo, playa de guijarros (GC) en verde y playa de arena (PH) en negro.....	31
<b>Figura 21.</b> Serie de tiempo del promedio mensual de la potencia del oleaje de agosto 2015 a agosto 2016 para las diferentes playas de estudio: SM (azul discontinua), GC (verde continua), STX (roja discontinua) y PH (negro continua). ....	33
<b>Figura 22.</b> Distribución del $D_{50}$ para la zona supramareal (izquierdo) e intermareal (derecha) en playa San Miguel. Distancia longitudinal (eje x; 0 m extremo norte y 350 m el sur) y tiempo (eje y; meses muestreados). La escala de colores representa el $D_{50}$ en mm. Los recuadros en blanco son ausencia de datos. ....	34
<b>Figura 23.</b> Distribución del $D_{50}$ para la zona supramareal (izquierdo) e intermareal (derecha) en playa Granada Cove. Distancia longitudinal (eje x; 0 m extremo norte y 200 m extremo sur) y tiempo (eje y; fechas de muestreo). La escala de colores representa el $D_{50}$ en mm, y los recuadros blancos ausencia de datos. ....	35

<b>Figura 24.</b> Variabilidad espacio-temporal del $D_{50}$ para la zona supramareal (panel superior izquierdo), intermareal (panel superior derecho) y submareal (panel inferior) en playa Stacks. Distancia longitudinal (eje x; 0 m extremo norte y 200 m extremo sur) y tiempo (eje y; fechas de muestreo). La barra de colores representa el $D_{50}$ en mm, y los recuadros en blanco son ausencia de datos.....	36
<b>Figura 25.</b> Variabilidad espacio-temporal del $D_{50}$ para la zona supramareal (panel superior izquierdo), intermareal (panel superior derecho) y submareal (panel inferior izquierdo) en Playa Hermosa. Distancia longitudinal (eje x; 0 m extremo norte y 2,867 m extremo sur) y tiempo (eje y; fechas de muestreo). La barra de colores representa el $D_{50}$ en mm, y los recuadros en blanco son falta de datos. ....	38
<b>Figura 26.</b> Distribución longitudinal del promedio anual (de agosto 2015 a agosto 2016) de la media del tamaño de grano (mm) para las diferentes zonas de la playa para: (a) de canto rodado (SM); (b) de guijarro (GC); (c) mixta (STX); y (d) de arena (PH).....	39
<b>Figura 27.</b> Evolución temporal del perfil TB01 (norte) para la playa de San Miguel, de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015), y las líneas azules y rojas muestran los perfiles de las estaciones pasadas y próximas, respectivamente. Con las líneas grises se muestran el resto de los meses. ....	41
<b>Figura 28.</b> Evolución temporal del perfil TB06 (sur) para la playa de San Miguel de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015), y las líneas azules y rojas muestran los perfiles de las estaciones pasadas y próximas, respectivamente. Con las líneas grises se muestran el resto de los meses.....	42
<b>Figura 29.</b> Evolución temporal del perfil TB03 (norte) de Granada Cove de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015), y las líneas azules y rojas muestran los perfiles de las estaciones pasadas y próximas, respectivamente. Con las líneas grises se muestran el resto de los meses. ....	44
<b>Figura 30.</b> Evolución temporal del perfil TB09 (sur) de Granada Cove de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015), y las líneas azules y rojas muestran los perfiles de las estaciones pasadas y próximas, respectivamente. Con las líneas grises se muestran el resto de los meses. ....	45
<b>Figura 31.</b> Evolución temporal del perfil TB01 (norte) de Stacks de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015), y las líneas azules y rojas muestran los perfiles de las estaciones pasadas y próximas, respectivamente. Con las líneas grises se muestran el resto de los meses.....	47
<b>Figura 32.</b> Evolución temporal del perfil TB10 (sur) de Stacks de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015), y las líneas azules y rojas muestran los perfiles de las estaciones pasadas y próximas, respectivamente. Con las líneas grises se muestran el resto de los meses.....	48

<b>Figura 33.</b> Evolución temporal del perfil TB01 (norte) de Playa Hermosa de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015), y las líneas azules y rojas muestran los perfiles de las estaciones pasadas y próximas, respectivamente. Con las líneas grises se muestran el resto de los meses. ....	50
<b>Figura 34.</b> Evolución temporal del perfil TB30 (sur) para Playa Hermosa de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015), y las líneas azules y rojas muestran los perfiles de las estaciones pasadas y próximas, respectivamente. Con las líneas grises se muestran el resto de los meses. ....	52
<b>Figura 35.</b> Diferencias Parciales (DP) para la playa de San Miguel (SM) de agosto 2015 a agosto 2016. La primera subfigura (esquina superior izquierda) muestra la ubicación de los perfiles topo-batimétricos medidos. Todas las figuras muestran las isóbatas de 0 y 2.3 m para mostrar la zona intermareal. La barra de colores muestra las diferencias de elevación en metros. ....	54
<b>Figura 36.</b> Diferencias Parciales Acumuladas (DPA) para San Miguel (SM) de agosto 2015 a agosto 2016. La primera subfigura (esquina superior izquierda) muestra la ubicación de los perfiles topo-batimétricos medidos. Todas las figuras muestran las isóbatas de 0 y 2.3 m (intermareal) y -4 m (submareal cercana) y -8 m (submareal lejana). La barra de colores muestra las diferencias de elevación en metros. ....	55
<b>Figura 37.</b> Diferencias Parciales (DP) para Granada Cove (GC) de agosto 2015 a agosto 2016. La primera subfigura (esquina superior izquierda) muestra la ubicación de los perfiles topo-batimétricos medidos. Las isóbatas de 0 y 2.3 m muestran la zona intermareal y la de -4 m la submareal cercana. La barra de colores muestra las diferencias de elevación en metros. ....	57
<b>Figura 38.</b> Diferencias Parciales Acumuladas (DPA) para Granada Cove (GC) de agosto 2015 a agosto 2016. La primera subfigura (esquina superior izquierda) muestra la ubicación de los perfiles topo-batimétricos medidos. Las isóbatas de 0 y 2.3 m muestran la zona intermareal y la de -4 m la submareal cercana. La barra de colores muestra las diferencias de elevación en metros. ....	58
<b>Figura 39.</b> Diferencias Parciales (DP) para Stacks (STX) de agosto 2015 a agosto 2016. La primera subfigura (esquina superior izquierda) muestra la ubicación de los perfiles topo-batimétricos medidos. Las isóbatas de 0 y 2.3 m muestran la zona intermareal y la de -4 m la submareal cercana. La barra de colores muestra las diferencias de elevación en metros. ....	60
<b>Figura 40.</b> Diferencias Parciales Acumuladas (DPA) para Stacks (STX) de agosto 2015 a agosto 2016. La primera subfigura (esquina superior izquierda) muestra la ubicación de los perfiles topo-batimétricos medidos. Las isóbatas de 0 y 2.3 m muestran la zona intermareal y la de -4 m la submareal cercana. La barra de colores muestra las diferencias de elevación en metros. ....	61
<b>Figura 41.</b> Diferencias Parciales (DP) para Playa Hermosa (PH) de agosto 2015 a agosto 2016. La primera subfigura (esquina superior	

izquierda) muestra la ubicación de los perfiles topo-batimétricos donde se colectaron muestras de sedimento (TB01, TB05, TB10, TB14, TB19, TB23, TB27 y TB30). Las isóbatas de 0 y 2.3 m muestran la zona intermareal, y la de -2, -4 y -8 m la submareal. La barra de colores muestra las diferencias de elevación en metros.....	63
<b>Figura 42.</b> Diferencias Parciales Acumuladas (DPA) para Playa Hermosa (PH) de agosto 2015 a agosto 2016. La primera subfigura (esquina superior izquierda) muestra la ubicación de los perfiles topo-batimétricos donde se colectaron muestras de sedimento (TB01, TB05, TB10, TB14, TB19, TB23, TB27 y TB30). Las isóbatas de 0 y 2.3 m muestran la zona intermareal, y la de -2, -4 y -8 m la submareal. La barra de colores muestra las diferencias de elevación en metros.....	64
<b>Figura 43.</b> Serie volumétrica temporal ( $m^3m^{-1}$ ) para la playa de San Miguel (SM) de agosto 2015 a agosto 2016. La fila superior presentan los volúmenes totales, la fila central los volúmenes sin promedio y la fila inferior las diferencias volumétricas acumuladas. ....	66
<b>Figura 44.</b> Serie temporal volumétrica (en $m^3m^{-1}$ ) para la playa de Granada Cove (GC) de agosto 2015 a agosto 2016. Los paneles superiores presentan el volumen total, el subaéreo y submareal. La fila superior presentan los volúmenes totales, la fila central los volúmenes sin promedio y la fila inferior las diferencias volumétricas acumuladas. ....	67
<b>Figura 45.</b> Serie temporal volumétrica (en $m^3m^{-1}$ ) para la playa mixta de Stacks (STX) de agosto 2015 a agosto 2016. La fila superior presentan los volúmenes totales, la fila central los volúmenes sin promedio y la fila inferior las diferencias volumétricas acumuladas. ....	68
<b>Figura 46.</b> Serie temporal volumétrica (en $m^3m^{-1}$ ) para la playa arenosa de Playa Hermosa (PH) de agosto 2015 a agosto 2016. La fila superior presentan los volúmenes totales, la fila central los volúmenes sin promedio y la fila inferior las diferencias volumétricas acumuladas. ....	69
<b>Figura 47.</b> Variabilidad morfológica de la playa de guijarro de agosto 2015 a agosto 2016. a) Variabilidad longitudinal de los perfiles de playa de perfil cóncavo en el sur (TB09, en verde) a convexo (TB03, en negro continuo) en febrero 2016; b) evolución de la línea de costa (0 m referido al NBMI); c) evolución volumétrica anual longitudinal de la zona subaérea d) evolución longitudinal de los volúmenes acumulados en la zona SA. Los volúmenes son sin el promedio en $m^3/m$ .....	74
<b>Figura 48.</b> Variabilidad volumétrica subaérea temporal de agosto 2015 a agosto 2016 para las diferentes playas; playa de canto rodado (a); de guijarro (b); mixta (c); y de arena (d). El volumen presentado es sin el promedio anual en $m^3/m$ . ....	76
<b>Figura 49.</b> Evolución temporal de la línea de costa de la playa mixta (0 m, referido al NBMI) de agosto 2015 a agosto 2016. ....	78
<b>Figura 50.</b> Perfil transversal representativo para cada playa de estudio de BTS con su foto: (1) canto rodado (San Miguel); (2) de guijarro (Granada Cove); (3) mixta de arena y guijarros (Stacks); y (4) arenosa (Playa Hermosa).La tabla incluye los valores anuales promedio (agosto 2015- agosto2016)de la potencia del oleaje ( $kWP_{ot}$ ); tamaño de sedimentos en	

la zona supramareal (SPM), intermareal (IM) y submareal (SM); la pendiente de la playa ( $\tan\beta$ ) para la zona subaérea (SA) y submareal (SM); la diferencia en elevación ( $\Delta Z$ ) en metros y la variabilidad volumétrica total ( $\Delta V$ ) para la zona subaérea (SA) y submareal (SM). ..... 79

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
<b>Tabla I.</b> Perfiles en los que se tomaron muestras de arena (✓) y donde se levantaron mediciones con cuadrantes (*). .....	22
<b>Tabla II.</b> Características de las mediciones sedimentológicas realizadas en los diferentes perfiles topo-batimétricos por playa de estudio. ....	24
<b>Tabla III.</b> Principales atributos del oleaje con su promedio estacional (verano: agosto 2015, junio 2016-agosto 2016; otoño: septiembre-noviembre 2015; invierno: diciembre 2015-febrero 2016; primavera: marzo-mayo 2016) y total, por playa. ....	32
<b>Tabla IV.</b> Promedio del $D_{50}$ (mm) para las diferentes playas de estudio (San Miguel, SM; Granada Cove, GC; Stacks, STX; Playa Hermosa, ENS), promedios anuales para las distintas zonas de la playa y el $D_{50}$ promedios para cada playa durante todo el periodo de estudio. ....	71
<b>Tabla V.</b> Variabilidad volumétrica para las distintas playas de estudio. Vol. Tot indica el volumen total de sedimento que presenta la playa en el periodo de estudio; %SM y %SA indica que porcentaje del total de sedimento pertenece a la zona submareal y subaérea respectivamente; Acum indica el volumen acumulado durante el periodo de estudio para la zona submareal (SM), subaérea (SA) y el total de la playa (Tot) y por ultimo $\Delta V$ indica la variabilidad volumetrica que presenta la playa. ....	73

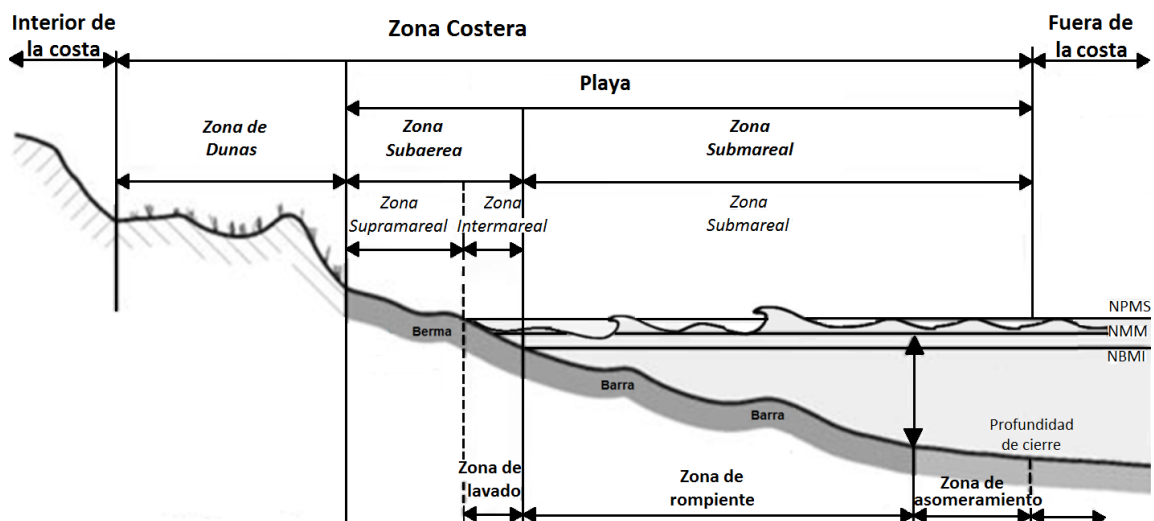
# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. CONCEPTOS BÁSICOS

### 1.1.1. ZONA COSTERA Y PLAYA

La zona costera es la interfaz entre el océano, tierra y atmósfera, y ha sido un tema de gran interés histórico debido a su importancia socio-económica por su creciente desarrollo, además de su alta variabilidad morfológica espacio-temporal (Sénéchal *et al.*, 2015; Ranasinghe *et al.*, 2004). Por ello, y con la finalidad de favorecer una gestión adecuada a futuro, es necesario realizar estudios sobre la evolución morfológica de las costas (Martínez-Ramos, 2013).

Ubicadas en la zona costera, las playas son formaciones que resultan de la acumulación de sedimentos, cuya dinámica está dominada por la acción del oleaje, las mareas y el viento (Ruessink *et al.*, 2014). Éstas se encuentran delimitadas en la zona supramareal por un cambio en la pendiente asociada a la presencia de dunas, cantiles o vegetación, y en la zona submareal por la profundidad de cierre, profundidad a partir de la cual el transporte de sedimento no es significativo (Aagaard *et al.*, 2013) (Fig.1).

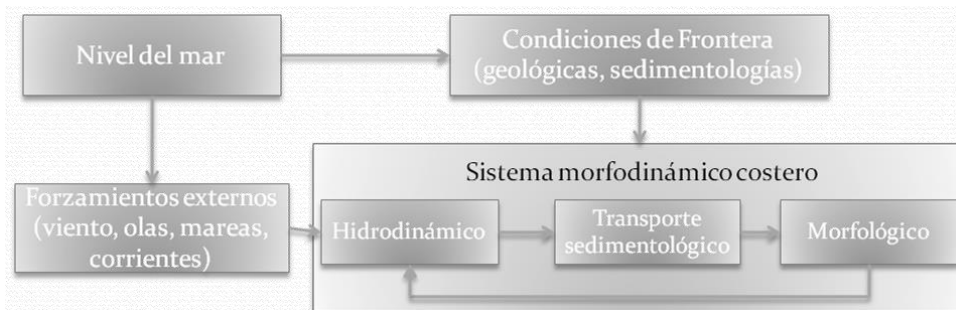


**Figura 1.** Representación esquemática del perfil de playa, con sus límites y rasgos morfológicos. Se muestra su zonación en función de la profundidad (arriba), en función del nivel de marea (mitad) y en función del oleaje (abajo), (adaptado del Shore Protection Manual de 1984, en Pedrozo-Acuña, 2011)

Existen diferentes tipos de playas dependiendo de sus características morfológicas, composición y su respuesta a los forzamientos hidrodinámicos. Las playas se dividen en zonas en función de las características hidrodinámicas incidentes, las cuales varían como resultado conjunto de la acción del oleaje y del nivel de marea instantáneo. En función de las características del oleaje incidente, la playa se divide en: zona de asomeramiento (*shoaling*), zona de rompiente (*surf*) y zona de lavado (*swash*), y en función del nivel de marea se divide en: zona submareal, intermareal y supramareal (Fig.1).

### 1.1.2. MORFODINÁMICA DE PLAYAS

La línea de investigación en morfodinámica costera comenzó a finales de 1960 con una serie de estudios realizados en el Instituto de Estudios Costeros de la Universidad del Estado de Luisiana, EE.UU. Sin embargo, no fue hasta 1977 que se consolidó el término de *morfodinámica costera*, a través de la contribución de Wright y Thom (1977), quienes la definen como una serie de interacciones mutuas entre la dinámica de fluidos y la morfología de la costa, regida por el movimiento de sedimentos (Fig.2).



**Figura 2.** Esquema de los componentes geológicos, morfológicos e hidrodinámicos que conforman el modelo morfodinámico costero (modificado de Short, 1999).

En las décadas de los 70 y 80 la mayor parte de los estudios de morfodinámica costera se desarrollaron en Australia, en los cuales participaron investigadores como Chappell y Eliot (1979), Short (1979) y Wright *et al.* (1979), siendo los dos últimos los más relevantes. A partir de estas investigaciones, surgió *el modelo de*

*playa australiana*, que define diferentes estados morfodinámicos, clasificados de acuerdo con el grado en que la energía del oleaje es disipada o reflejada en la playa. Para ello se utilizó el parámetro de Dean (ec. 1), que relaciona la altura de ola en rompiente ( $H_b$ ) con la velocidad de asentamiento del sedimento ( $w_s$ ) y el periodo de la ola ( $T$ )

$$\Omega = \frac{H_b}{w_s T} \quad (1)$$

Debido a que este método fue desarrollado para playas de arena, no es aplicable para una estimación correcta de los estados morfodinámicos de otros tipos de playas (p.ej., Gómez-Pujol *et al.*, 2007; Jiménez *et al.*, 2008; Lisi *et al.*, 2011; Van de Lageweg *et al.*, 2013). Partiendo del *modelo de playa Australiano* se han desarrollado diferentes clasificaciones para otros ambientes de playa. De las adaptaciones más utilizadas son: el modelo de Hegge *et al.* (1996) el cual se desarrolló para el litoral micromareal protegido del suroeste de Australia Occidental y el modelo de Short (1991), basado en playas macromareal del centro de Queensland (Australia). El modelo de Short (1991) se amplía más tarde por Masselink y Short (1993) para incluir la influencia de las mareas, también por Short y Aagaard (1993) para playas con multi-barras, y más recientemente, por Short (2006), quien agregó tipos de playa geológicamente controladas y de baja energía.

### **1.1.3. CLASIFICACIÓN DE PLAYAS**

Las playas pueden clasificarse en función de su capacidad de disipar la energía incidente del oleaje como: reflejantes, intermedias y disipativas (Short *et al.*, 1984) (Fig.3), o por su composición en: playas de grava pura, playas mixtas: de arena y grava, playas de grava compuesta (Jennings y Shulmeister, 2002) y playas de arena pura (Fig.4).

### 1.1.3.1. Clasificación por disipación de energía

#### 1.1.3.1.1. Playas disipativas ( $\Omega > 6$ )

Como su nombre lo dice, este tipo de playas disipan progresivamente la energía del oleaje a través de su amplia zona de rompiente, misma que presenta poco gradiente. Estas playas están compuestas por arenas finas con  $D_{50} < 0.25$  mm, y suelen tener varias barras submareales, típicamente paralelas a la línea de costa y separadas por canales poco profundos (Short *et al.*, 1984) (Fig.3). Su pendiente es suave y el oleaje rompe en forma de derrame o descrestamiento, el cual está representado por  $\xi_b < 0.4$  en el parámetro de Iribarren (ec. 2, Iribarren *et al.*, 1949):

$$\xi_b = \frac{\tan\beta}{\sqrt{H_b/L_0}}, \quad (2)$$

donde  $H_b$  y  $L_0$  son, la altura de ola en rotura y la longitud de onda en aguas profundas, respectivamente, y  $\tan\beta$  es la pendiente de la playa.

#### 1.1.3.1.2. Playas Intermedias ( $1 > \Omega < 6$ )

Son el tipo de playa más común debido a que incluyen cuatro estados intermedios que poseen elementos tanto de playas disipativas como reflejantes. Estas playas presentan cambios espaciales de mayor magnitud que en las disipativas, la pendiente suele ser más pronunciada y, por tanto, las olas en la zona de rompiente suelen tener una altura de moderada a alta (0.5 a 2.5 m), siendo su tipo de rotura más común en tubo (plunging) con  $\xi_b$  entre 2.5 y 30. Estas playas suelen estar compuestas por arenas finas a medias con  $D_{50}$  de 0.125 a 0.5 mm. Los cuatro estados de playas intermedias se caracterizan en función de la morfología submareal, así, existen los siguientes subtipos de playas intermedias: de barra y canal a lo largo de la costa, de barra y canal rítmica, de barra y rotura transversal y finalmente con terraza de bajamar. Estos estados presentan morfologías muy complejas que se representan en la Fig.3 (Short *et al.*, 1984).

#### 1.1.3.1.3. Playas reflejantes ( $\Omega < 1$ )

Las playas reflejantes se encuentran en el otro extremo de la clasificación morfodinámica (Fig.3). Carecen de una zona de rompiente, y presentan una elevada pendiente de playa, típicamente con  $\tan\beta=0.10-0.15$ , lo que favorece que las olas rompan en forma de colapso (surging) con valores de  $\xi_b > 2$ . Estas playas se componen, al menos parcialmente, de arenas gruesas o gravas ( $D_{50} > 1$  mm), y el frente de playa suele presentar tamaño de grano más grueso que la playa sumergida. Este tipo de playas no suelen exhibir barras submareales, pero usualmente cuentan con un escalón compuesto de material grueso, ubicado cerca de la línea de costa (Buscombe y Masselink, 2006). La profundidad y altura de este escalón se incrementa con la altura de ola y migra con el nivel de la marea (Buscombe y Masselink, 2006). Hacia mar adentro, la pendiente disminuye notablemente, dando al perfil una forma cóncava bien marcada (Short *et al.*, 1984). Las playas reflejantes son a menudo semi-cerradas y típicamente presentan estructuras en forma de cúspides (Dall *et al.*, 2000; Aagaard *et al.*, 2013).

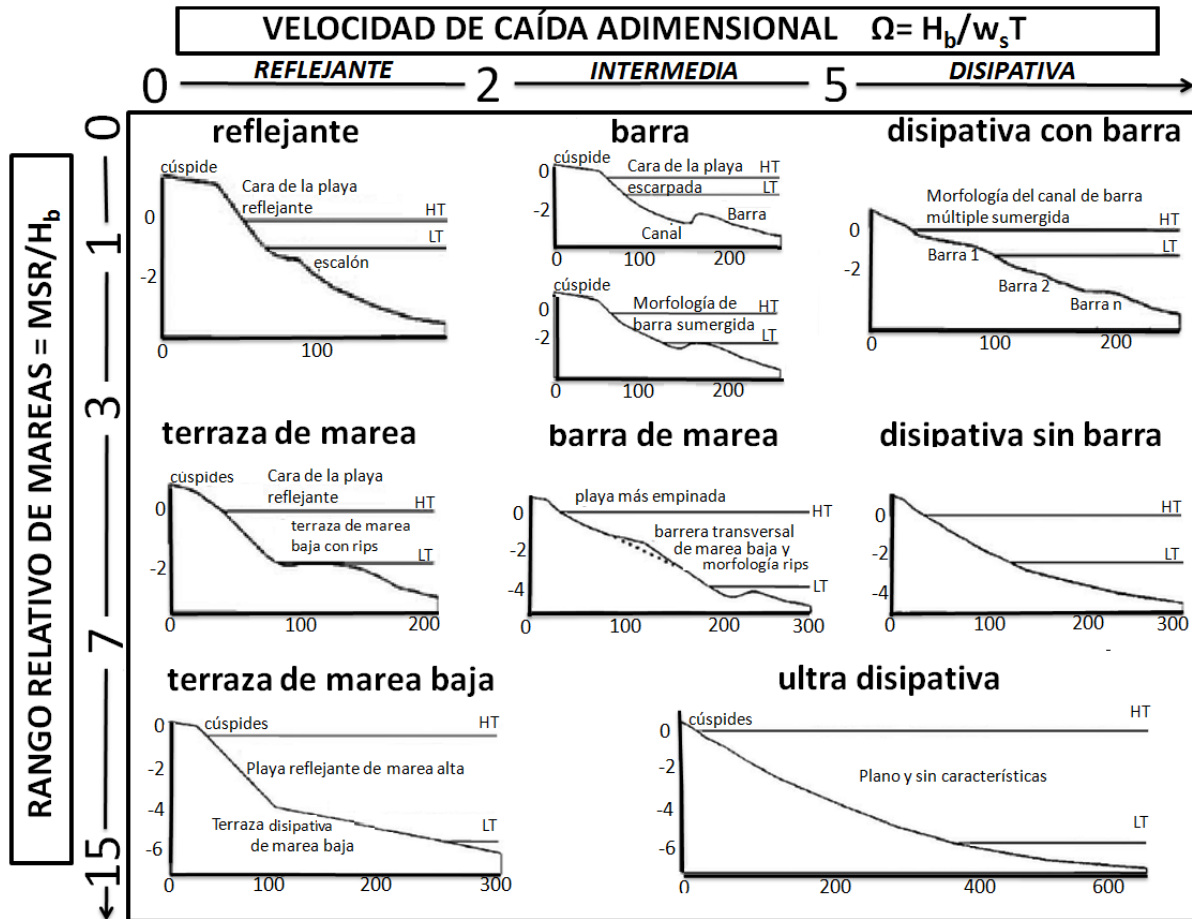


Figura 3. Modelo morfológico de perfil de playa. La morfología del perfil depende de la velocidad de caída adimensional,  $\Omega$ , y del rango relativo de marea, TR (Masselink y Short, 1993).

### 1.1.3.2. Clasificación por composición

Las playas compuestas de grava, canto rodado y mixtas, son menos comunes y menos documentadas que las de arena (Mason y Coates, 2001; Jennings y Shulmeister, 2002; Pontee *et al.*, 2004; Buscombe y Masselink, 2006; López de San Román-Blanco *et al.*, 2006). Estas playas se ubican comúnmente en latitudes medias y altas, asociadas al suministro de sedimentos gruesos. Por ejemplo, existen playas mixtas formadas debido a la erosión de complejos de abanicos aluviales en Canterbury Bight (Nueva Zelanda), zonas costeras anteriormente asociadas con glaciares en Nueva Escocia (Canadá) (Forbes *et al.*, 1991; Shaw *et al.*, 1993; Orford *et al.*, 1996) y en las Islas Británicas, y zonas aledañas a cantiles rocosos (Buscombe y Masselink, 2006).

En 1967 Bluck proporcionó la primera descripción de los rasgos sedimentarios de las playas de grava. Su estudio identificó dos tipos de playas de grava, basándose en su zonificación: el tipo Sker y tipo Newton. El tipo Sker tiene cuatro zonas paralelas a la orilla, fuertemente desarrolladas y es considerada como la forma 'típica'. Sin embargo, en la práctica, el tipo Newton, que muestra sólo dos zonas completamente desarrolladas, es el caso más aplicado. A partir de este trabajo se han realizado varios esfuerzos para refinar esta clasificación. Uno de los más conocidos es el de Jennings y Shulmeister (2002) quienes propusieron una clasificación basada en las diferencias morfodinámicas utilizando el número de Iribarren, el ancho de la playa, el tamaño de grano medio ( $D_{50}$ ), la altura de la ola, el número de bermas y la pendiente del perfil activo.

#### 1.1.3.2.1. Playa de grava

Estas playas presentan un perfil altamente reflejante y están conformadas por grava con un tamaño promedio de grano de  $D_{50}=2-64$  mm (gravas a guijas) bien clasificado (Bluck, 1967; Carter y Orford, 1993). Son playas angostas (18-50 m de anchura) que suelen presentar cúspides en la zona subaérea y una zona de surf ausente, lo que se asocia a oleaje en surgimiento (Sherman *et al.*, 1993) con un  $\xi_b=1.6-4.0$ . Estas playas mantienen altas pendientes ( $\tan\beta=0.1-0.25$ ) debido a la alta permeabilidad de la grava (Quick y Dyksterhuis, 1994). En condiciones de tormenta, suelen presentar erosión de alta magnitud, pero de la misma manera, suelen tener alta capacidad de recuperación (Sherman, 1991; Ruiz de Alegria-Arzaburu y Masselink, 2010) (Fig.4a).

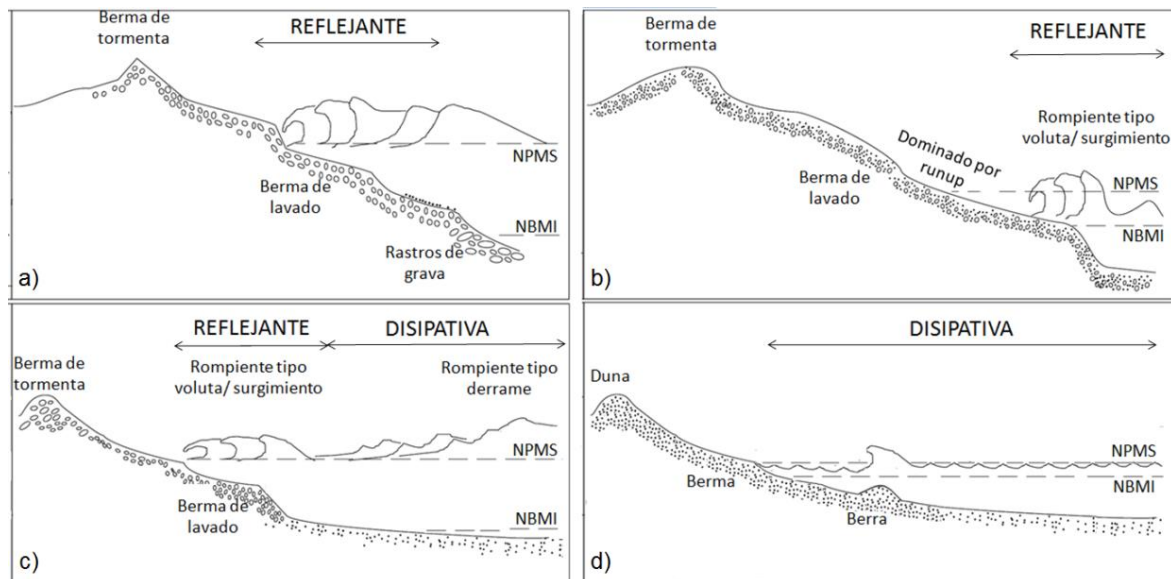
#### 1.1.3.2.2. Playas mixtas de arena y grava (MSG)

La playa MSG está compuesta por sedimentos mezclados de arena y grava, tanto en la sección submareal como a mayor profundidad (Kirk, 1980). El tamaño medio de grano se encuentra entre la arena gruesa y las guijas, con un  $D_{50}=1-64$  mm. De las playas de sedimento grueso, estas son las más extensas

(30-80 m de ancho de playa), con pendientes muy variables dependiendo del nivel del perfil de playa,  $\tan\beta$  de 0.04–0.12 asociado a un oleaje de hundimiento/desplome ( $\xi_b=0.7–1.95$ ). Presentan un único punto de ruptura sobre un escalón bien formado y estable (Kirk, 1980). Exhiben una morfología altamente desarrollada con hasta tres niveles verticales compuestos por cúspides en la superficie de la playa (Nolan, 1993) (Fig.4b).

#### 1.1.3.2.3. Playa de grava compuesta

Esta playa es similar a las playas mixtas (Carter y Orford, 1993), sin embargo, presenta diferencias mínimas. Por ejemplo, son más angostas (<20–60 m) y los componentes de arena y grava no se encuentran mezclados. Por ello, la playa se divide en dos zonas. La primera zona se encuentra principalmente sumergida, dominada por arenas y con una pendiente más suave ( $\tan\beta=0.03–0.1$ ), por tanto, el oleaje es de derrame y presenta una zona de surf disipativa durante la bajamar, favoreciendo el desarrollo de un sistema de barra-canal a lo largo de la costa. La segunda zona (componente terrestre) está compuesta de grava, tiene una mayor pendiente ( $\tan\beta=0.1–0.15$ ) y es reflejante durante la pleamar (Mason *et al.*, 1997). Estas playas suelen presentar bermas y bermas de la tormenta, estas últimas pueden favorecer el movimiento hacia el mar del componente de grava, induciendo la formación de una barra de punto de rotura (Fig.4c) (Orford, 1977).



**Figura 4.** Representación esquemática de los tres tipos de playas de grava, en corte transversal: a) Playa de grava, b) Playa MSG, c) Playa compuesta y d) Playa de arena (modificado de Jennings y Shulmeister, 2002).

## 1.2. ANTECEDENTES

La comprensión de la morfodinámica costera contemporánea y a largo plazo, es particularmente importante para prevenir problemas asociados al desequilibrio del transporte de sedimentos, por la expansión del desarrollo costero (Backstrom *et al.*, 2009). A partir del trabajo de Wright y Short (1983) realizado mediante observaciones en diferentes playas australianas, las playas han sido estudiadas a través de modelos morfodinámicos (Wright y Short, 1984; Wright *et al.*, 1987; Hegge *et al.*, 1996; Short, 1991; Masselink y Short, 1993; Short y Aagaard, 1993; Short, 2006; Aagaard *et al.*, 2016). Sin embargo, la metodología de los modelos morfodinámicos fue únicamente pensada para playas de arena, y en la actualidad existe un sesgo importante de información para las playas no arenosas, es decir, para las de guijarro, mixtas y de canto rodado (Felton, 2002; Noormets *et al.*, 2004).

Oak (1985) realizó uno de los primeros estudios de las playas compuestas por sedimentos grueso (>256 mm), llegando a la conclusión de que su morfología y dinámica es muy diferente de las playas arenosas. Jennings y Shulmeister (2002)

estudiaron la morfodinámica de las playas de grava, mixtas y compuestas, y concluyeron que el comportamiento difiere del de las playas arenosas. A partir de estos estudios se ha presentado un mayor interés por estudiar las playas no arenosas (e.g. Grottoli; Job, 1993; Chadwick *et al.*, 2005; Buscombe, 2008; Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2008; Ruiz de Alegria-Arzaburu y Masselink, 2010). Sin embargo, debido a que en las playas no arenosas los cambios morfológicos más relevantes ocurren comúnmente en condiciones de tormentas (Oak, 1981), la mayor parte de los estudios se basaron en el rastreo de clastos después de eventos de tormenta (Oak, 1985; Osborne, 2005; Etienne y Paris, 2010; Chen *et al.*, 2011; Paris, 2011; Goto *et al.*, 2011; Pérez-Alberti *et al.*, 2012 y 2015; Stark y Hay, 2016).

La evolución morfológica de una playa se caracteriza tanto por cambios transversales como longitudinales a la costa. Estas variaciones morfológicas están controladas, por un lado, por forzamientos hidrodinámicos como el oleaje, las mareas y sus corrientes asociadas, y por otro lado, por su pendiente y las propiedades del sedimento que las componen. Los cambios morfológicos a lo largo de la playa se pueden ver reflejados por eventos de rotación de playa (e.g. Ojeda y Guillén, 2008) y también por el desarrollo de rasgos morfológicos rítmicos como las cúspides (e.g. Almar *et al.*, 2008). Sin embargo, los cambios morfológicos perpendiculares a la playa suelen estar mayormente asociados a cambios en la forma del perfil transversal, lo cual puede dar lugar a la presencia de escarpes asociados a la desaparición de la berma, y a la formación de un sistema barra-canal submareal (Karunarathna *et al.*, 2012).

La composición y distribución del sedimento en la playa juega un papel importante en su respuesta morfodinámica, por tanto, cada tipo de playa va a tener una respuesta diferente (Pontee *et al.*, 2004). Aún y cuando las playas están compuestas por el mismo rango de tamaño de sedimento (según la escala de grano Udden-Wentworth, Wentworth, 1935) pueden presentar variaciones morfológicas diferentes (Short *et al.*, 1984; Jennings y Shulmeister, 2002; Aagaard

*et al.*, 2013). Esto es principalmente debido a las características geológicas y morfológicas propias de cada sitio, y a su interacción con los diferentes sedimentos (Carter., 1988; Gallaway *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2011; Pérez-Alberti, 2012, Grottoli *et al.*, 2017). Las playas de arena generalmente presentan una playa subaérea extensa con pendientes suaves y zonas de surf y swash amplias y relativamente poco profundas. Por otro lado, Jennings y Shulmeister (2002) y Carter y Orford (1993) encontraron que las playas compuestas de arena y grava presentan una zona de swash abrupta y escarpada, dando lugar a un transporte de sedimento muy diferente que el que se da en las playas arenosas. Karunarathna *et al.*, (2016) encuentran que las playas mixtas presentan una zona supramareal más activa. Mientras que en las playas de arena el intercambio de sedimentos se produce principalmente entre la zona intermareal y la submareal, encontrando una zona intermareal más activa. Esta dinámica es una de las principales razones de la variación en la respuesta morfológica de la costa, las cuales suelen pasar de un perfil cóncavo con una sola berma o a uno convexo con bermas múltiples (Berguillo, 2016).

Las playas mixtas presentan un perfil de recuperación amplio y bien desarrollado, con mayor pendiente, y un perfil de tormenta escarpado con la presencia de un escalón, después del cual se da un perfil casi plano (Roberts *et al.*, 2013; Jennings y Shulmeister, 2002). Por el contrario, las playas de arena suelen presentar un ciclo de recuperación-erosión, a través del sistema barracanal. Así, la playa arenosa suele presentar una berma en la zona supramareal en el perfil de verano, y una barra en la zona submareal en el perfil de invierno que puede migrar por la zona intermareal durante los periodos transitorios (e.g. Masselink *et al.*, 2006; Ranasinghe *et al.*, 2004; Ruessink *et al.*, 2014; Sénéchal *et al.*, 2015; Walstra *et al.*, 2016).

En función de los procesos que generan la morfodinámica en las playas, las cantidades de sedimento transportadas serán diferentes. En playas de grava se han reportado cambios verticales de  $\pm 1$  m (Austin y Masselink, 2006; Ruiz de

Alegria-Arzaburu y Gerhard Masselink, 2010) con una variabilidad volumétrica de  $\pm 100 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ , (Scott *et al.*, 2016) y de  $\pm 15 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  en la playa subaérea, resultando en un transporte neto de  $\pm 30 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  (Ruiz de Alegria-Arzaburu y Gerhard Masselink, 2010). En playas mixtas se han reportado cambios volumétricos de 27–51  $\text{m}^3\text{m}^{-1}$  durante condiciones de calma, y de 41–73  $\text{m}^3\text{m}^{-1}$  en condiciones de tormenta (Berguillos *et al.*, 2016). Por otro lado, Roberts *et al.* (2013) reportaron cambios volumétricos de  $\pm 45 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  en una playa mixta incluyendo varios eventos de tormenta. Por último, las playas arenosas han registrado variaciones volumétricas de  $\pm 200 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  en una playa macromareal de Inglaterra (Scott *et al.*, 2016), y de  $\pm 52 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  en Playa Hermosa (Baja California) (Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2017) con cambios morfológicos verticales de  $\pm 1.5 \text{ m}$  (Vidal-Ruiz, 2015; Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2017). Sin embargo, durante inviernos intensos asociados a eventos de El Niño (1997-1998; 2009-2010 y 2015-2016) se han reportado erosiones severas, con incluso mayores cambios morfológicos en la playa subaérea de playas del Pacífico de Estados Unidos (Barnard *et al.*, 2011; Doria *et al.*, 2016) impidiendo la rápida recuperación de las mismas (Doria *et al.*, 2016; Ruiz de Alegria-Arzaburu y Vidal-Ruiz, en revisión). Por otro lado, Scott *et al.*, (2016) indican que la recuperación posterior a la tormenta en las playas macromareales de Inglaterra no ocurre durante períodos de calma, sino durante eventos de oleaje largo y de mayor energía.

Aunque existan diferencias geográficas y las playas puedan estar influenciadas por procesos geológicos y oceanográficos específicos de cada región, cada estudio individual ayuda en la comprensión general de la morfodinámica de las playas (Dean, 1977; Bodge, 1992; Inman *et al.*, 1993; Larson y Kraus, 1994; Larson *et al.*, 1999; Ruggiero *et al.*, 2005). La mayoría de los estudios morfodinámicos en playas han sido desarrollados en las costas de Australia y del Reino Unido, y los estudios morfodinámicos comparativos concurrentes para playas con diferentes características sedimentarias son escasos. Además, la mayoría de los estudios existentes se centran principalmente en la zona intermareal y supramareal (Carter y Orford, 1993; Jennings y Shulmeister, 2002;

Neal, *et al.*, 2002; Scott, *et al.*, 2011; Aagaard, *et al.*, 2013), y dejan de lado los cambios morfológicos que ocurren en la sección submareal. Aagaard *et al.*, (2013) compararon la morfodinámica de playas formadas por diferentes tipos de sedimentos, desde arenas hasta gravas, encuentran patrones de transporte de sedimentos estrechamente asociados a los estados morfodinámicos de las playas, y mencionan que la velocidad máxima de transporte de sedimentos es más alta para playas intermedias que para disipativas y reflejantes. Más tarde Scott *et al.*, (2016) encuentran patrones de transporte que apoyan lo propuesto por Aagaard *et al.*, (2013) en un estudio que compara playas de arena y grava en la costa atlántica de Europa. Mencionan que las playas arenosas son dominadas por procesos de transporte transversales, mientras que en las playas de grava los procesos longitudinales son importantes y se dan eventos de rotación. Karunarathna, *et al.*, (2012, 2016) investigaron las diferencias morfológicas entre playas arenosas y compuestas expuestas a condiciones de oleaje diferentes, encontrando un mayor intercambio de sedimentos entre la sección submareal e intermareal en playas arenosas, y entre la supramareal e intermareal en las mixtas.

Por las razones expuestas, surge la necesidad de comparar de forma concurrente el cambio morfológico de playas con características sedimentarias diferentes. Así, el objetivo de este trabajo es estudiar las diferencias morfológicas de cuatro playas ubicadas dentro de Bahía Todos Santos (Baja California) en un ambiente mesomareal y expuestas a condiciones de oleaje similares. Se estudiarán los cambios morfológicos y variabilidad volumétrica de tanto la zona subaérea (supramareal e intermareal) como la submareal, de playas compuestas por diferentes tipos de sedimentos; arenosas, mixtas (arena y guijarro), de guijarros y canto rodado. Se espera que este trabajo contribuya a la mejor comprensión de la morfodinámica de diferentes tipos de playas en un mismo ambiente mareal y bajo condiciones de oleaje incidente similares.

## **2. OBJETIVOS**

---

### **2.1. GENERAL**

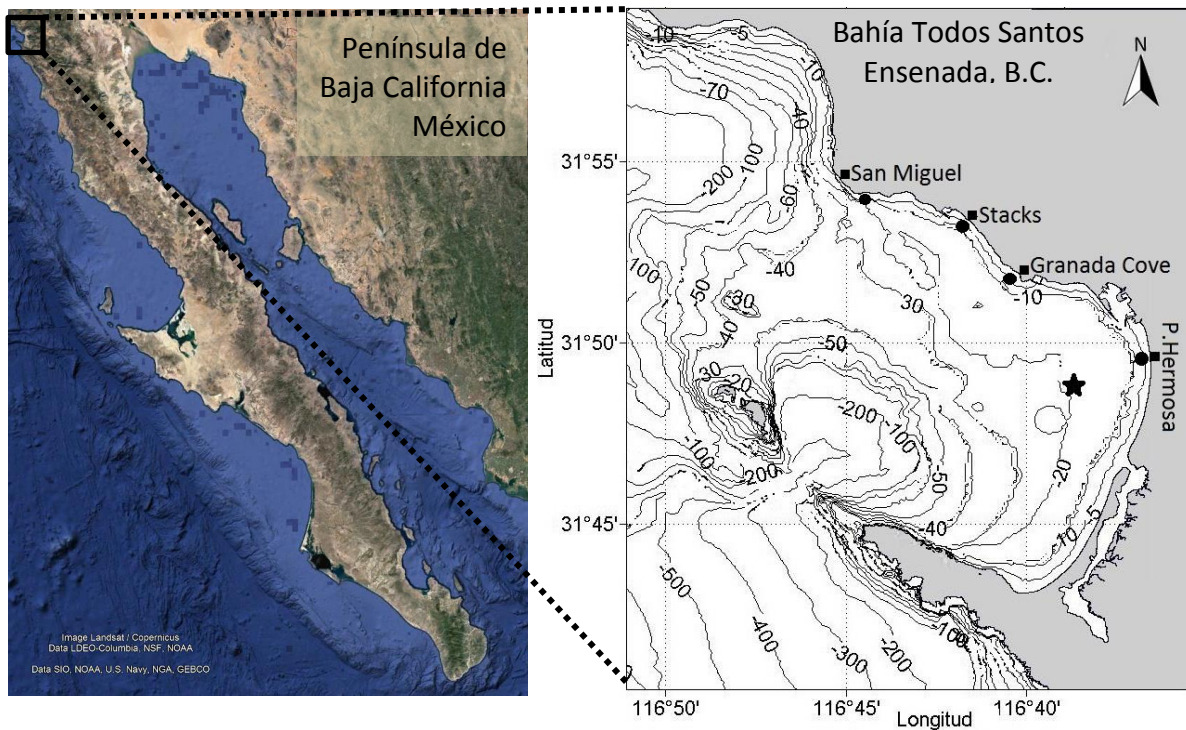
Realizar una caracterización morfodinámica y sedimentológica estacional de cuatro playas Bahía Todos los Santos, compuestas por sedimentos de canto rodado, guijarro, arenas y mixtas.

### **2.2. ESPECÍFICOS**

- Clasificar las diferentes playas de estudio de acuerdo a sus características sedimentológicas y morfodinámicas.
- Determinar la variabilidad morfológica, volumétrica y sedimentológica estacional de las distintas playas.
- Caracterizar las condiciones de oleaje incidente durante el periodo de estudio para cada playa de interés.
- Elaborar un modelo conceptual que explique la variabilidad morfológica y sedimentológica estacional de las playas arenosas, mixtas, de guijarro y de canto rodado.

### 3. AREA DE ESTUDIO

La batimetría dentro de BTS es poco profunda (profundidades de hasta 50 m) sin embargo, existe un cañón submarino entre las Islas Todos Santos y Punta Banda con una profundidad máxima de 400 m (Fig. 5). Esta zona se encuentra en un régimen mesomareal, con mareas semidiurnas y con un rango promedio de 2.3 m. La bahía está expuesta a oleaje proveniente del Pacífico norte durante el invierno y del Pacífico sur durante el verano (Ahumada-Sempoal, 1993).



**Figura 5.** Localización de la zona de estudio dentro de la Bahía Todos Santos. De lado izquierdo se realiza una localización general de la BTS (imagen modificada de Google earth 2018), mientras que del lado derecho se señalan las distintas playas de estudio (recuadros) dentro de BTS, los puntos de salida del modelo de oleaje SWAN (círculos) y la ubicación del perfilador acústico (estrella)

#### 3.1. SAN MIGUEL (SM)

La playa de San Miguel, ubicada al norte de BTS, está formada por cantos rodados, es angosta y tiene 1 km de longitud (Fig. 6). La playa pertenece a un saliente rocoso formado por tres clases de rocas sedimentarias: médanos del cuaternario en la desembocadura del arroyo y cara de la playa; rocas

sedimentarias pertenecientes a la formación del grupo Rosario Marino al oeste, y clastos basálticos bien redondeados provenientes de la formación Rosarito Beach del Mioceno medio (Gastil *et al*, 1971; Allison *et al*, 1970).

La playa está formada por basalto y roca del tamaño de canto rodado hasta de 1 m de diámetro, y disminuye su tamaño hacia el SE (Aranda-Manteca, 1983). Además, también contiene arenas medias a gruesas mal clasificadas y poco redondeadas en la zona del arroyo (Plaza-Flores, 1979). Presenta una pendiente promedio de 1.5 y una ancho de playa subaérea de aproximadamente 25 m (Peredo-Jaime, 1994). La playa está limitada al norte con terrazas de origen marino, formadas por los cambios eustáticos del nivel del mar durante el Pleistoceno, y al sur, con cantiles de 12 m de altura promedio, compuestos por areniscas marinas y conglomerados del terciario y que presentan un retroceso de 0.93 m/año aportando 14,098 m<sup>3</sup>/año material sedimentario al sistema costero (Cruz-Colín y Cupul-Magaña 1997).



**Figura 6.** Playa San Miguel: zona norte de la playa frente a las casas (foto superior) y zona sur frente al estacionamiento (foto inferior), tomadas durante bajamar en diciembre 2015.

### 3.2. STACKS (STX)

La playa de Stacks es mixta y angosta. Está formada por la acción erosiva de las olas sobre los cantiles compuestos por derrames basálticos que se integran con areniscas marinas y conglomerados de aluvial pertenecientes al Terciario (Plaza-Flores, 1979).

La playa presenta una longitud aproximada de 2 km (Fig. 7). Está compuesta por arenas finas a medias intercaladas con gravas y asentadas sobre terrazas de origen marino constituidas por depósitos sedimentarios post-batolíticos del cuaternario. La playa limita al norte con el puerto de El Sauzal y al sur con una serie de cantiles activos, cuya altura varía entre 3 y 8 m de altura, compuestos de secuencias de lutitas con capas intercaladas de arenisca (menos de 1 m de espesor) con depósitos de aluvión y conglomerados mal clasificados con lentes de areniscas) (Bermúdez-Zavala, 1999) y que presentan un retroceso de 0.97 m/año aportando 14,004.79 m<sup>3</sup>/año de sedimento al sistema costero (Cruz-Colín y Cupul-Magaña 1997).



**Figura 7.** Playa Stacks en agosto 2015 (foto superior) y febrero 2016 (foto inferior) durante bajamar.

### 3.3. GRANADA COVE (GC)

Granada Cove es una playa de bolsillo de 1 km de longitud (Fig. 8), formada principalmente por canto rodado de origen ígneo extrusivo pre-batolítico de la formación Alisitos (principalmente de basalto y andesita). Los cantiles alrededor de la zona se encuentran compuestos por basalto y andesita en su base, y aluvión en la cresta (Téllez-García, 2003), los cuales están sujetos a un retroceso de 0.74 m/año y constituyen un aporte de 3,919.14 m<sup>3</sup>/año de sedimento al sistema costero (Cruz-Colín y Cupul-Magaña, 1997). Al norte la playa limita con acantilados, al sur con la saliente rocosa Punta Morro y al este con asentamientos habitacionales (Plaza-Flores, 1979).



**Figura 8.** Playa de Granada Cove durante marea baja tomada desde el extremo sur en enero 2016.

### 3.4. PLAYA HERMOSA (PH)

Playa Hermosa es una playa arenosa (Fig. 9) clasificada como intermedia, con una longitud aproximada de 7 km (Martínez-Rocha, 1991). Al norte limita con el arroyo el Gallo y al sur con un enrocamiento que protege al asentamiento habitacional de El Ciprés. Esta playa está formada por arenas medias bien clasificadas ( $D_{50}=0.2$  mm) y tiene una pendiente de  $\tan\beta=0.025$ . La playa presenta estructuras costeras, tales como un puerto y estacionamiento en la parte norte, y un dique y enrocamiento en la sección central (Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2016).

La zona de la playa que se encuentra amurallada presenta una anchura de 80–120 m en la zona subaérea, con una altura de hasta 3.5 m sobre el nivel de

bajamar media inferior (NBMI). Mientras que en la zona no amurallada el ancho de playa subaérea es de 220–240 m con alturas de hasta 6.5 m sobre el NBMI en la zona norte (cercano al puerto) y de hasta 10 m sobre NBMI en la zona sur (campo de dunas) (Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2015).

La playa presenta cambios morfológicos verticales de  $\pm 1.5$  m, con variaciones volumétricas de  $\pm 52 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  (Vidal-Ruiz, 2015; Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2017). El oleaje promedio anual frente a la playa tiene una altura de ola significativa ( $H_s$ ) es de 1 m y un período asociado de 11 s. En invierno las condiciones promedio son  $H_s$  de 1.5 m (de diciembre a febrero) con un periodo asociado de 12.5 s. Mientras que en verano (de junio a agosto) el oleaje promedio se caracteriza por  $H_s$  de 0.7 m y un período de 8 s (Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2017).

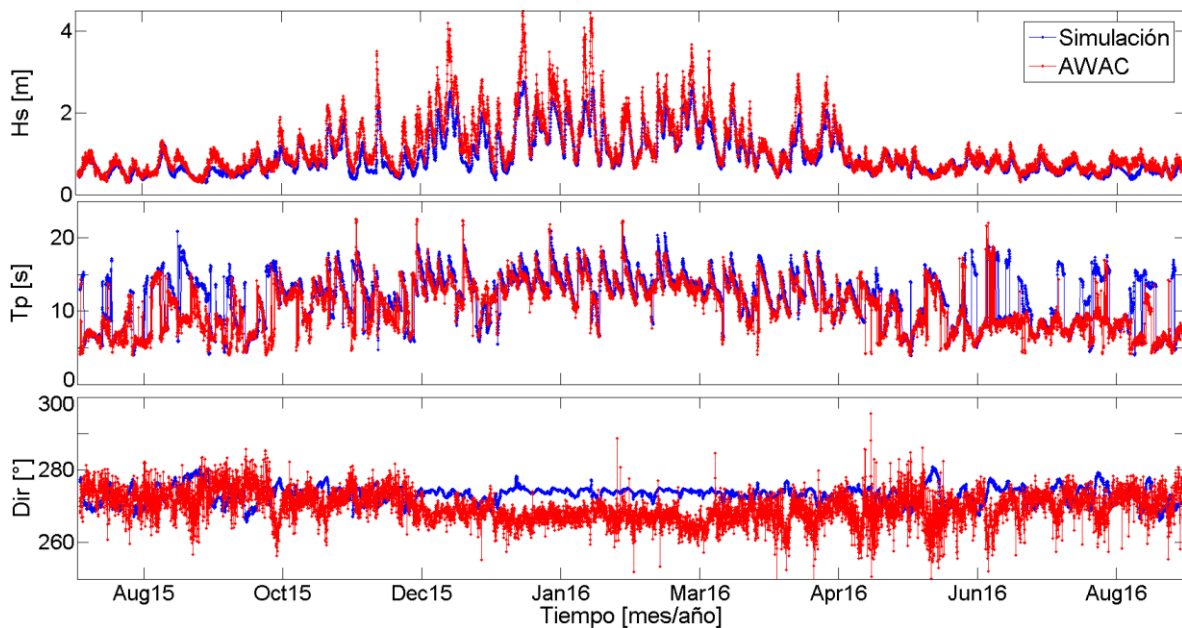


**Figura 9.** Playa Hermosa durante marea baja, tomada desde el extremo norte en abril 2017.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. MEDICIONES DE OLAJE

Con el fin de caracterizar el oleaje incidente en aguas someras durante agosto 2015 a agosto 2016, se cuenta con mediciones de un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) instalado a 20 m de profundidad en la sección noreste de BTS (Fig. 5). A través del instrumento se obtuvo una serie de tiempo continua de altura de ola significativa ( $H_s$ ), periodo pico ( $T_p$ ) y dirección ( $Dir$ ) (Fig.10). Con estos datos se realizó una caracterización del oleaje durante ese año, promediando las condiciones para los meses de invierno, verano y periodos de transición (otoño y primavera), y también para los diferentes periodos de mediciones morfológicas mensuales. Dada la ubicación del instrumento, sus mediciones son directamente comparables con la variabilidad morfológica de Playa Hermosa.



**Figura 10.** Serie de tiempo de parámetros de oleaje medidos con el ADCP tipo AWAC a 20 m de profundidad (rojo) y modelados a partir de datos del modelo WW3 a cinco metros de profundidad (azul): altura significativa ( $H_s$ ), periodo asociado al pico espectral ( $T_p$ ) y dirección incidente ( $Dir$ ).

Con el fin de obtener información de la energía del oleaje incidente en las playas rocosas del norte de BTS, se realizó una propagación del oleaje desde un

nodo del modelo WAVEWATCH III® (WW3) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) ubicado fuera de la BTS (-116.8332 W, 31.8334 N) hacía el interior de BTS por medio del modelo numérico espectral Simulating WAVes in the Nearshore (SWAN por sus siglas en inglés). Para esto se utilizó una malla cuadrículada de 250x250 m a partir de la cual se obtuvieron salidas de altura significativa ( $H_s$ ), periodo ( $T_p$ ), dirección (Dir) y potencia del oleaje a 5 m de profundidad. Se obtuvieron cuatro puntos, ubicados frente a las playas de estudio (SM, STX, GC y PH), para determinar las diferencias del oleaje incidente en cada una de las playas para los diferentes periodos del año y un punto más en la posición del AWAC para validar la información (Fig. 5).

Para calcular el error asociado entre los datos obtenidos por medio del programa SWAN y los datos medidos con el ADCP se aplicó la desviación de la raíz media cuadrada (RMSE por sus siglas en inglés). El RMSE indica que tanto se separan los datos modelados de los medidos

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_t - y_t)^2}{n}}, \quad (3)$$

donde  $\hat{y}_t$  son los valores modelados,  $y_t$  son los datos medidos y  $n$  es el número total de datos.

## 4.2. MEDICIONES SEDIMENTOLÓGICAS

En las playas de arena se realizó una colecta sistemática de sedimento cada mes, durante las campañas de muestreo. Con la ayuda de un nucleador de mano se tomaron tres muestras correspondientes a la zona supramareal, intermareal y submareal, para cada perfil (Tabla I).

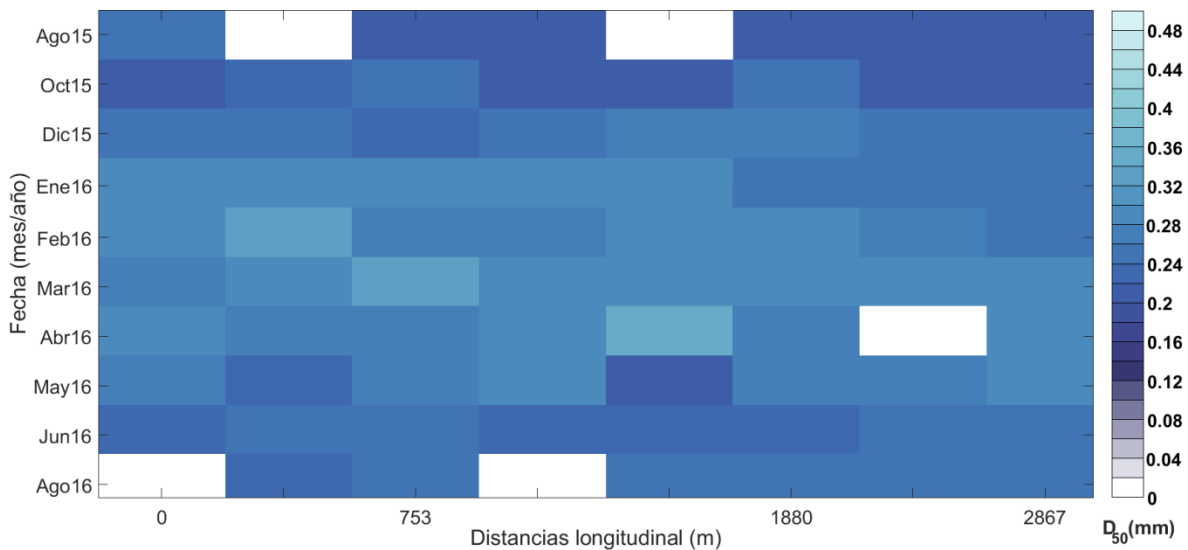
**Tabla I.** Perfiles en los que se tomaron muestras de arena (✓) y donde se levantaron mediciones con cuadrantes (\*).

No. Perfil	Playa				PH
	SM	STX	GC		
1	*	✓	*	1	✓
2		✓		5	✓
3		✓		10	✓
4	*	✓		14	✓
5		✓	*	19	✓
6		✓*		23	✓
7	*	✓		27	✓
8		✓*		30	✓
9		✓	*		
10		✓*			

Para las playas de grava y canto rodado, la caracterización sedimentaria se realizó por medio de conteos dentro de un cuadrante de 1m<sup>2</sup> (Fig.11). Para ello, se colocó el cuadrante sobre el sustrato y se realizó una descripción del tamaño del eje medio del sedimento, tomado como el tamaño medio (Krumbein, 1941). El cuadrante fue colocado sobre el perfil correspondiente (Tabla I) en la zona supramareal (sobre la berma) e intermareal (cara de la playa). Las muestras de arena se secaron y cuartearon en fracciones menores a 50 gr que se tamizaron para eliminar la fracción mayor a 1 mm (arenas gruesas). Después del tamizado, se analizaron las muestras por medio de un analizador de partículas para obtener los parámetros texturales del sedimento (media y asimetría) así como el D<sub>50</sub>. En la Fig.12 se muestra un ejemplo de los resultados de la variabilidad espacio-temporal del tamaño del sedimento, el D<sub>50</sub>, mostrando los valores para los diferentes meses de estudio entre agosto 2015 y agosto 2016 (eje y), y a lo largo de la playa arenosa de Playa Hermosa (eje x).



**Figura 11.** Cuadrante para caracterizar el sedimento de playas de cantos rodados.



**Figura 12.** Variabilidad del  $D_{50}$  (mm) a lo largo de PH y a través del tiempo (de agosto 2015 a agosto 2016). El 0 m representa el límite norte (cerca del Puerto de Ensenada) y 2,867 m el extremo sur.

Con el fin de analizar la variabilidad sedimentológica estacional a través y a lo largo de las diferentes playas, se realizaron campañas de muestreo mensuales de agosto 2015 a agosto 2016. Debido a las diferencias en las longitudes y composiciones de las playas, las metodologías de los muestreos fueron diferentes, variando tanto el número y longitud de los perfiles, así como la estrategia de muestreo (Tabla II).

**Tabla II.** Características de las mediciones sedimentológicas realizadas en los diferentes perfiles topo-batimétricos por playa de estudio.

Playa	Longitud muestreada (m)	Tipo de sedimento	No. Perfiles por muestreo	Separación entre perfiles (m)
San Miguel	350	Canto rodado	6	58
Granada Cove	200	Guijas y grava	6	30
Stacks	200	Mixta: arena y guijarro	10	40
Ensenada	2867	Arena medias	61	500

### 4.3. MEDICIONES MORFOLÓGICAS

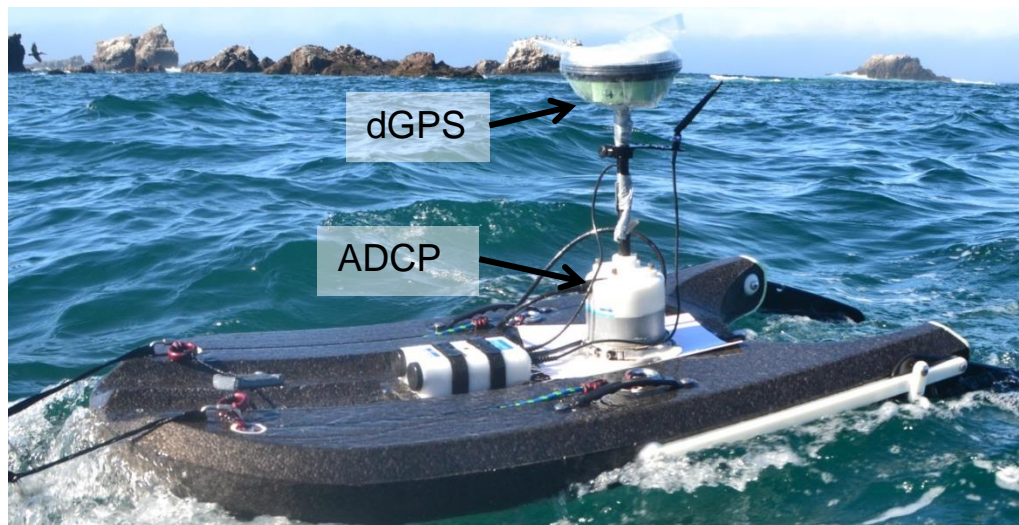
Para determinar los cambios morfológicos de la playa subaérea (playa supramareal e intermareal) se realizaron perfiles perpendiculares a la línea de costa durante la marea baja por medio de un GPS (Global Positioning System) diferencial (Leica GS14) (dGPS) el cual se encuentra referenciado al nivel de bajamar media inferior (NBMI). Para la playa de arena la antena móvil del dGPS fue montada sobre un eje con dos ruedas que, accionado por dos personas, permitió la colección de datos con intervalo de un segundo con una precisión de  $z < 2$  cm (Fig.13a). Para las otras playas, las mediciones no fueron de forma continua sino de manera puntual, aproximadamente una medición cada 1m, y principalmente donde se identificaron cambios morfológicos evidentes (Fig.13b).



**Figura 13.** Levantamiento topográfico por medio de dGPS diferencial: (a) de forma continua con el dGPS montado sobre un eje móvil en la playa arenosa (Playa Hermosa); y (b) de forma puntual en la playa de canto rodado (Granada Cove).

La morfología submareal se obtuvo por medio de una ecosonda integrada en un Perfilador de Corrientes Acústico Doppler (ADCP, Hydrosurveyor M9 de SONTEK) de 0.5 MHz y sincronizada con un dGPS. Los instrumentos se arrastraron con una embarcación usando un 'hydroboard' durante marea alta (Fig.14). La ecosonda toma mediciones de profundidad cada segundo, y se sincroniza con las mediciones de dGPS para eliminar la variabilidad de la superficie del mar ocasionada por el oleaje y las mareas.

Todas las mediciones topográficas y batimétricas están referidas al nivel de bajamar media inferior (NBMI) usando la referencia de la red de INEGI-API y las mediciones del dGPS son posprocesadas con las mediciones de la base de GPS de referencia ubicada en la azotea del edificio del Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO).

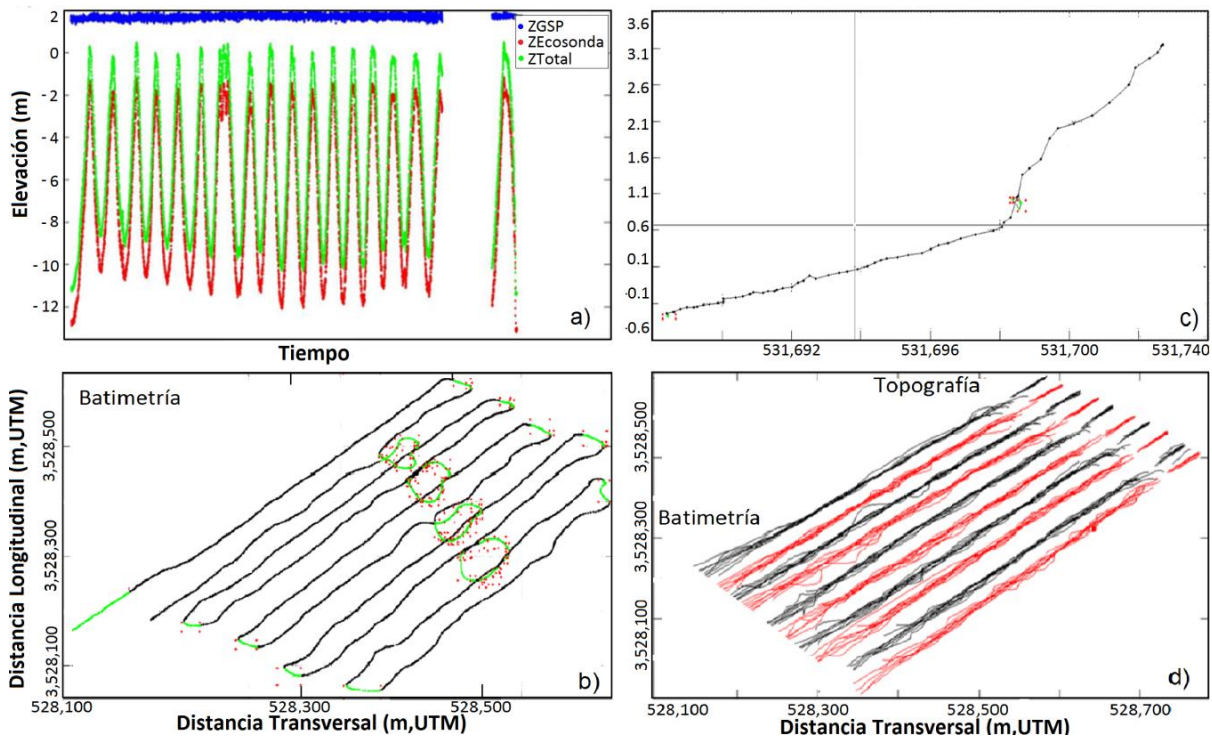


**Figura 14.** Levantamiento batimétrico usando ADCP y dGPS montados en el 'hydroboard' y arrastrados a un costado de la embarcación.

#### 4.4. PROCESAMIENTO DE MEDICIONES MORFOLÓGICAS

El paso más importante en el procesamiento de las mediciones batimétricas consistió en sincronizar adecuadamente las mediciones de la ecosonda con las del dGPS, con lo que se eliminaron las fluctuaciones verticales asociadas a las mareas y el oleaje. Por dicho motivo, al procesar los datos batimétricos, se realizó

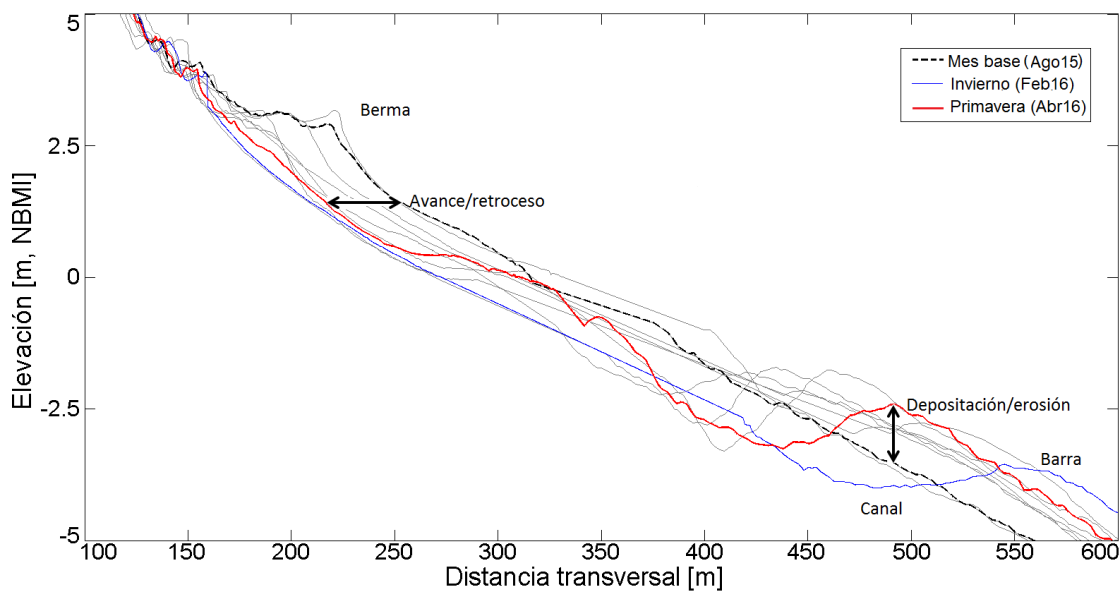
una sincronización en tiempo de los datos del dGPS con los de la ecosonda, y después, los datos resultantes fueron interpolados y sumados para obtener las profundidades corregidas (Fig.15a). Por último, se realizó una limpieza para eliminar los giros entre perfiles (Fig.15b) y se separaron cada uno de los transectos. Los perfiles separados (batimétricos y topográficos) fueron limpiados para eliminar mediciones desubicadas o con algún tipo de error de manejo (Fig.15c). Una vez procesados los datos de los perfiles topográficos y batimétricos, se generó una matriz conformada por perfiles topo-batimétricos (TB), que incluyeron tanto la playa subaérea (datos topográficos) como la submareal (datos batimétricos) (Figura 15d).



**Figura 15.** Procesamiento de datos topo-batimétricos. (a) Sincronización de los datos del GPS diferencial (azul), los de la ecosonda (rojo) y la profundidad corregida (verde); (b) Vista en planta de los transectos batimétricos crudos (en negro), los datos a eliminar (en verde); (c) Limpieza de un perfil topográfico; y (d) ejemplo de la matriz de perfiles topo-batimétricos (TB) para todo el periodo de estudio para la playa Stacks.

Analizando la variabilidad de los perfiles topo-batimétricos se puede evaluar la evolución morfológica de las diferentes playas e identificar sus rasgos morfológicos más importantes (e.g. barras sumergidas, bermas, pendiente y

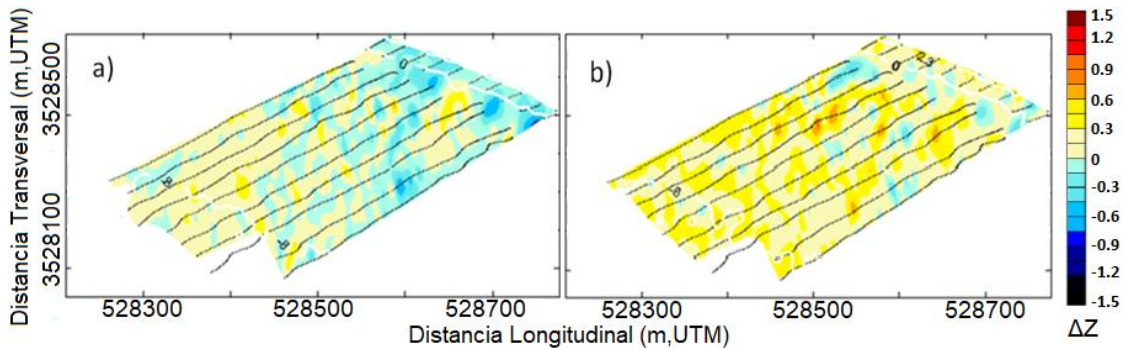
anchura de las diferentes zonas de la playa). Debido a que la zona más dinámica de los perfiles es de los 5 a los -5 m de elevación, esta será la zona de preferencia de estudio, misma que incluye la zona supramareal, intermareal y zona submareal cercana. Para fines prácticos del escrito, se referirá como avance/retroceso a la acumulación/pérdida de sedimento en la horizontal, y como deposición/erosión a la acumulación/pérdida de sedimento en la vertical. La figura 16 muestra un ejemplo de la evolución de un perfil topobatimétrico en el tiempo y de su variabilidad morfológica.



**Figura 16.** Evolución del perfil topo-batimétrico TB1 de la playa de arena (PH), elevación referenciada al NBMI. La línea negra discontinua representa el primer mes de muestreo (Ago15), la línea azul continua representa el mes de febrero mientras que la línea roja continua el mes de abril. En líneas grises se muestran el resto de los meses.

Para evaluar las diferencias morfológicas ocurridas durante los diferentes meses en la sección subaérea y submareal de cada playa, los perfiles topobatimétricos son interpolados linealmente para obtener superficies tridimensionales o Modelos Digitales de Elevación (MDE) (Fig.17). Las diferencias parciales (DP) de los MDEs muestran los cambios morfológicos transversales y longitudinales de la playa para diferentes tiempos (Fig.17a), mientras que la suma

acumulada de las diferencias parciales (0044PA) muestra la evolución morfológica de la playa para los diferentes periodos de tiempo (Fig.17b).



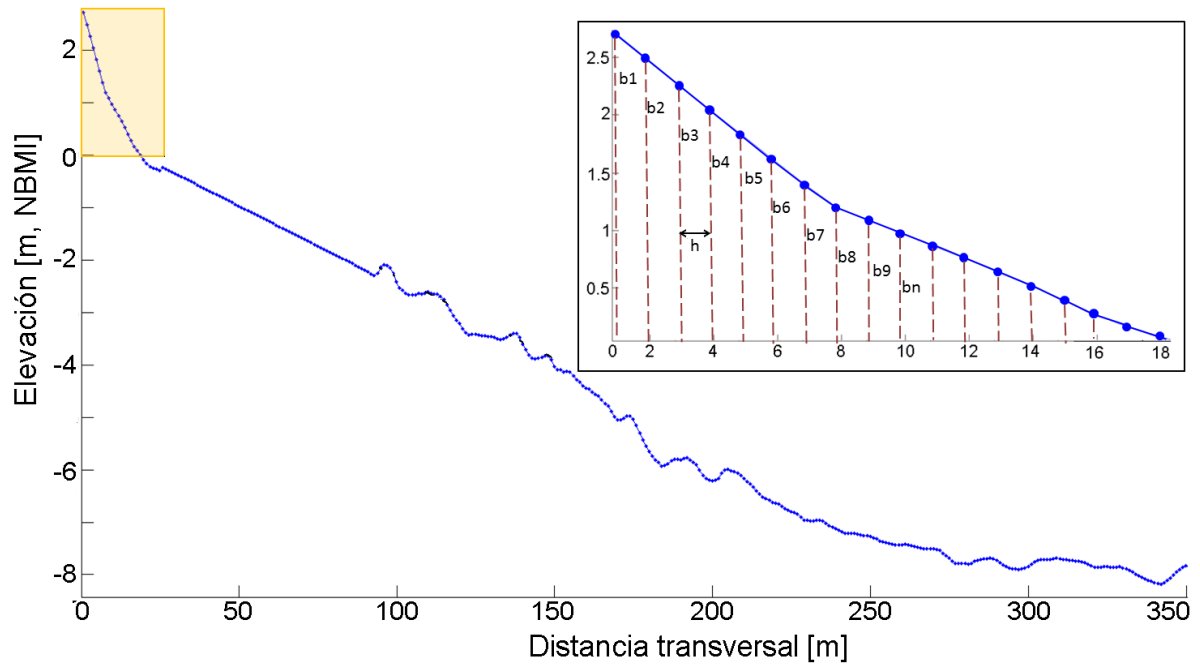
**Figure 17.** Ejemplo de un MDE en playa STX;(a) diferencias parciales (DP) entre los meses de agosto 2015 y octubre 2016. (b) diferencias acumuladas (DPA) entre agosto 2015 y agosto 2016. Las líneas negras muestran los perfiles TB medidos.

#### 4.5. CÁLCULO DE VOLÚMENES

Con la finalidad de obtener la variabilidad volumétrica de sedimento en cada playa, se realizó el cálculo del área de cada perfil topo-batimétrico (TB) a través de la fórmula del área de un trapecio (ec.3). El cálculo trapezoidal se esquematiza para un perfil TB medido en la figura 18. Una vez calculada el área de un perfil, se obtiene el valor promedio para dos perfiles contiguos, y el resultado es multiplicado por la distancia entre ambos perfiles (ec.4). Finalmente, los volúmenes obtenidos se suman para obtener el volumen total mensual de cada playa.

$$a = \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot h \quad (4)$$

$$v = \frac{a_1 + a_2}{2} \cdot d \quad (5)$$

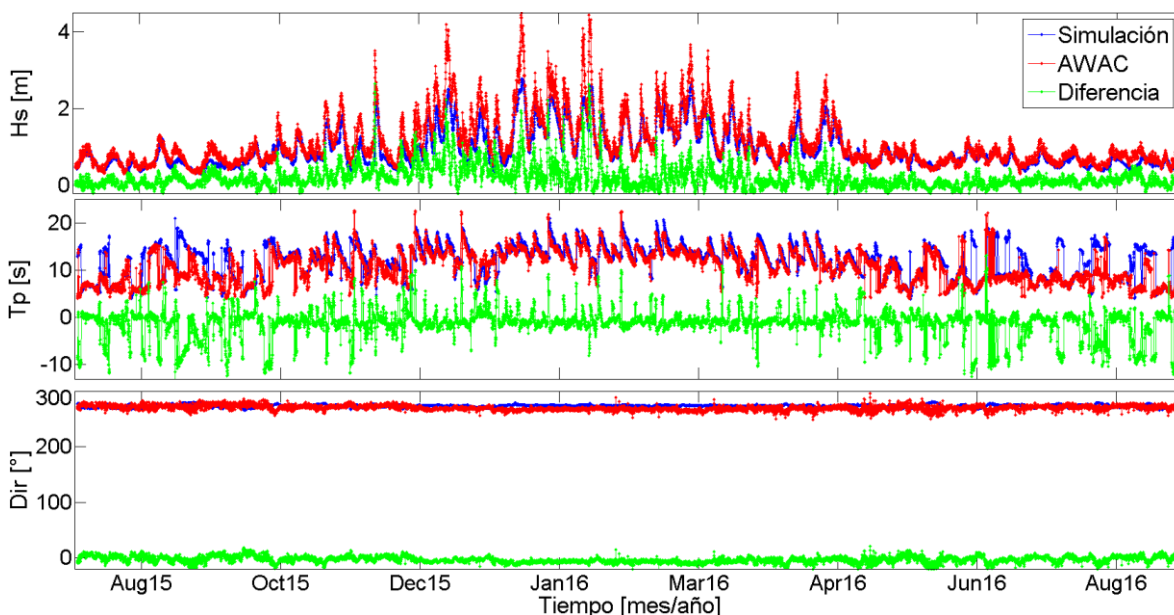


**Figura 18.** Ejemplo del cálculo del área del perfil TB3 de STX para diciembre 2015.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. CARACTERIZACIÓN DEL OLAJE

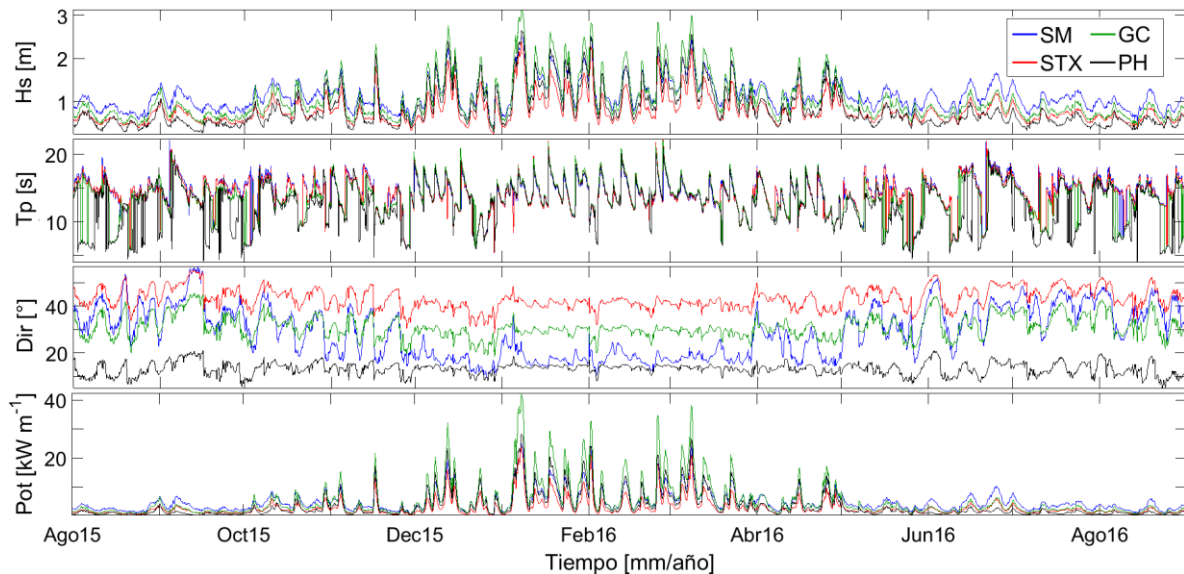
A través del modelo espectral SWAN, se obtuvieron series de tiempo de parámetros del oleaje ( $H_s$ ,  $T_p$ , Dir y potencia) para cada una de las playas estudiadas. Las salidas numéricas fueron comparadas con las mediciones del ADCP de Playa Hermosa, con lo que se aseguró el buen funcionamiento del modelo numérico (Fig.19). Por medio de la desviación de la raíz cuadrática media (RMSE) se encontró un error asociado de 0.33 m para la altura de ola significativa, 2.6 s para el periodo y  $6^\circ$  en la dirección del oleaje. Observando que el modelo subestima las mediciones reales, principalmente en los eventos de alta energía.



**Figura 19.** Diferencia en la serie de tiempo de parámetros de oleaje medidos con el AWAC a 20 m de profundidad (rojo) y modelados a partir de datos del modelo WW3 (azul): altura significativa ( $H_s$ ), periodo asociado al pico espectral ( $T_p$ ) y dirección incidente (Dir). Se representa la diferencia entre ambas series de tiempo se representa en verde.

Los resultados numéricos muestran que para el periodo de estudio (agosto 2015 a agosto 2016) en promedio, las playas de BTS están expuestas a oleaje con una  $H_s$  de 0.96 m, un  $T_p$  de 13.5 s, una dirección predominante del suroeste ( $299^\circ$ ) y una potencia de  $4.15 \text{ kWm}^{-1}$ . Las cuatro playas (Fig.20), presentan

condiciones menos energéticas durante el verano, mismas que se intensificaron durante invierno. Se identificó un periodo de alta energía del oleaje entre diciembre del 2015 y abril 2016, probablemente asociado con El niño 2015-2016 (Ruiz de Alegría-Arzaburu *et al.*, 2017), con  $H_s$  promedio de 1.27 m,  $T_p$  asociado de 14 s y una potencia de  $7.46 \text{ kWm}^{-1}$ , para la misma dirección.



**Figura 20.** Serie de tiempo de los parámetros de oleaje obtenidos en el modelo SWAN para cada playa. De arriba hacia abajo: altura significativa ( $H_s$ ), periodo asociado al pico espectral ( $T_p$ ), dirección incidente ( $Dir$ ) y la potencia del oleaje ( $Pot$ ) para las playas de: de canto rodado (SM) en azul, playa mixta (STX) en rojo, playa de guijarros (GC) en verde y playa de arena (PH) en negro.

Estacionalmente, la playa de canto rodado se encuentra expuesta a mayor energía del oleaje en verano-otoño con una altura significativa  $H_s \approx 1 \text{ m}$ , periodos de  $T_p \approx 14 \text{ s}$ , dirección predominante del suroeste ( $Dir \approx 306^\circ$ ) y una potencia del oleaje de  $P_{ot} \approx 3.7 \text{ kWm}^{-1}$ . Seguida por la playa de guijarro con  $H_s \approx 0.8 \text{ m}$ ,  $T_p \approx 13 \text{ s}$ , dirección predominante del suroeste ( $Dir \approx 302^\circ$ ) y una potencia del oleaje de  $P_{ot} \approx 2.8 \text{ kWm}^{-1}$  y la playa mixta con  $H_s \approx 0.7 \text{ m}$ ,  $T_p \approx 14 \text{ s}$ , dirección predominante del suroeste ( $Dir \approx 315^\circ$ ) y una potencia del oleaje de  $P_{ot} \approx 1.98 \text{ kWm}^{-1}$ . Durante este periodo, la playa de arena recibe condiciones menos energéticas, con  $H_s = 0.6 \text{ m}$  asociados a periodos más corto ( $T_p \approx 11 \text{ s}$ ), dirección casi del oeste ( $Dir \approx 283^\circ$ ) y una potencia del oleaje  $P_{ot} \approx 1.3 \text{ kWm}^{-1}$ .

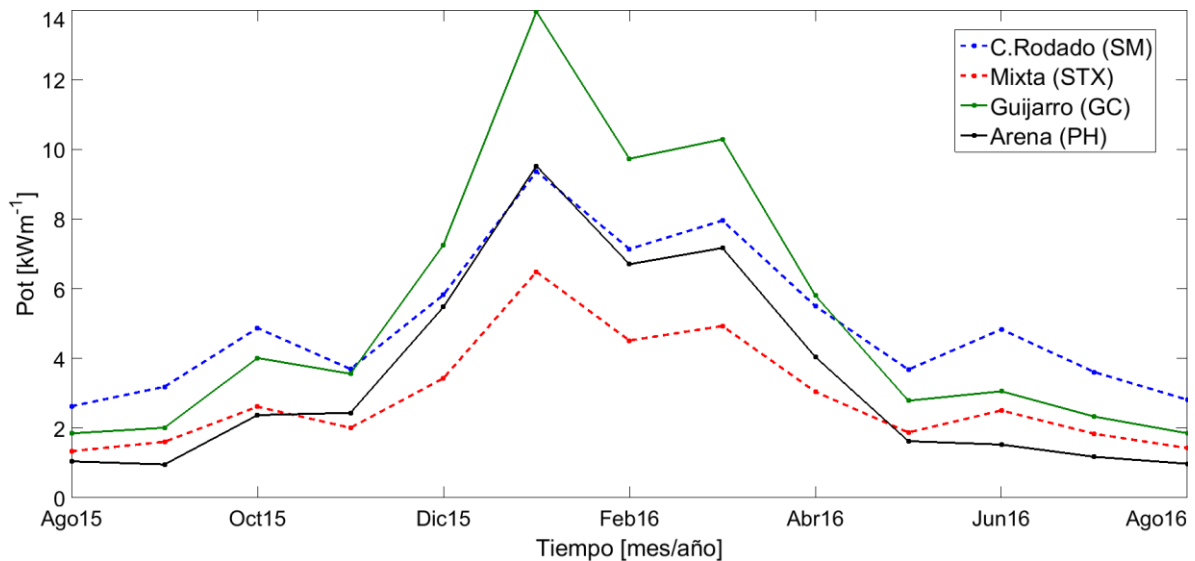
En el periodo invierno-primavera la playa de guijarro presenta las condiciones más energéticas de oleaje con altura significativa  $H_s \approx 1.3$  m, asociada a periodo más largo ( $T_p \approx 13.7$  s), dirección predominante del suroeste ( $Dir \approx 299^\circ$ ) y una mayor potencia del oleaje ( $P_{ot} \approx 8.32$   $\text{kWm}^{-1}$ ). Seguida por la playa de canto rodado, con  $H_s \approx 1.32$  m,  $T_p \approx 13.6$  s, dirección del suroeste ( $Dir \approx 297^\circ$ ) y una potencia del oleaje de  $P_{ot} \approx 6.58$   $\text{kWm}^{-1}$ , y la playa de arena con  $H_s \approx 1$  m,  $T_p \approx 13.2$  s, dirección casi del oeste ( $Dir \approx 283^\circ$ ) y una potencia del oleaje de  $P_{ot} \approx 5.77$   $\text{kWm}^{-1}$ . Siendo la playa mixta es la que recibe menor energía con,  $H_s = 0.94$  m asociada a periodo más corto ( $T_p \approx 13.67$  s), dirección del suroeste ( $Dir \approx 312^\circ$ ) y una potencia del oleaje ( $P_{ot} \approx 4.05$   $\text{kWm}^{-1}$ ) durante este periodo (Tabla III)

**Tabla III.** Principales atributos del oleaje con su promedio estacional (verano: agosto 2015, junio 2016-agosto 2016; otoño: septiembre-noviembre 2015; invierno: diciembre 2015-febrero 2016; primavera: marzo-mayo 2016) y total, por playa.

	Altura de ola significativa [ $H_s$ (m)]					Potencia del oleaje [ $P_{ot}$ ( $\text{kWm}^{-1}$ )]				
	Verano	Otoño	Invierno	Primaver	Prom Tot	Verano	Otoño	Invierno	Primaver	Prom Tot
SM	1.03	1.05	1.38	1.25	1.16	3.68	3.93	7.45	5.71	5.00
GC	0.82	0.88	1.47	1.19	1.06	2.50	3.20	10.33	6.30	5.26
STX	0.69	0.71	1.00	0.87	0.80	1.88	2.08	4.82	3.28	2.89
PH	0.60	0.66	1.24	0.96	0.84	1.34	1.93	7.25	4.28	3.46
	Dirección [Dir ( $^\circ$ )]					Periodo de ola [ $T_p$ (s)]				
	Verano	Otoño	Invierno	Primaver	Prom Tot	Verano	Otoño	Invierno	Primaver	Prom Tot
SM	306.37	302.50	287.52	294.62	298.88	14.50	14.30	13.82	13.30	14.10
GC	302.51	302.42	298.79	299.75	301.05	13.11	13.35	14.40	12.89	13.47
STX	315.15	314.48	310.41	312.02	313.22	14.30	14.11	14.00	13.34	14.05
PH	282.86	283.77	283.51	283.07	283.20	11.28	12.19	14.05	12.29	12.38

La figura 21 muestra la estacionalidad del oleaje, exhibiendo una mayor potencia del oleaje (43%) de enero a marzo (invierno) y menor (13%) de agosto a septiembre del 2015 y de junio a julio 2016 (verano). Con respecto a la playa de guijarro (GC) que es la playa que mayor potencia de oleaje recibe ( $5.26$   $\text{kWm}^{-1}$ ), la playa de canto rodado recibe 5% menos potencia ( $5$   $\text{kWm}^{-1}$ ) seguida por la playa arenosa con 20% menos potencia ( $3.46$   $\text{kWm}^{-1}$ ), siendo la playa mixta la que presenta menor potencia ( $2.89$   $\text{kWm}^{-1}$ ) con 45% menos que la playa de guijarro. Sin embargo las diferencias estacionales muestran que en verano la playa de canto rodado presenta 68% más potencia que la playa de guijarro y la playa mixta

presenta un 71% más que la playa de arena. Mientras que en invierno este comportamiento se invierte y la playa de guijarro presentan 72% más de guijarro potencia que la de canto rodado y la de arena un 68% más que en la mixta. En otoño y primavera el comportamiento es similar al de verano-invierno, respectivamente, pero con menor diferencia.



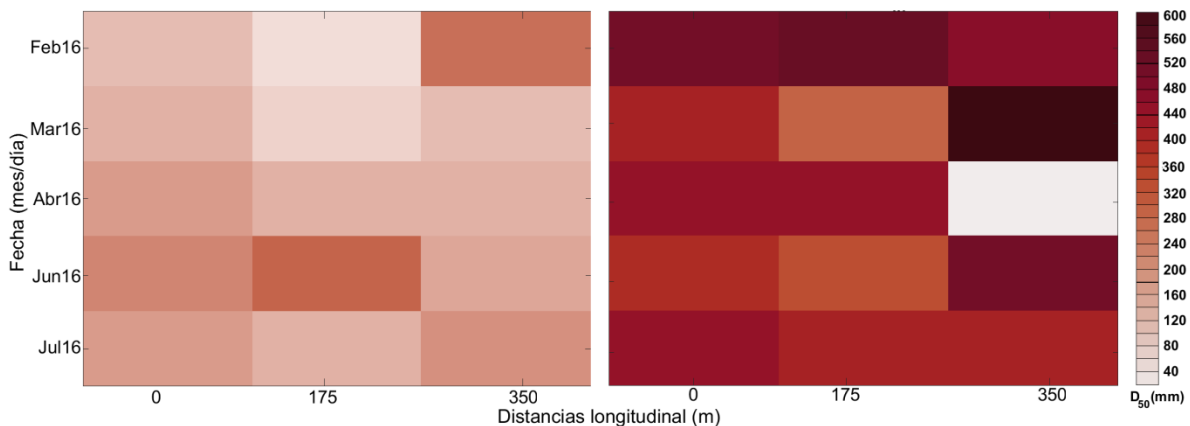
**Figura 21.** Serie de tiempo del promedio mensual de la potencia del oleaje de agosto 2015 a agosto 2016 para las diferentes playas de estudio: SM (azul discontinua), GC (verde continua), STX (roja discontinua) y PH (negro continua).

## 5.2. CARACTERIZACIÓN SEDIMENTOLÓGICA

Con la finalidad de conocer la variabilidad espacio-temporal del tamaño de grano para las distintas playas, se analizaron los cambios del percentil 50 del diámetro de grano ( $D_{50}$ ) de agosto 2015 a agosto 2016. En las figuras 22 a 31 se muestran las variaciones espaciales del  $D_{50}$  para los periodos de muestreo. Con el fin de identificar variaciones transversales en las playas de arena y mixta, se analizaron los cambios en la playa supramareal, intermareal y submareal, y para la playa de canto rodado y guijarro se analizaron los cambios entre la zona supramareal y la intermareal.

### 5.2.1. PLAYA DE CANTO RODADO

El tamaño de sedimento promedio en la playa de canto rodado es de 295 mm. En febrero 2016 (invierno) presentó un  $D_{50}$  de 321 mm, mientras que en marzo-abril 2016 (primavera) un  $D_{50}$  de 272 mm, clasificándose como canto rodado fino. La zona supramareal está constituida por guijarros finos (166 mm) y la intermareal por cantos rodados finos (432 mm) (Fig.22). La playa supramareal varía de guijas muy gruesas (75 mm) a cantos rodados finos (290 mm), y el tamaño de sedimento es mayor en verano en el extremo norte y en invierno en el sur. La parte central muestra valores menores (143 mm) (cerca del arroyo), a excepción de junio cuando se observaron los mayores tamaños de todo el año (287 mm). La zona intermareal presenta desde guijarros gruesos (287 mm) hasta canto rodado fino-medio (593 mm). Contrario a lo que ocurre en la zona supramareal, en el intermareal el mayor tamaño de grano ocurre en invierno y el menor en verano, y la parte central presenta los menores tamaños (390 mm) (Fig.22).

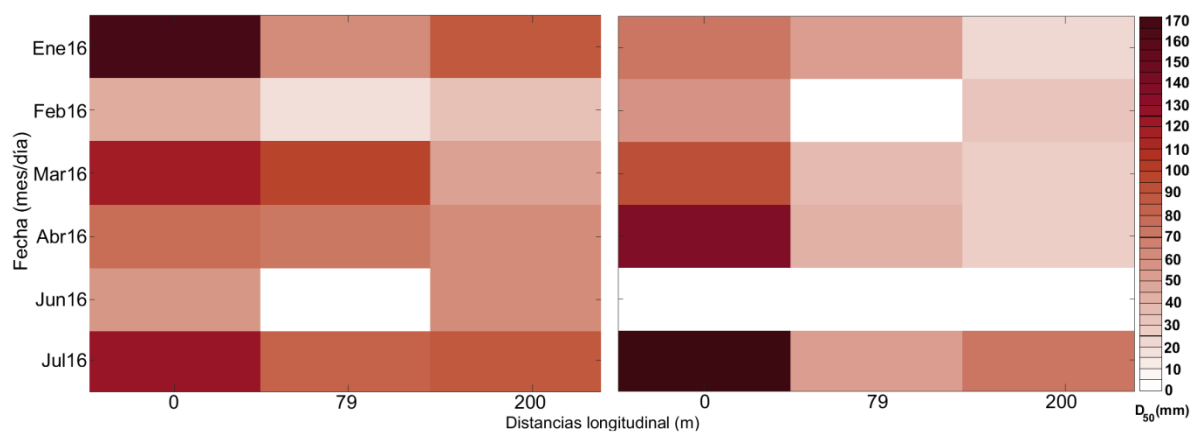


**Figura 22.** Distribución del  $D_{50}$  para la zona supramareal (izquierdo) e intermareal (derecha) en playa San Miguel. Distancia longitudinal (eje x; 0 m extremo norte y 350 m el sur) y tiempo (eje y; meses muestreados). La escala de colores representa el  $D_{50}$  en mm. Los recuadros en blanco son ausencia de datos.

### 5.2.2. PLAYA DE GUIJARRO

El tamaño de sedimento promedio en la playa de guijarro es de 64 mm, pero varía de arenas muy gruesas (1.43 mm) a guijarro fino (153 mm). Presenta una estacionalidad marcada con  $D_{50}$  mayor (74 mm) en verano (junio-julio 2016) y menor (55 mm) en invierno (enero-febrero 2016). La zona supramareal exhibe un

mayor tamaño (66 mm) que la intermareal (62 mm) (figura 23). En la zona supramareal el tamaño varía de arenas muy gruesas (2 mm) a guijarro fino (153 mm), y va de menor en invierno a mayor en primavera; sin embargo el valor mínimo (1.43 mm) se presenta en verano (junio 2016) y en el centro de la playa. El tamaño de grano es mayor en el extremo norte, disminuye hacia el centro y aumenta nuevamente del centro hacia el extremo sur. La zona intermareal presenta de guijas medias (23 mm) a guijarros fino-gruesos (166 mm), y en promedio, el tamaño es menor en invierno y mayor en verano. El tamaño de sedimento es mayor en el norte y disminuye gradualmente hacia el sur.

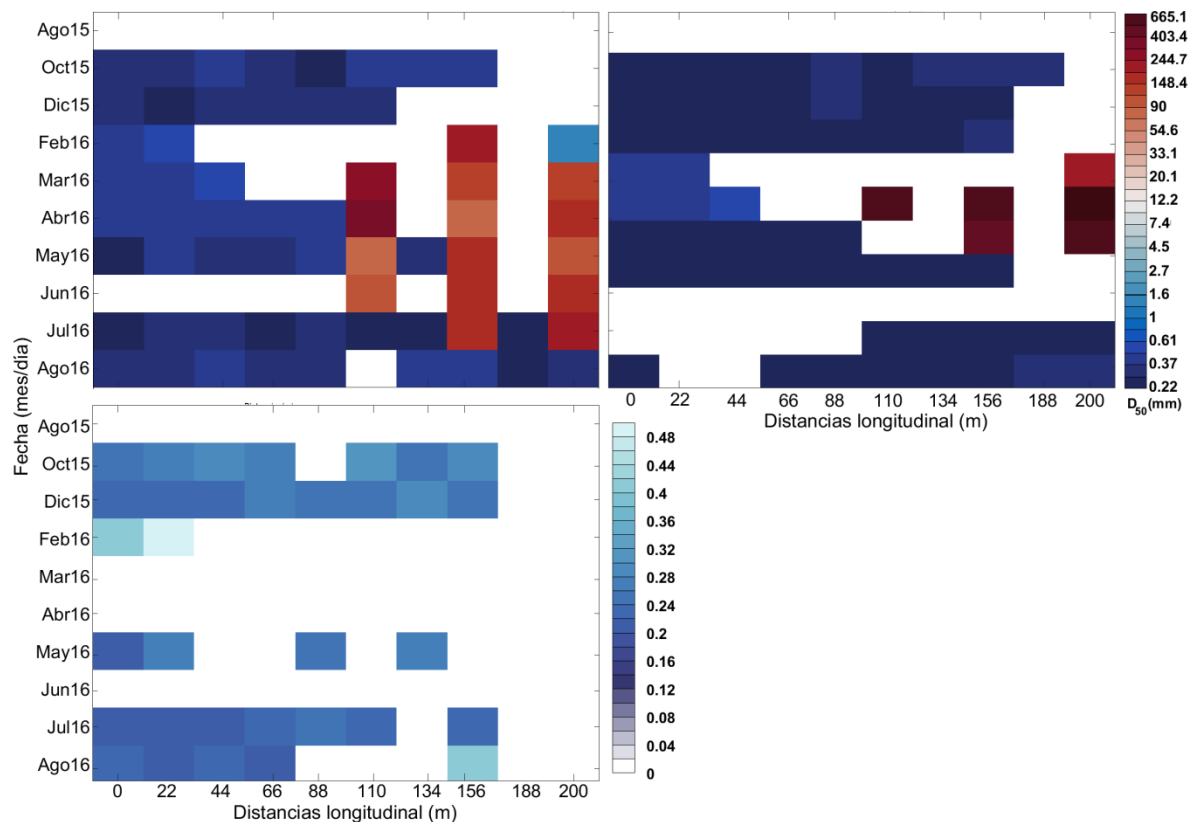


**Figura 23.** Distribución del D<sub>50</sub> para la zona supramareal (izquierdo) e intermareal (derecha) en playa Granada Cove. Distancia longitudinal (eje x; 0 m extremo norte y 200 m extremo sur) y tiempo (eje y; fechas de muestreo). La escala de colores representa el D<sub>50</sub> en mm, y los recuadros blancos ausencia de datos.

### 5.2.3. PLAYA MIXTA

El tamaño promedio del sedimento en la playa mixta es de guija media (20.89 mm). Estacionalmente presenta variaciones de guija gruesa (53.45 mm) en primavera (marzo-mayo 2016) a arenas medias (0.29 mm) en otoño (octubre 2015). El sedimento es más grueso en la parte intermareal que en la submareal (figura 24). Las variaciones 'supramareales' van de arenas finas (0.2 mm) a canto rodado fino (260 mm), y existen diferencias muy marcadas de invierno a primavera entre los extremos norte (TB01-TB05) y sur (TB06-TB10). Presentando arenas medias (0.34 mm) a finales de verano y en otoño (oct15 y ago16) las cuales aumentan en invierno y principios de verano (feb-jul16), principalmente en el sur, llegando a alcanzar guija muy gruesa en la región sur de la playa (102 mm). La sección intermareal presenta variaciones de arenas finas (0.2 mm) a canto rodado

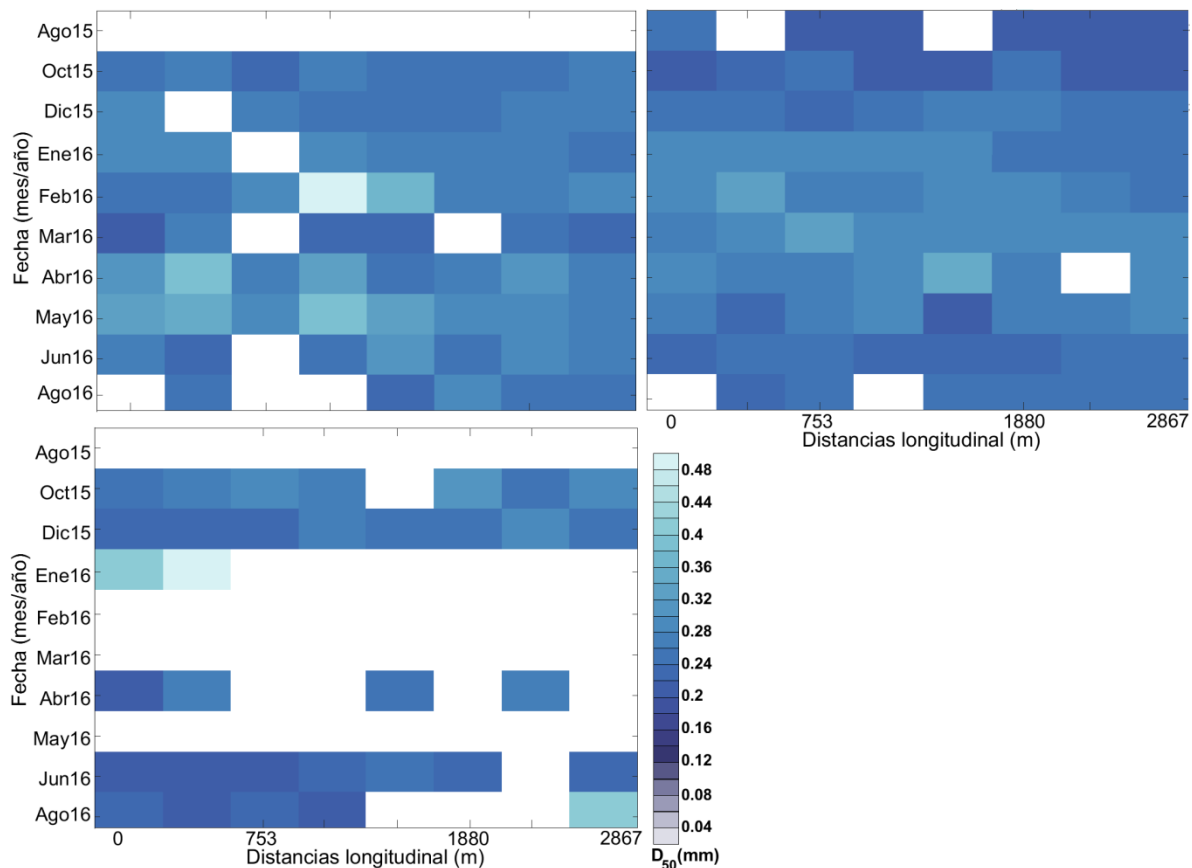
fino (566 mm), y muestra la misma diferencia longitudinal de sedimento que la zona supramareal, siendo el perfil TB06 el parteaguas. En verano y otoño predominan arenas medias (0.25-0.26 mm), guijas medias en invierno (28 mm) y guijas muy gruesas (119 mm) en primavera. Longitudinalmente existen diferencias en el sedimento entre las partes Norte y Sur: el norte presenta arenas finas (0.24 mm) en verano y medias (0.34 mm) en invierno, mientras que el sur arenas medias (0.27 mm) en verano y guijarro fino (203 mm) en invierno. La zona submareal contiene de arenas finas (0.2 mm) a medias (0.4 mm); en verano las arenas son finas (0.23 mm) y en invierno medias (0.34 mm). Hay pocas diferencias longitudinales; en el norte las arenas son finas (0.24 mm) y en el sur medias (0.27 mm). Existe una ausencia de sedimento a finales de invierno y primavera y se observa la presencia de un fondo rocoso con ausencia total o parcial de arena, sobre todo en la región sur de la playa (TB9 y TB10 nunca presentan arena en la parte submareal).



**Figura 24.** Variabilidad espacio-temporal del  $D_{50}$  para la zona supramareal (panel superior izquierdo), intermareal (panel superior derecho) y submareal (panel inferior) en playa Stacks. Distancia longitudinal (eje x; 0 m extremo norte y 200 m extremo sur) y tiempo (eje y; fechas de muestreo). La barra de colores representa el  $D_{50}$  en mm, y los recuadros en blanco son ausencia de datos.

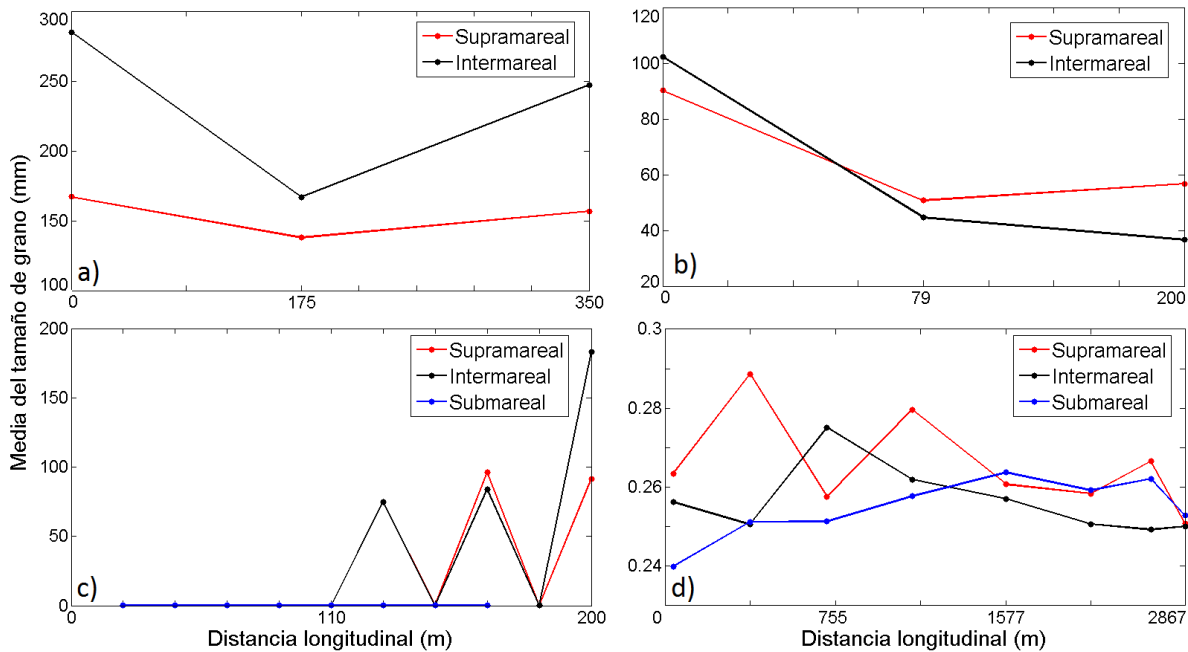
#### **5.2.4. PLAYA DE ARENA**

El tamaño promedio del sedimento en la playa de arena es de arenas medias (0.26 mm). Presenta arenas más gruesas (0.27 mm) en invierno y primavera (diciembre 2015 a mayo 2016) y más finas (0.23 mm) en otoño y verano (de agosto a octubre 2015 y de julio a agosto 2016). La zona supramareal tiene arena ligeramente más gruesa (0.27 mm) que la intermareal y submareal (0.25 mm) (figura 25). La zona supramareal está compuesta por arenas finas a medias (0.21-0.47 mm), y en promedio, las arenas son finas en verano y otoño, y medias en primavera. El extremo sur tiene arenas más finas que la parte central y norte. A principios de invierno (octubre 2015 a enero 2016) y en verano (julio-agosto 2016) el sedimento muestra menor variabilidad, mientras que a finales de invierno (febrero 2016) y en primavera (marzo-mayo 2016) la variabilidad es mayor (0.2-0.4 mm), principalmente en el centro y norte de la playa (TB01-TB19). En promedio, la zona intermareal presenta arenas medias (0.25 mm), pero varían de finas (0.2 mm) a medias (0.37 mm), y son normalmente finas en verano y otoño, y medias en primavera. La zona submareal está compuesta por arenas medias (0.25 mm), con variaciones de arenas finas (0.20 mm) a medias (0.34 mm). En promedio, las arenas son finas en otoño y medias en primavera. En general la región norte presenta tamaños relativamente menores (0.23 mm) que el sur (0.25 mm), sin embargo, los mayores valores (0.26 mm) se dan en el centro (TB29 y TB40).



**Figura 25.** Variabilidad espacio-temporal del  $D_{50}$  para la zona supramareal (panel superior izquierdo), intermareal (panel superior derecho) y submareal (panel inferior izquierdo) en Playa Hermosa. Distancia longitudinal (eje x; 0 m extremo norte y 2,867 m extremo sur) y tiempo (eje y; fechas de muestreo). La barra de colores representa el  $D_{50}$  en mm, y los recuadros en blanco son falta de datos.

La figura 26 muestra los valores de promedios de la media del tamaño de grano para el periodo de estudio y cada zona de playas estudiadas. La playa de canto rodado y la de guijarros muestran mayor tamaño de grano en el norte y menor en el centro (excepto en la zona intermareal de guijarros). La playa mixta presenta un claro aumento del tamaño de grano hacia la región sur para la zona subaérea e intermareal, pasando de arenas (región norte) a guijarros (región sur), mientras que la zona submareal se mantiene relativamente constante (en comparación a las otras zonas) con tamaños de arenas. La playa de arena presenta muy ligera disminución de tamaño de grano hacia el sur en la zona supramareal y un aumento (muy ligero también) de norte a sur para la zona submareal quedando la zona intermarial casi constante a lo largo de la playa (Fig.26).



**Figura 26.** Distribución longitudinal del promedio anual (de agosto 2015 a agosto 2016) de la media del tamaño de grano (mm) para las diferentes zonas de la playa para: (a) de canto rodado (SM); (b) de guijarro (GC); (c) mixta (STX); y (d) de arena (PH).

### 5.3. EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA DE PERFILES

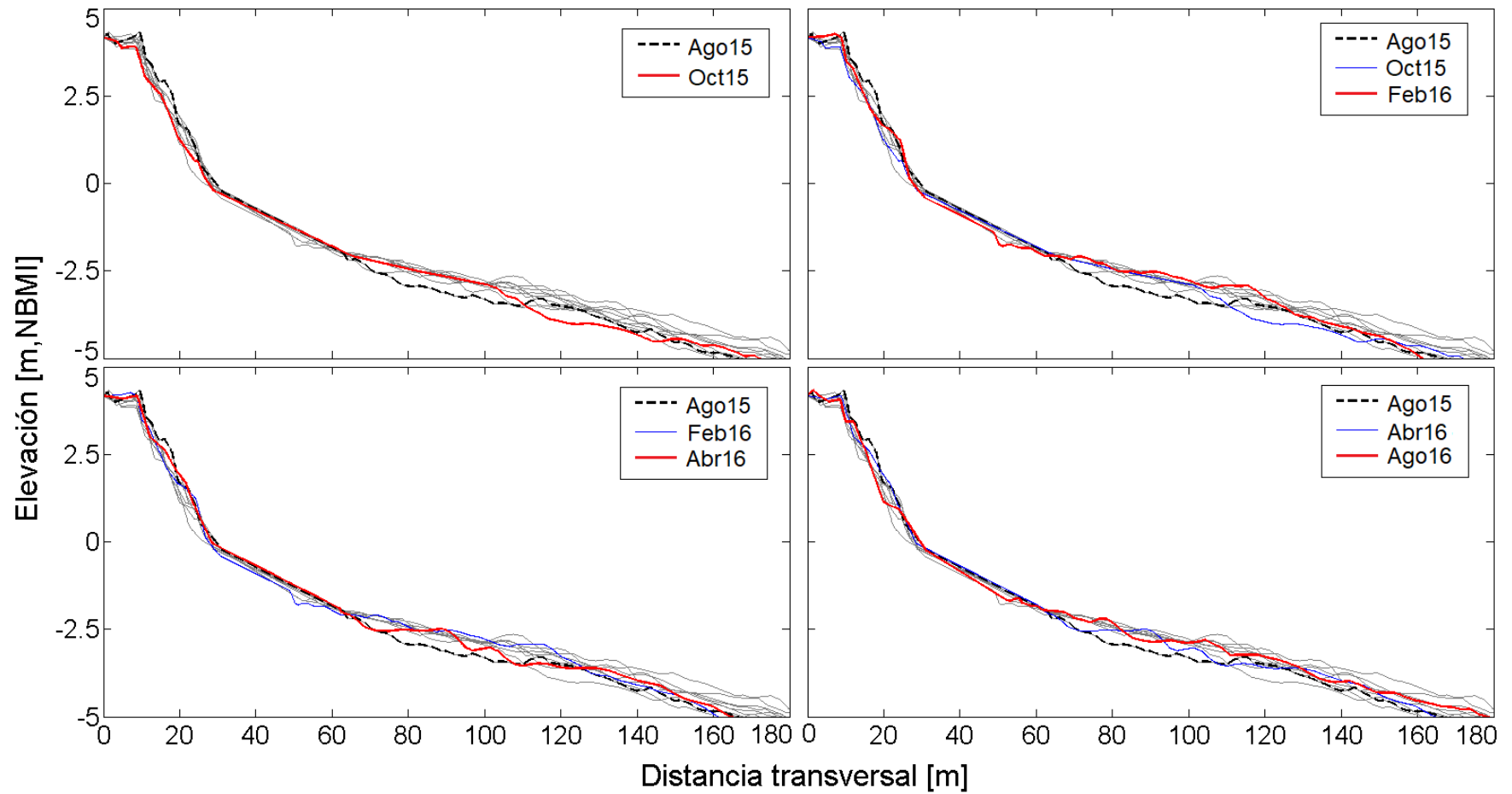
De la figura 27 a la 34 se muestra la variabilidad morfológica estacional de algunos perfiles transversales representativos para las diferentes playas: de canto rodado (San Miguel, SM), de guijarros (Granada Cove, GC), mixta (Stacks, STX) y de arena (Playa Hermosa, PH). Para facilitar la comparación de los perfiles de playa, primero se da una explicación general del perfil completo (ver Anexo A) y posteriormente, la comparación entre playas se realiza únicamente analizando los cambios morfológicos que ocurren en el rango entre los -5 a 5 m de elevación, que incluye la zona subaérea (de 5 a 0 m) y la zona submareal cercana (de 0 a -5 m).

#### 5.3.1. PLAYA DE CANTO RODADO

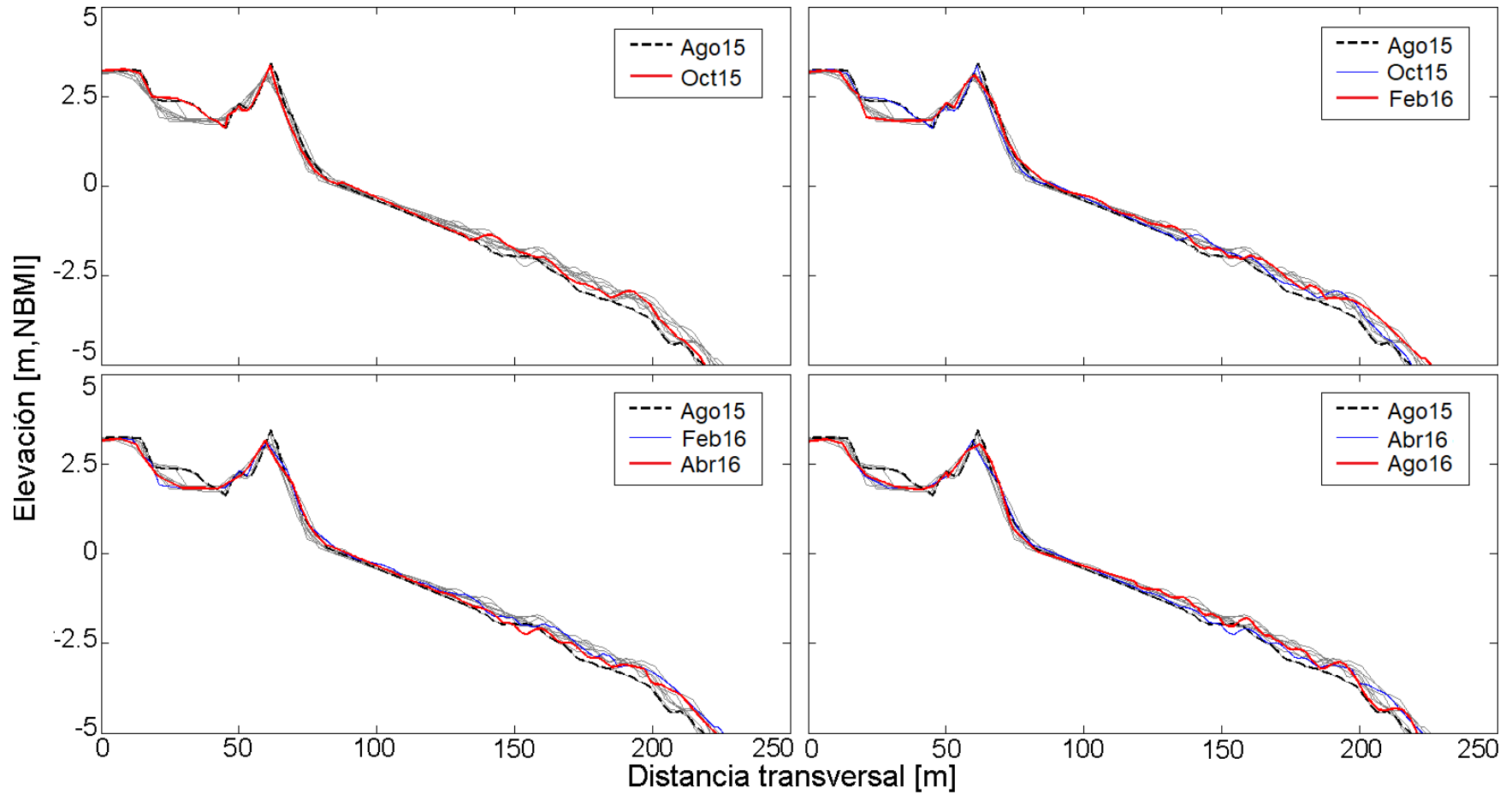
El extremo norte (TB1, Fig.26) tiene una elevación máxima de 4.2 m y una anchura de 360 m (hasta los 8 m de profundidad), de los cuales 28 m son la zona subaérea y el resto la zona submareal (ver Anexo A.1). La sección subaérea

presenta una pendiente de 0.12 (mayor que la zona submareal) que se mantiene estable durante todo el año, con ligeros cambios estacionales en la ubicación de la cresta supramareal (retrocesos y avances de 1 m). La zona submareal cercana presenta una pendiente promedio de 0.03; en esta zona alrededor de los 2.5 m de profundidad se observan cambios notables de erosión-acreción. De verano a otoño se forma un escalón, a 100 m de distancia de la costa, y para finales de invierno se aleja ubicándose a 120 m, en abril se acerca a 90 m y en agosto 2016, al igual que en agosto 2015, desaparece (Fig. 27).

El extremo sur de la playa (TB06, Fig. 28) tiene una longitud de 360 m (hasta los 8 m de profundidad) con una zona subaérea de 90 m (ver Anexo A.4), de los cuales 26 m son parte de la zona intermareal (ver Anexo A.4). Presenta una cresta marcada a 3 m de elevación, similar a la sección norte. La pendiente intermareal promedio es de 0.120 y se mantiene estable a lo largo del año. La sección submareal es más dinámica y tiene una pendiente más suave de 0.037. A diferencia de la zona norte, en el extremo sur la formación del escalón en la zona submareal cercana no es tan clara, y los cambios morfológicos verticales son de menor magnitud (0.5 m). El escalón se forma a 2.5 m de profundidad en otoño, se estabiliza de finales de invierno a primavera, y contrario a lo observado en el norte, se mantiene bien definido a 3 m de profundidad y a 200 m de la línea de costa durante el verano (Fig. 28).



**Figura 27.** Evolución temporal del perfil TB01 (norte) para la playa de San Miguel, de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015), y las líneas azules y rojas muestran los perfiles de las estaciones pasadas y próximas, respectivamente. Con las líneas grises se muestran el resto de los meses.

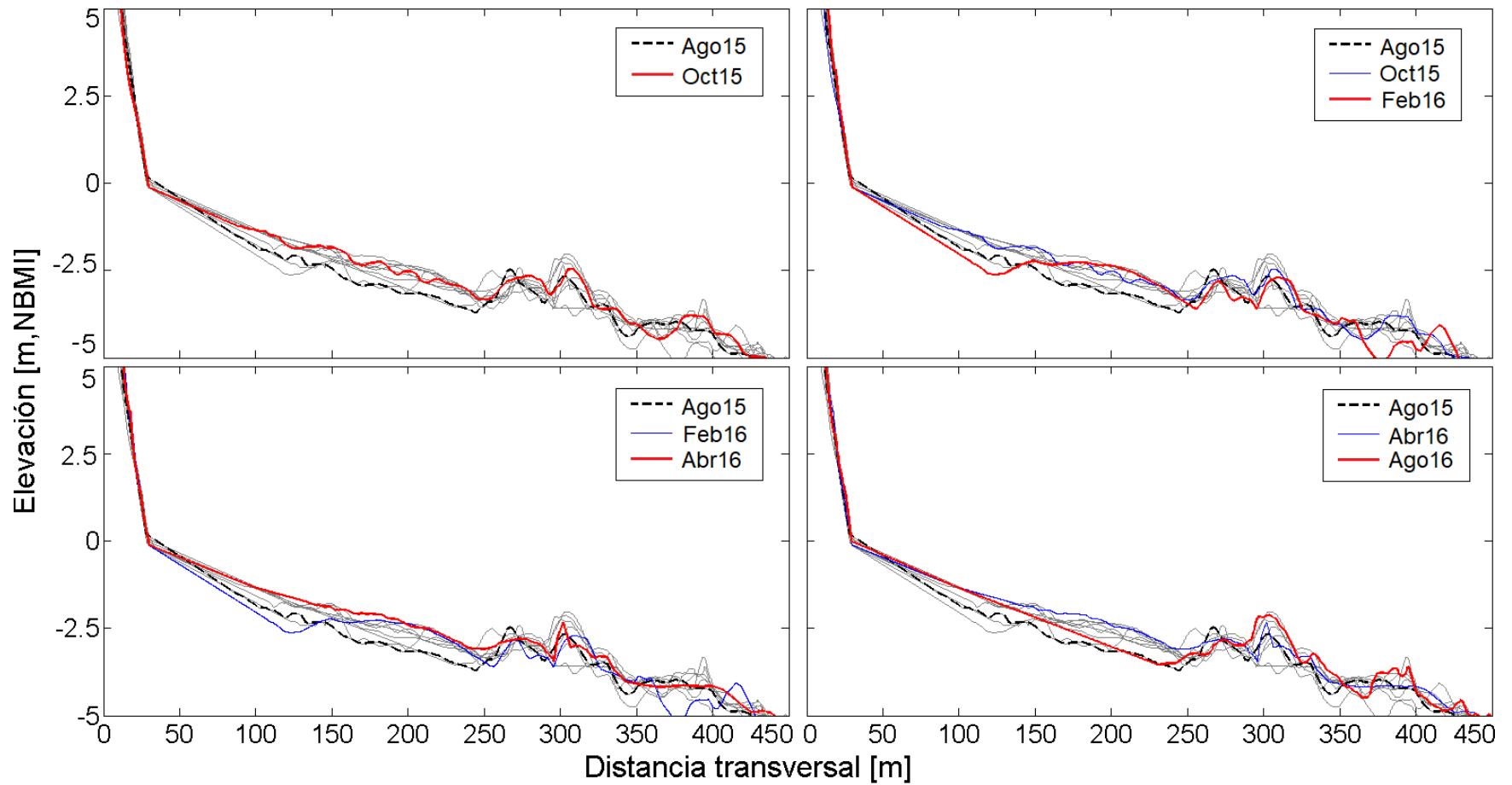


**Figura 28.** Evolución temporal del perfil TB06 (sur) para la playa de San Miguel de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015), y las líneas azules y rojas muestran los perfiles de las estaciones pasadas y próximas, respectivamente. Con las líneas grises se muestran el resto de los meses.

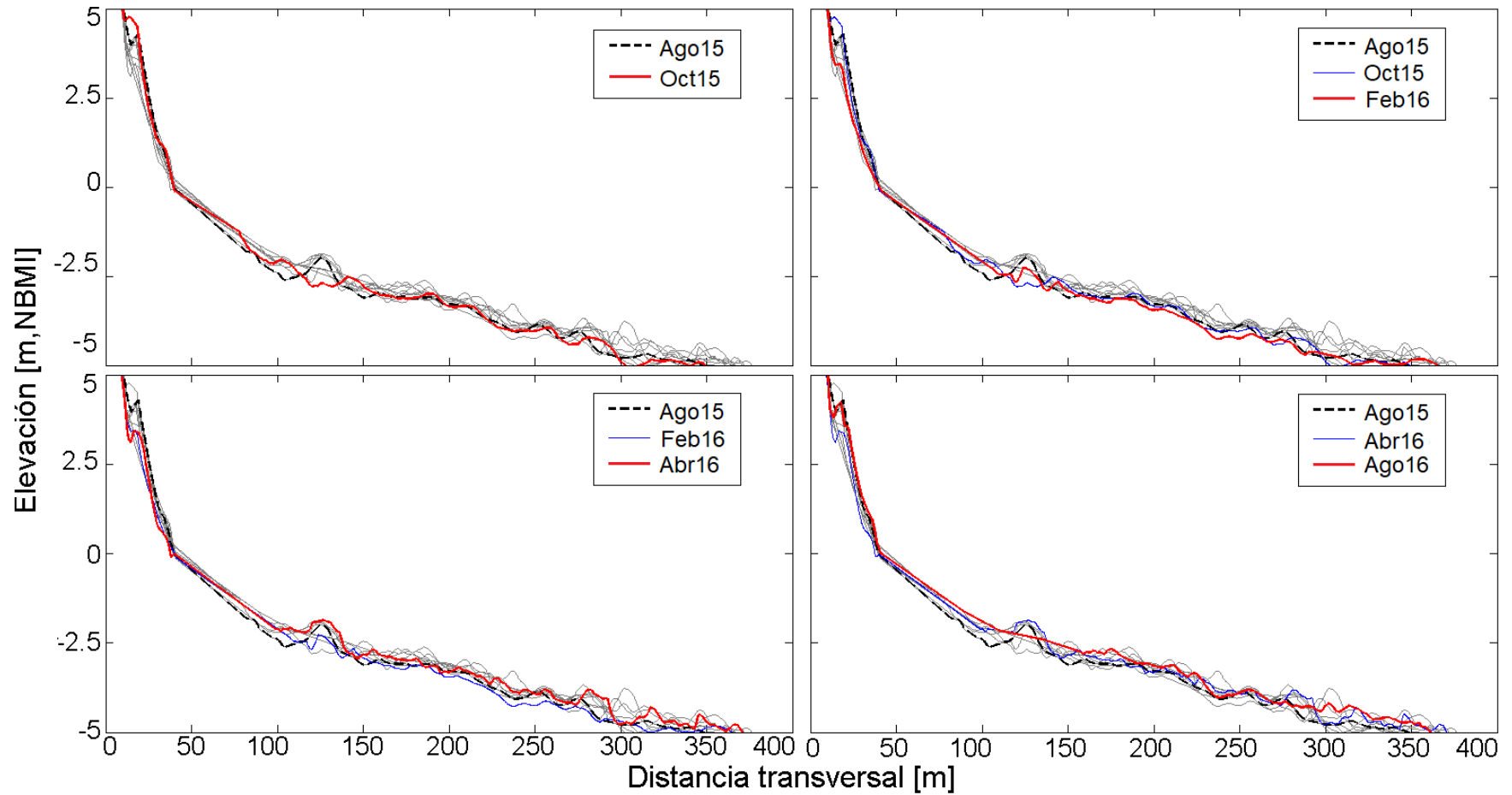
### 5.3.2. PLAYA DE GUIJARRO

La elevación de la playa subaérea de Granada Cove (GC) es de 9 m, y tiene una anchura de 800 m (hasta 8 m de profundidad), de los cuales 29 m pertenecen a la zona subaérea (ver Anexo A.5). Los perfiles TB03 (Fig. 29) y TB09 (Fig. 30) muestran que el cambio de pendiente es enorme entre la sección subaérea y submareal. En el norte (TB03, Fig. 29) la pendiente subaérea varía de 0.22 en verano a 0.33 en invierno, mientras que en la parte submareal es de 0.013. Se presenta una berma de tormenta a los 6 m de elevación en febrero 2016 (anexo A.5). De verano a otoño se deposita hasta 1 m de sedimento de los 0–2.5 m de profundidad, y durante el invierno se agrupa en forma de barra a 2.5 m de profundidad y a una distancia de 120–220 m. Para primavera se rellena la zona de entre 0 y 2.5 m de profundidad, eliminando la forma de la barra. En agosto 2016, similar a agosto 2015, el sedimento se redistribuye hacia aguas más profundas dando a lugar un perfil de pendiente homogénea de 0–3 m de profundidad (Fig. 29).

En el sur (perfil TB09, Fig. 30) los cambios morfológicos son más sutiles que en el norte. El perfil inicia a 9 m de elevación y tiene una anchura de 570 m (hasta los 8 m de profundidad), de los cuales 30 m pertenecen a la zona subaérea (ver Anexo A.8). Se observan también variaciones muy abruptas de pendiente entre la parte subaérea (0.164) y submareal (0.016). La zona subaérea se mantiene estable durante el año, a diferencia de cambios de la berma (3–5 m de elevación), que pueden estar relacionados con la dinámica de las cúspides. De otoño a finales del invierno se da una erosión vertical de hasta 2 m, que se recupera parcialmente entre primavera y verano. La playa subaérea muestra el mismo perfil en agosto 2016 que en agosto 2015, no presenta grandes cambios, por una redistribución del sedimento (Fig. 30).



**Figura 29.** Evolución temporal del perfil TB03 (norte) de Granada Cove de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015), y las líneas azules y rojas muestran los perfiles de las estaciones pasadas y próximas, respectivamente. Con las líneas grises se muestran el resto de los meses.

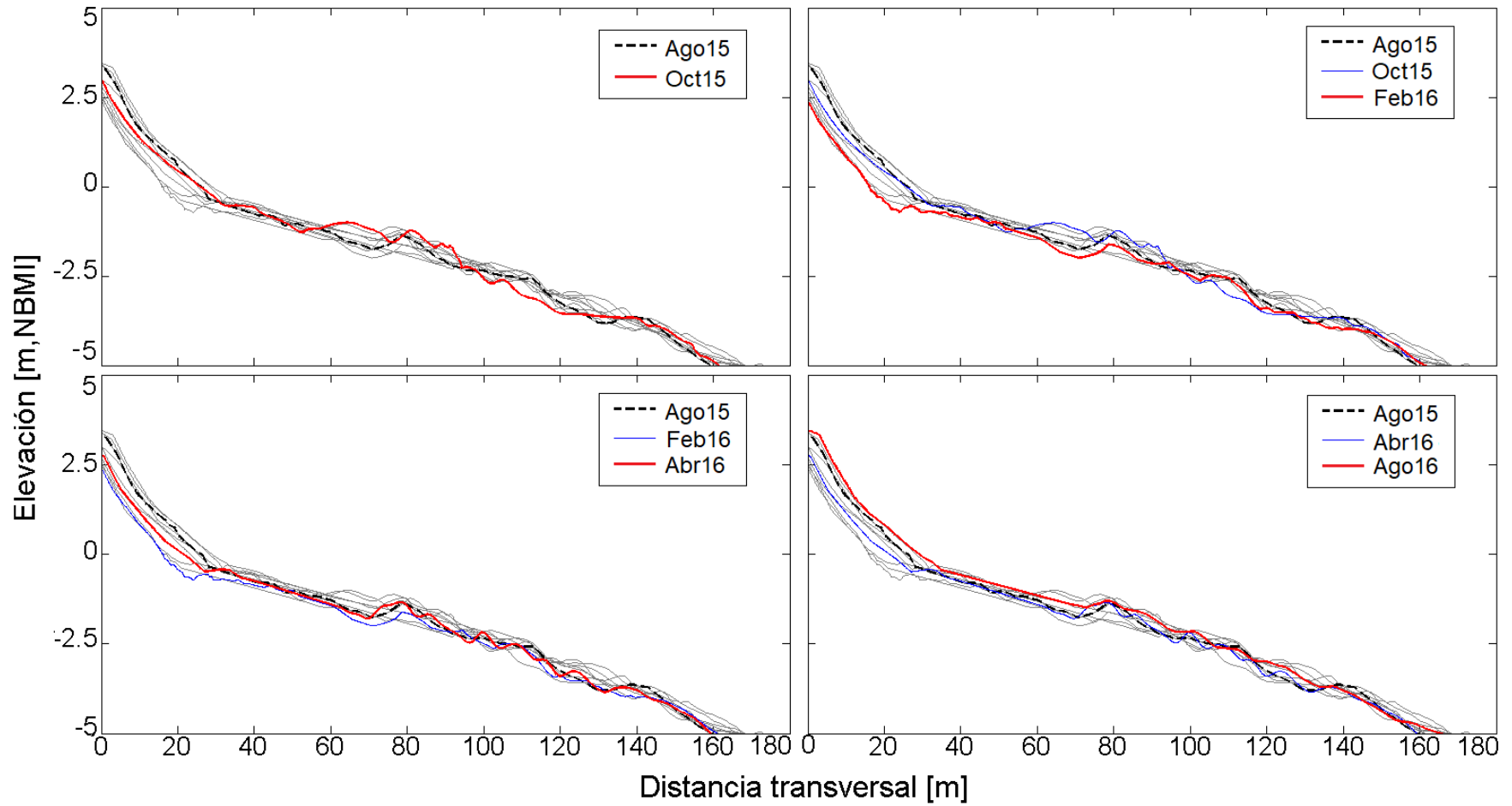


**Figura 30.** Evolución temporal del perfil TB09 (sur) de Granada Cove de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015), y las líneas azules y rojas muestran los perfiles de las estaciones pasadas y próximas, respectivamente. Con las líneas grises se muestran el resto de los meses.

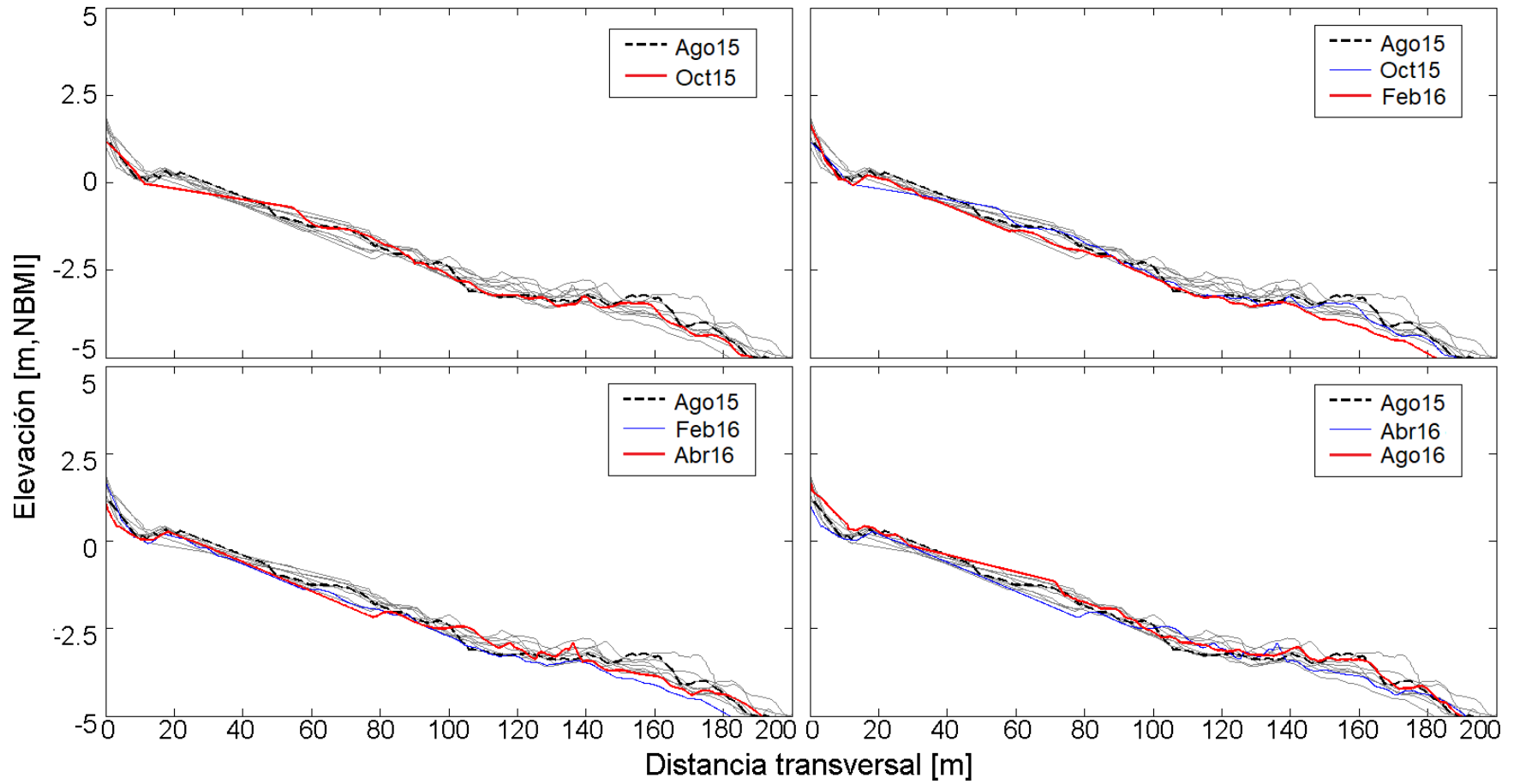
### 5.3.3. PLAYA MIXTA

La playa mixta de Stacks (STX) carece de sección supramareal, inicia a los 2.7 m de elevación y tiene una anchura de 350 m (hasta los 8 m de profundidad), de los cuales 20 m son la zona subaérea (ver Anexo A.9). El perfil de la zona norte (TB01), presenta un cambio de pendiente notable entre la sección subaérea (0.12 en verano y 0.15 en invierno) y la submareal (0.035). En la parte subaérea se dan cambios estacionales verticales de ~1 m. De verano a otoño se da una ligera erosión, a finales de invierno la cara de la playa se erosiona hasta 1 m, que comienza a recuperarse en primavera y se recupera del todo en agosto (Fig. 31). La zona submareal es bastante estable, únicamente la sección cercana a la línea de costa (1.5 m de profundidad) muestra cambios verticales de ~0.5 m, de acreción entre el verano y otoño y erosión durante el invierno (Fig. 31).

La sección sur (perfil TB13, Fig. 32) tiene una sección intermareal más baja, con una elevación de 1.25 m y una anchura de 266 m (hasta los 8 m de profundidad), de los cuales 25 m son subaéreos (ver Anexo A.24). La pendiente en la zona subaérea varía de 0.063 en verano a 0.071 en invierno, mientras que la submareal se mantiene estable con un valor promedio de 0.03. La sección subaérea es más estable que la submareal, que muestra variaciones verticales de mayor magnitud alrededor de 4 m de profundidad. Muestra estacionalidad marcada, se erosiona en invierno y se recupera en verano. Además, presenta una barra submareal a 140 m de la costa y 3 m de profundidad, bien formada en verano-otoño (agosto-octubre 2015), que desaparece en primavera (febrero-abril 2016) y vuelve a formarse a finales del próximo verano (2016), alcanzando un perfil muy similar al de agosto 2015 (Fig. 32).



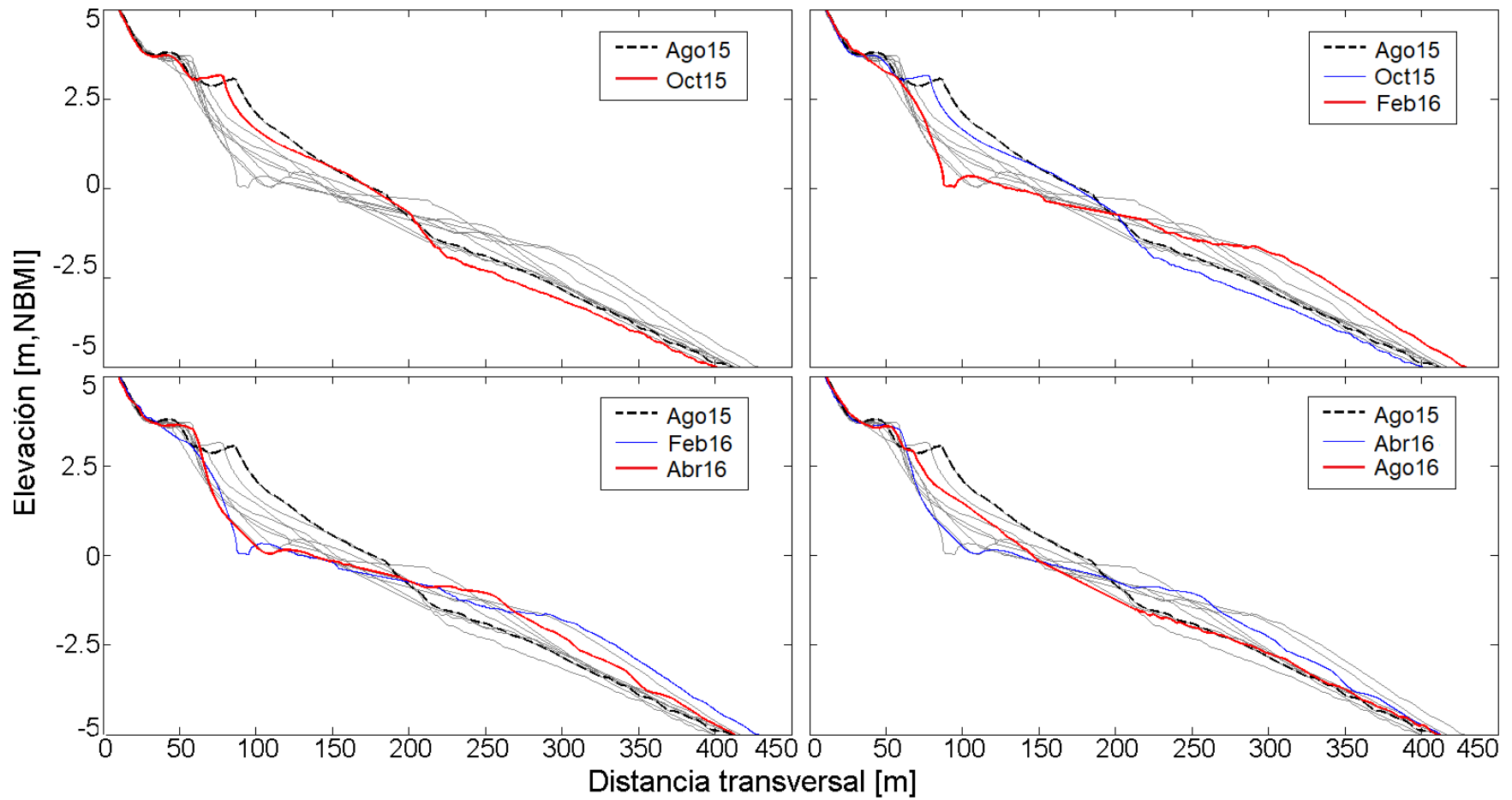
**Figura 31.** Evolución temporal del perfil TB01 (norte) de Stacks de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015), y las líneas azules y rojas muestran los perfiles de las estaciones pasadas y próximas, respectivamente. Con las líneas grises se muestran el resto de los meses.



**Figura 32.** Evolución temporal del perfil TB10 (sur) de Stacks de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015), y las líneas azules y rojas muestran los perfiles de las estaciones pasadas y próximas, respectivamente. Con las líneas grises se muestran el resto de los meses.

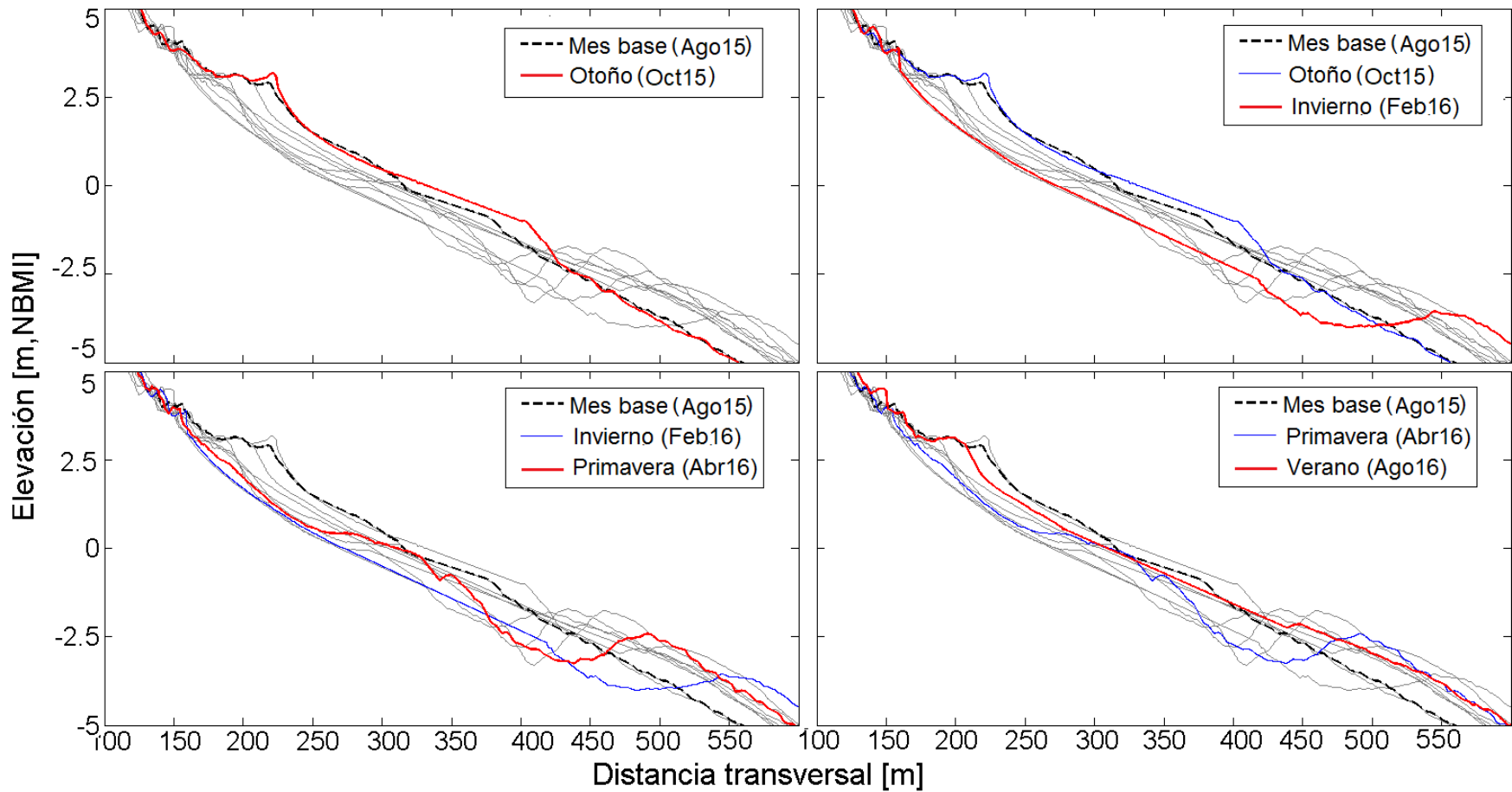
#### **5.3.4. PLAYA DE ARENA**

Para evaluar la variabilidad morfológica de la playa arenosa se analizaron perfiles del norte (TB01) y del sur (TB30). El norte muestra una elevación máxima de 4 m y una anchura de 700 m (hasta los 8 m de profundidad), de los cuales 250–300 m pertenecen a la zona subaérea (ver Anexo A.14). La pendiente es bastante homogénea, con variaciones de 0.026 en verano a 0.034 en invierno en la parte subaérea, y de 0.021 en verano a 0.015 en invierno en la submareal. De verano a otoño la zona subaérea se mantiene estable, existe una berma por encima de 2.5 m, e inicia la formación de una barra submareal a ~1 m de profundidad. En invierno ocurre erosión muy severa (2 m en vertical) entre 3 y -4 m de elevación, causando la pérdida total de la berma y la formación de una barra submareal a 4 m de profundidad. Durante la primavera la barra submareal migra hacia tierra, acomodándose a los 2.5 m de profundidad y, a su vez, se da acreción entre 0 y 2 m de profundidad, favoreciendo la recuperación parcial de la parte erosionada en invierno. En agosto 2016 la sección subaérea quedó parcialmente recuperada de la erosión del invierno 2015-2016, pero no se recupera completamente para agosto 2016, y la barra submareal sigue presente entre 2–5 m de profundidad (Fig. 33).



**Figura 33.** Evolución temporal del perfil TB01 (norte) de Playa Hermosa de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015), y las líneas azules y rojas muestran los perfiles de las estaciones pasadas y próximas, respectivamente. Con las líneas grises se muestran el resto de los meses.

En el extremo sur (perfil TB30, Fig. 34) la playa es más elevada (casi 7 m de elevación) y más angosta, tiene 600 m de anchura (hasta los 8 m de profundidad), de los cuales 146 m pertenecen a la zona subaérea (ver Anexo A.17). La pendiente de la sección subaérea varía de 0.031 en verano a 0.042 en invierno, y en la submareal de 0.021 en verano a 0.017 en invierno. De verano a otoño se observa un pequeño movimiento de la berma hacia el mar y ligera erosión a 2.5–5 m de profundidad. De otoño a invierno la parte subaérea se erosiona de forma muy severa (pérdida de hasta 3 m en vertical a 100 m de distancia) y la cara de la playa retrocede 59 m. Durante ese periodo se da la pérdida total de la berma, y el sedimento erosionado se mueve hacia el mar formando una barra a ~3 m de profundidad. En primavera la zona subaérea está parecida a invierno mientras que la barra submareal se acerca hacia tierra, ubicándose a 1 m de profundidad. En verano del 2016 la sección subaérea recupera parte del sedimento perdido y forma una pequeña berma, sin embargo, no se recupera completamente comparado con agosto del 2015 (Fig. 34).



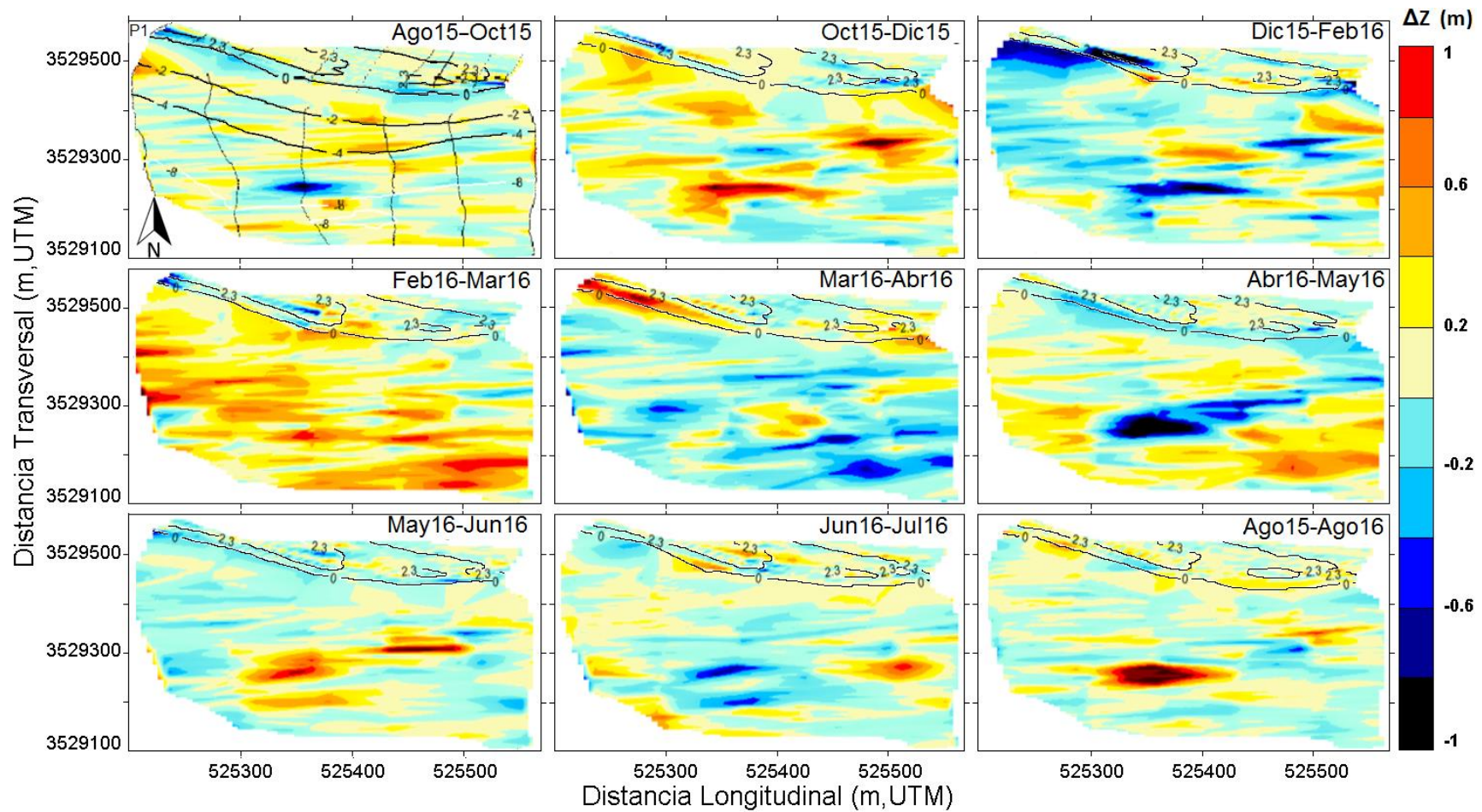
**Figura 34.** Evolución temporal del perfil TB30 (sur) para Playa Hermosa de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015), y las líneas azules y rojas muestran los perfiles de las estaciones pasadas y próximas, respectivamente. Con las líneas grises se muestran el resto de los meses.

## **5.4. EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA DE LOS MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN (MDE)**

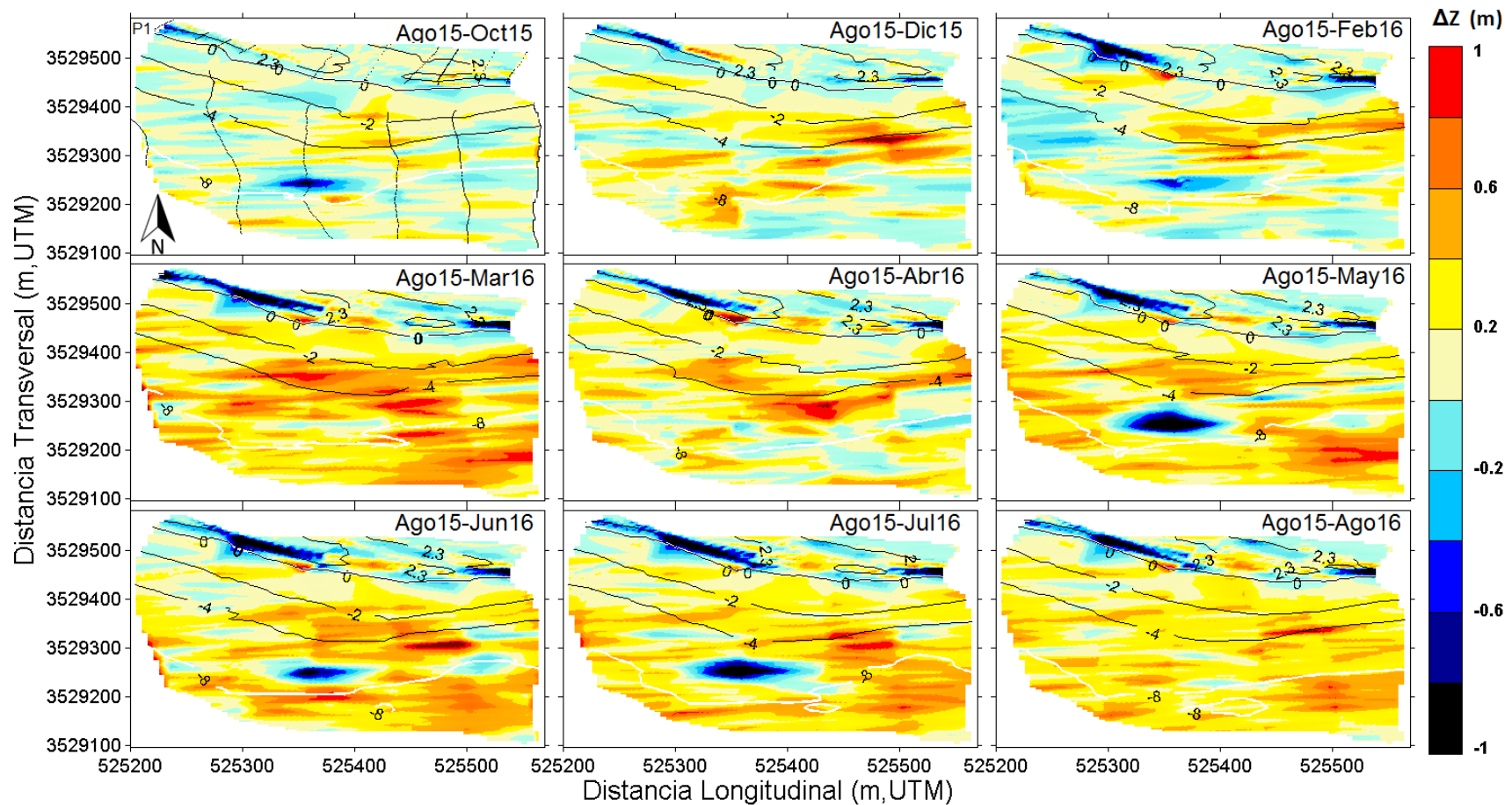
Para determinar los cambios morfológicos estacionales en cada una de las playas, y poder así, identificar zonas de acreción y erosión a lo largo y ancho de las mismas, se analizaron los Modelos Digitales de Elevación (MDE). De la figura 35 a la 42 se muestran los MDEs para las diferentes playas y con diferentes escalas de elevación mostradas por las barras de colores. En cada figura se marcan las isóbatas de 2.3 y 0 m para indicar la zona intermareal, las de 0 y -4 m para mostrar la zona submareal cercana, y la isóbata de -8 m como representación del límite submareal inferior. La primera subfigura de cada figura (ago15-Oct15) muestra los perfiles topo-batimétricos medidos y utilizados para la elaboración de los MDEs.

### **5.4.1. PLAYA DE CANTO RODADO**

Durante el año de estudio, la playa de San Miguel presenta una diferencia de elevación del ~1 m (de 1 m a -1.5 m). De verano a otoño ocurre ligera erosión (-0.5 m) en la zona intermareal, pero la mayor erosión se da durante el invierno, con una pérdida vertical de hasta 1 m en la mitad norte, tanto en la sección subaérea como en la submareal (Fig. 35). Entre febrero y marzo (2016) la zona submareal recibe sedimento, y para abril la sección subaérea norte anteriormente erosionada se recupera completamente. Entre abril y mayo (2016) la sección sur se erosiona ligeramente, y una parte de la mitad de la zona subaérea se recupera de la erosión (Fig. 35). La figura 36 muestra la evolución morfológica de la playa entre agosto 2015 y agosto 2016. De agosto 2015 a febrero 2016 la parte submareal se erosiona hasta 1m en los extremos sur y norte, y la zona submareal se erosiona ligeramente en el norte y se da acreción en el sur (~0.5 m). A partir de primavera, la parte submareal se recupera, a excepción de un bajo de más de un metro ubicado a -6 m en TB03 (perfil al oeste del arroyo), y que se recuperó a finales de verano (Ago16).



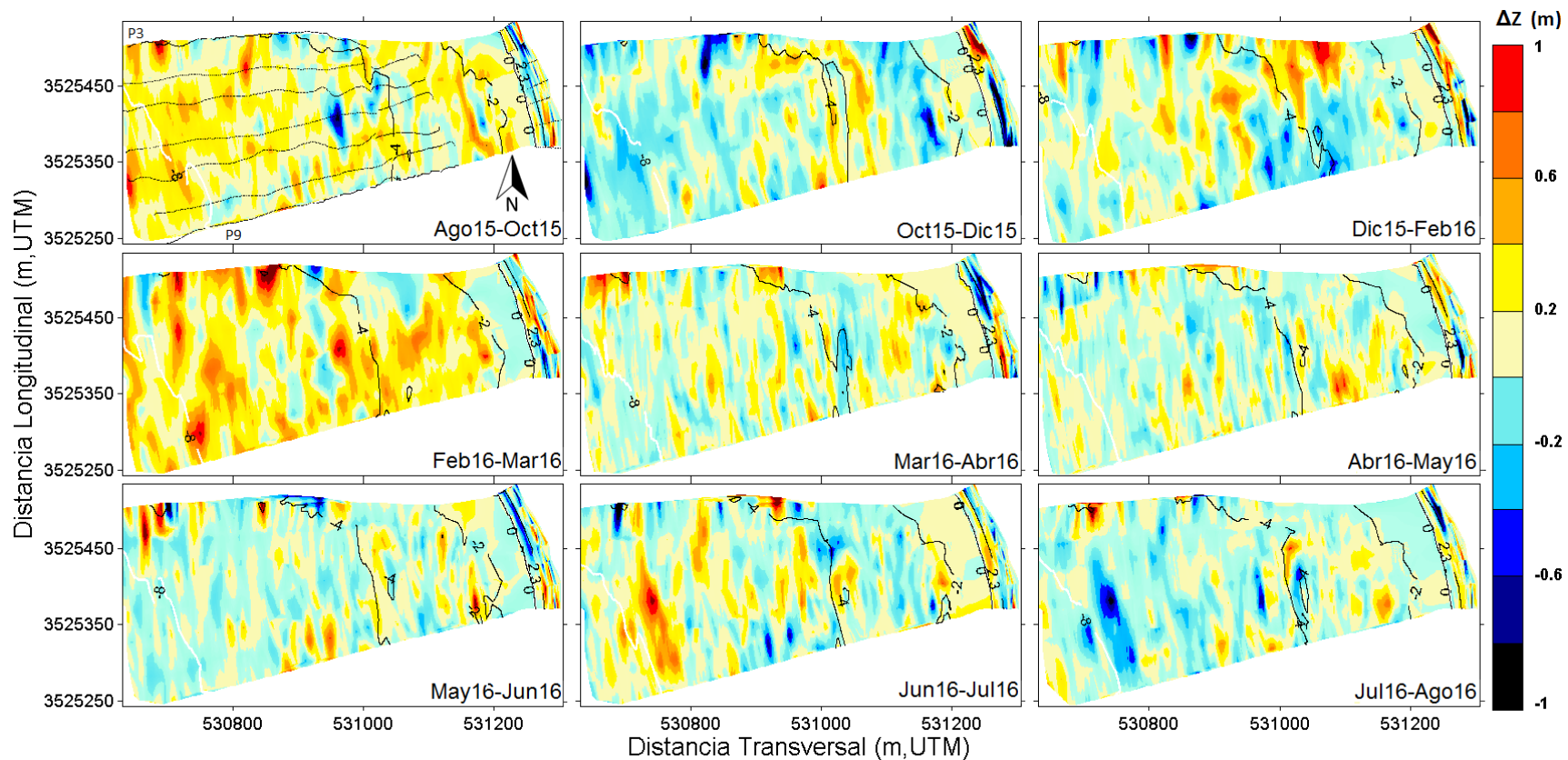
**Figura 35.** Diferencias Parciales (DP) para la playa de San Miguel (SM) de agosto 2015 a agosto 2016. La primera subfigura (esquina superior izquierda) muestra la ubicación de los perfiles topo-batimétricos medidos. Todas las figuras muestran las isóbatas de 0 y 2.3 m para mostrar la zona intermareal. La barra de colores muestra las diferencias de elevación en metros.



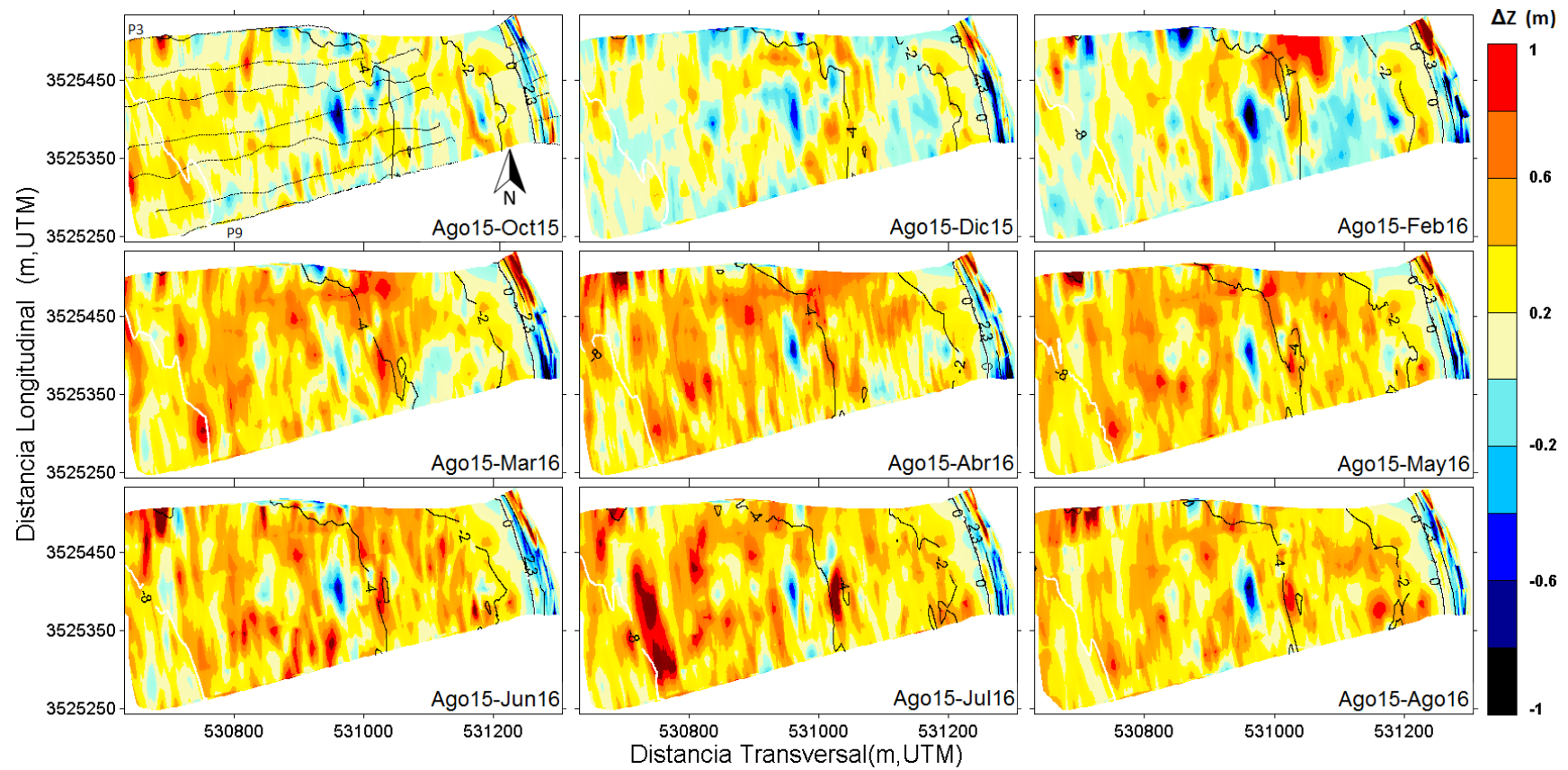
**Figura 36.** Diferencias Parciales Acumuladas (DPA) para San Miguel (SM) de agosto 2015 a agosto 2016. La primera subfigura (esquina superior izquierda) muestra la ubicación de los perfiles topo-batimétricos medidos. Todas las figuras muestran las isóbatas de 0 y 2.3 m (intermareal) y -4 m (submareal cercana) y -8 m (submareal lejana). La barra de colores muestra las diferencias de elevación en metros.

#### **5.4.2. PLAYA DE GUIJARRO**

La playa Granada Cove presenta cambios morfológicos verticales del ~1 m (de 1.5 a -1 m). A parte de variaciones transversales, se observan cambios longitudinales muy marcados en la playa subaérea. De verano a otoño la zona subaérea presenta erosión en el norte y depositación en el sur. Durante el invierno, la dirección de la erosión se invierte, y la mayor erosión se da en el sur (de hasta -0.6 m) y acreción en el norte (de hasta 1 m) (Fig. 37); lo que sugiere la existencia de eventos de rotación de playa. Entre marzo y abril 2016 la sección subaérea del norte se erosiona y la del sur gana sedimento. Para mayo 2016 la sección subaérea del norte se recupera, posiblemente por el transporte transversal de arena de la sección submareal cercana. Entre mayo y junio la sección intermareal del norte se vuelve a erosionar, y se recupera parcialmente a lo largo del verano (Fig. 38). Al igual que en SM, en esta playa se observa la llegada de sedimento a la sección submareal entre febrero y marzo 2016. Durante el invierno (entre diciembre y marzo) la sección submareal del norte gana sedimento y la del sur se erosiona, y entre primavera y verano el sedimento del norte se redistribuye hacia el sur (Fig.38).



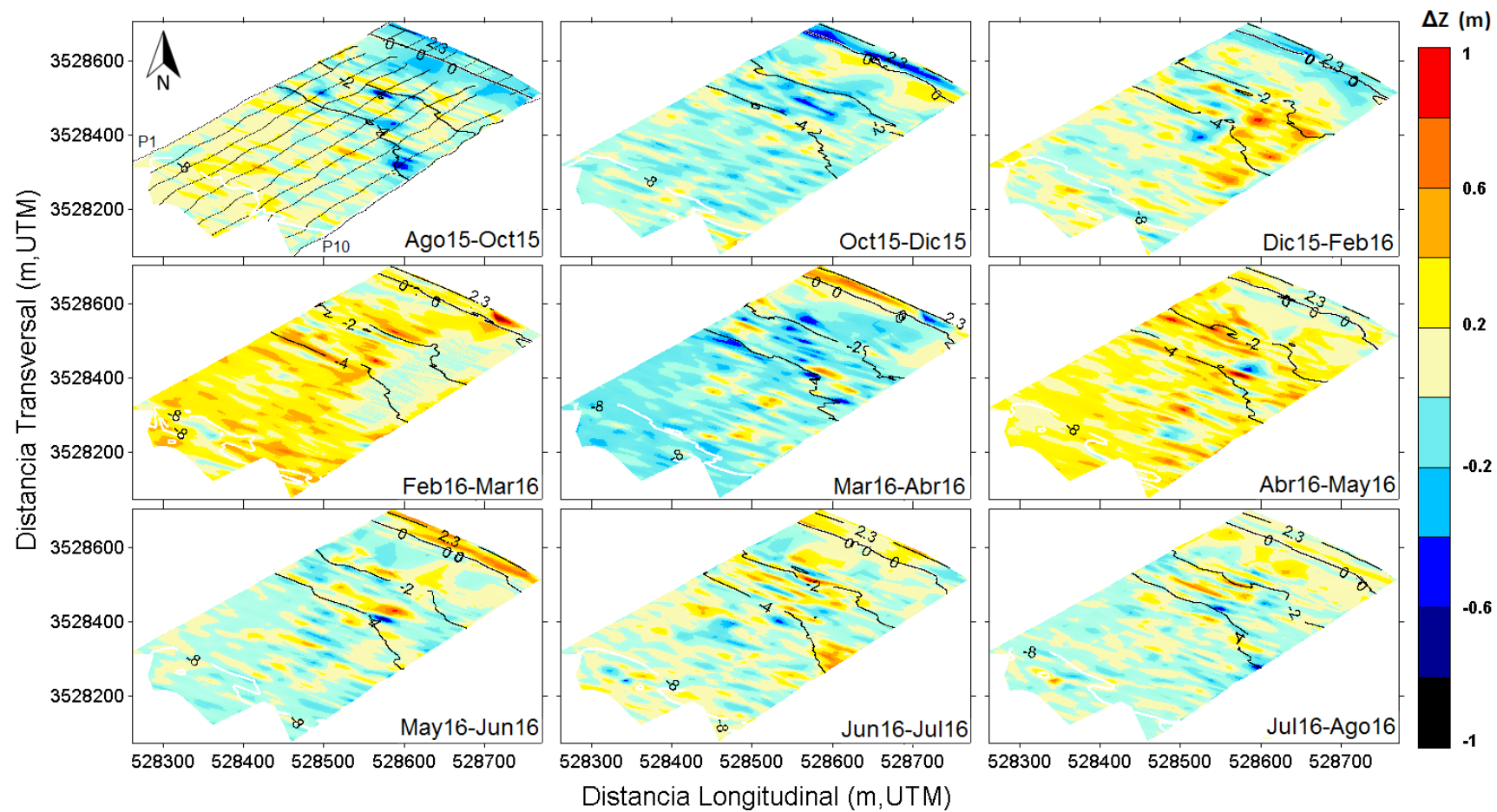
**Figura 37.** Diferencias Parciales (DP) para Granada Cove (GC) de agosto 2015 a agosto 2016. La primera subfigura (esquina superior izquierda) muestra la ubicación de los perfiles topo-batimétricos medidos. Las isóbatas de 0 y 2.3 m muestran la zona intermareal y la de -4 m la submareal cercana. La barra de colores muestra las diferencias de elevación en metros



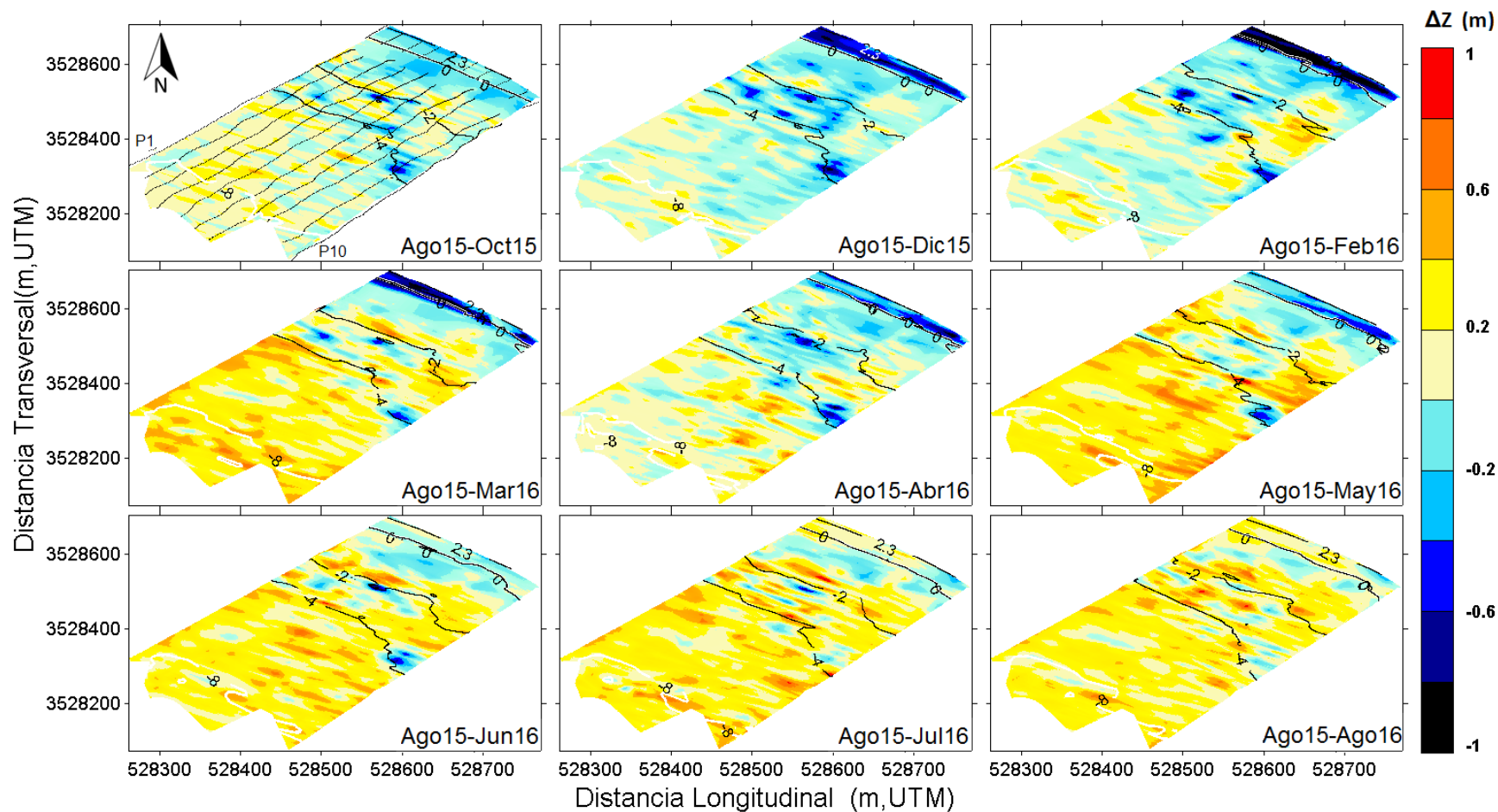
**Figura 38.** Diferencias Parciales Acumuladas (DPA) para Granada Cove (GC) de agosto 2015 a agosto 2016. La primera subfigura (esquina superior izquierda) muestra la ubicación de los perfiles topo-batimétricos medidos. Las isóbatas de 0 y 2.3 m muestran la zona intermareal y la de -4 m la submareal cercana. La barra de colores muestra las diferencias de elevación en metros.

### 5.4.3. PLAYA MIXTA

La playa mixta de Stacks presenta una variabilidad morfológica de 1 a -1 m en elevación y una estacionalidad marcada. En otoño, la zona subaérea y submareal cercana se erosionan (~0.4 m), y presentan su máxima erosión de octubre a diciembre 2015, acumulando el sedimento erosionado en profundidades de entre 1 y 2 m (Fig.39). Al igual que en las playas de canto rodado, esta playa recibió sedimento entre febrero y marzo 2016. Entre marzo y abril la playa subaérea gana sedimento y la sección submareal se erosiona, y entre abril y mayo la playa vuelve a recibir arena. En la transición de primavera-verano (mayo-junio) la zona subaérea vuelve a ganar sedimento, que es distribuido hacia la sección submareal durante el verano (Fig.39). La figura 40 muestra la evolución morfológica durante el periodo de estudio. Se observa que la sección subaérea se empieza a erosionar a partir de octubre 2015, llegando su máxima erosión en febrero 2016. Además, la erosión se extiende a la parte submareal de la región norte, presentando una acumulación de sedimento en la zona submareal de la región sur. En marzo 2016 se observa la llegada de sedimento en la sección submareal (de hasta 0.5 m) por debajo de los 4 m de profundidad. Este volumen es redistribuido durante el verano, lo que ocasiona que el sedimento migre hacia la costa llegando a la isóbata entre los -2 y -4 m en julio y recuperando la sección subaérea para agosto 2016.



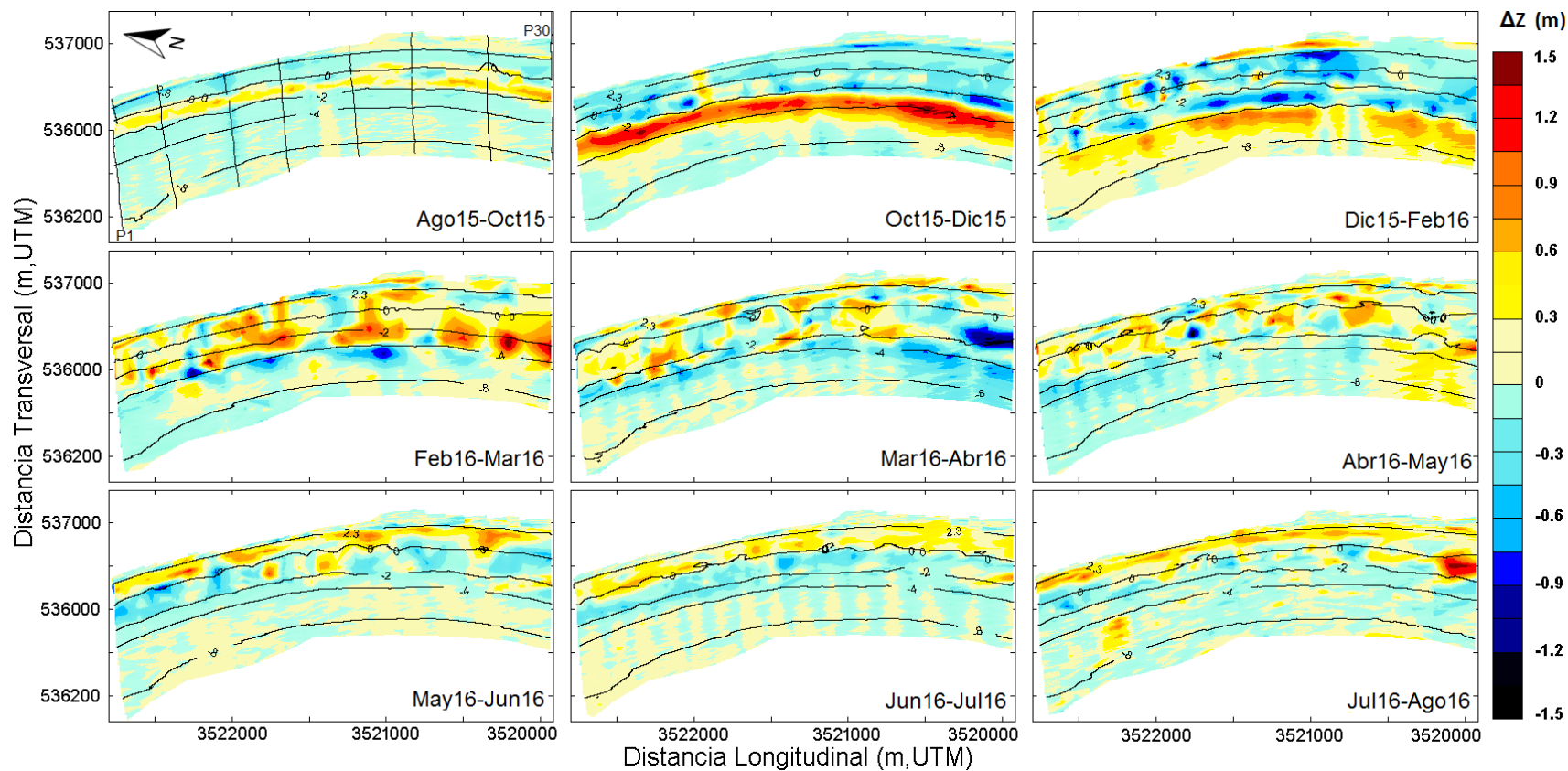
**Figura 39.** Diferencias Parciales (DP) para Stacks (STX) de agosto 2015 a agosto 2016. La primera subfigura (esquina superior izquierda) muestra la ubicación de los perfiles topo-batimétricos medidos. Las isóbatas de 0 y 2.3 m muestran la zona intermareal y la de -4 m la submareal cercana. La barra de colores muestra las diferencias de elevación en metros.



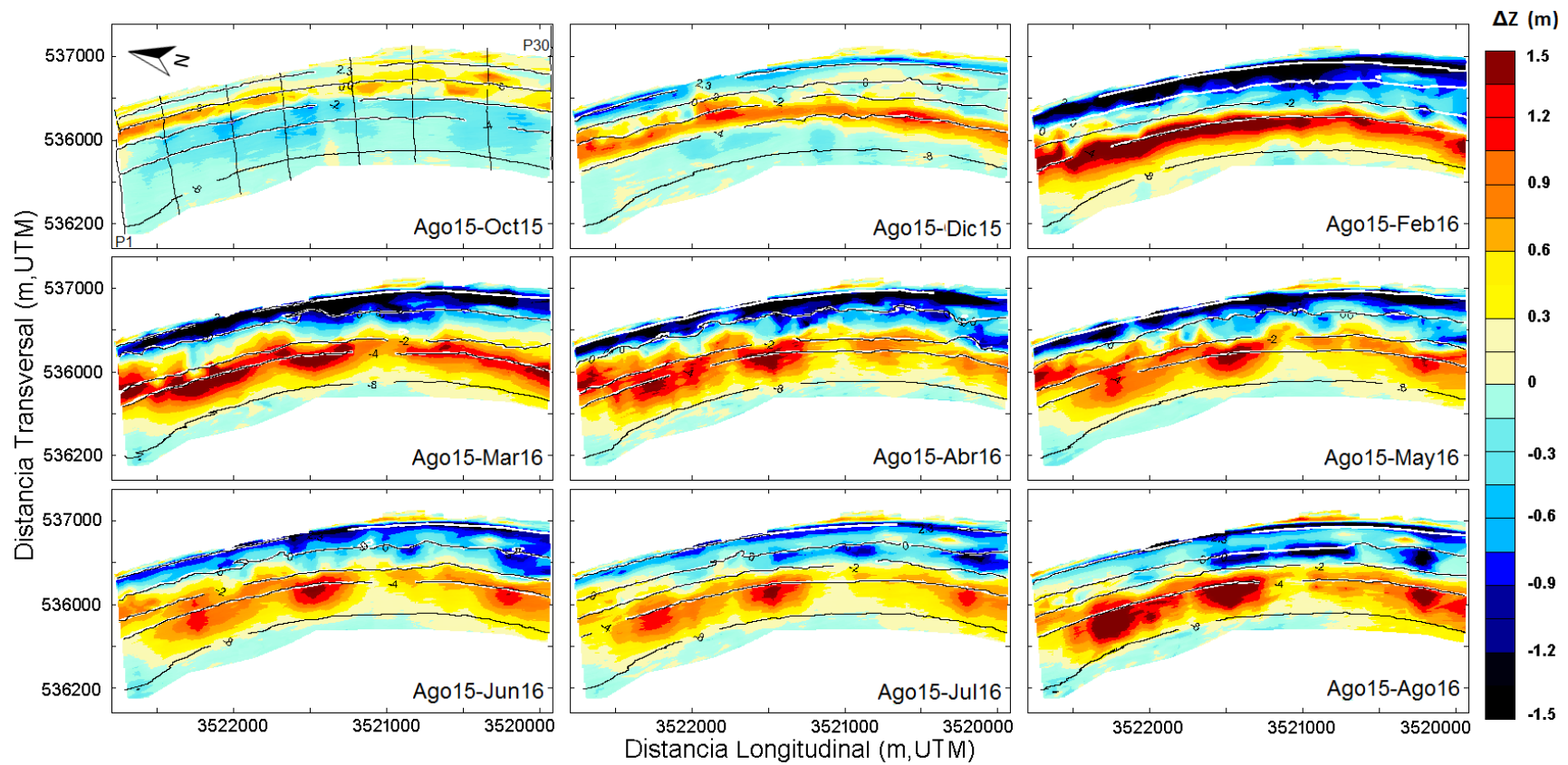
**Figura 40.** Diferencias Parciales Acumuladas (DPA) para Stacks (STX) de agosto 2015 a agosto 2016. La primera subfigura (esquina superior izquierda) muestra la ubicación de los perfiles topo-batimétricos medidos. Las isóbatas de 0 y 2.3 m muestran la zona intermareal y la de -4 m la submareal cercana. La barra de colores muestra las diferencias de elevación en metros

#### **5.4.4. PLAYA DE ARENA**

La playa arenosa de Playa Hermosa presenta una diferencia en elevación de  $\pm 1.5$  m y una estacionalidad muy marcada. Se observa la formación de una barra submareal entre las isóbatas de los -2 y -4 m en invierno (octubre a diciembre 2015) asociada a la erosión de la sección subaérea y submareal lejana. La barra migra hacia la costa en primavera y se acopla a la sección subaérea, favoreciendo su recuperación parcial hasta agosto 2016 (Fig.41). La figura 42 muestra la evolución morfológica de la playa, y muestra que la sección subaérea presenta su máxima erosión (-1.5 m) en febrero del 2016. A partir de marzo la barra submareales rítmica (no lineal), y aporta algo de sedimento a la sección submareal cercana. En verano 2016, la barra submareal migra nuevamente hacia la isóbata de los -4 m llegando incluso a mantenerse entre los -4 y -8 m. En agosto 2016 la parte subaérea no se recupera por completo de la erosión del invierno, la parte más erosionada es la del sur, mientras que la submareal del norte muestra mayor depositación (Fig.42).



**Figura 41.** Diferencias Parciales (DP) para Playa Hermosa (PH) de agosto 2015 a agosto 2016. La primera subfigura (esquina superior izquierda) muestra la ubicación de los perfiles topo-batimétricos donde se colectaron muestras de sedimento (TB01, TB05, TB10, TB14, TB19, TB23, TB27 y TB30). Las isóbatas de 0 y 2.3 m muestran la zona intermareal, y la de -2, -4 y -8 m la submareal. La barra de colores muestra las diferencias de elevación en metros.



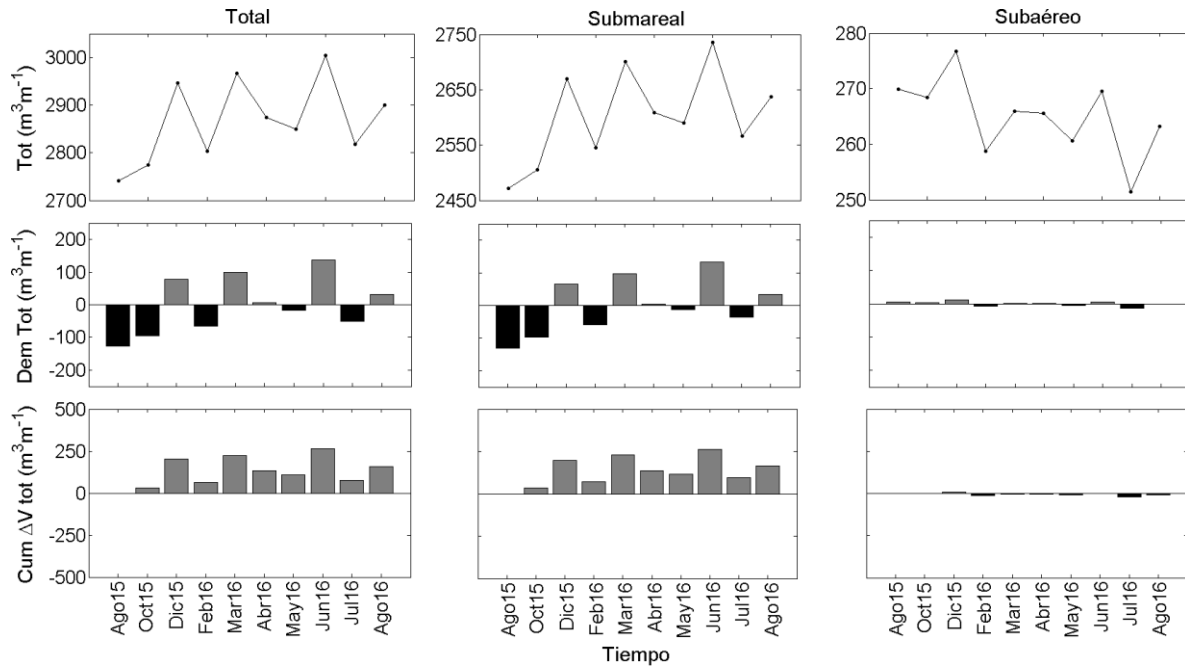
**Figura 42.** Diferencias Parciales Acumuladas (DPA) para Playa Hermosa (PH) de agosto 2015 a agosto 2016. La primera subfigura (esquina superior izquierda) muestra la ubicación de los perfiles topo-batimétricos donde se colectaron muestras de sedimento (TB01, TB05, TB10, TB14, TB19, TB23, TB27 y TB30). Las isóbatas de 0 y 2.3 m muestran la zona intermareal, y la de -2, -4 y -8 m la submareal. La barra de colores muestra las diferencias de elevación en metros.

## 5.5. VARIABILIDAD VOLUMÉTRICA

Con el fin de cuantificar y comparar los cambios morfológicos a lo largo del año entre las diferentes playas, se calculó el volumen total (de -8 a 4 m de elevación) de cada playa ( $\text{m}^3\text{m}^{-1}$ ) y los volúmenes para la zona intermareal (0 a 4 m de elevación) y la submareal (de -8 a 0 m). Para entender la variabilidad volumétrica e identificar estacionalidad, a cada uno de los volúmenes calculados se le restó el promedio volumétrico del periodo de estudio. Por último, se calcularon las diferencias acumuladas para mostrar la evolución volumétrica de agosto 2015 a agosto 2016 en cada sección de playa.

### 5.5.1. PLAYA DE CANTO RODADO

La figura 43 muestra la variabilidad volumétrica de la playa de San Miguel de agosto 2015 a agosto 2016. El 91% del volumen total se encuentra en la zona submareal y sólo el 9% en la subaérea. Su variabilidad volumétrica máxima fue de  $\pm 132 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  durante el periodo de estudio, siendo la variabilidad máxima subaérea únicamente de  $\pm 13 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ . La sección subaérea presenta volúmenes positivos de verano a principios de invierno, con un máximo volumen en diciembre 2015 ( $11.70 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ). De diciembre a febrero se erosionan  $17.94 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ , de invierno a primavera ocurren fluctuaciones de  $\pm 5 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ , y la mayor erosión ocurre en verano ( $-13.57 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  en julio 2016). La zona submareal presenta una tendencia a ganar sedimento de verano a invierno (excepto de diciembre 2015 a febrero 2016 con una pérdida de  $124.62 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ), y presenta una pérdida máxima en agosto 2015 ( $-131.23 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ) y junio 2016 ( $132.63 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ). En términos generales la playa no presenta estacionalidad y presenta una ganancia total de  $159 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  durante el periodo de estudio, con una pérdida de  $6.67 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  en la zona subaérea y ganancia de  $165.68 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  en la submareal.

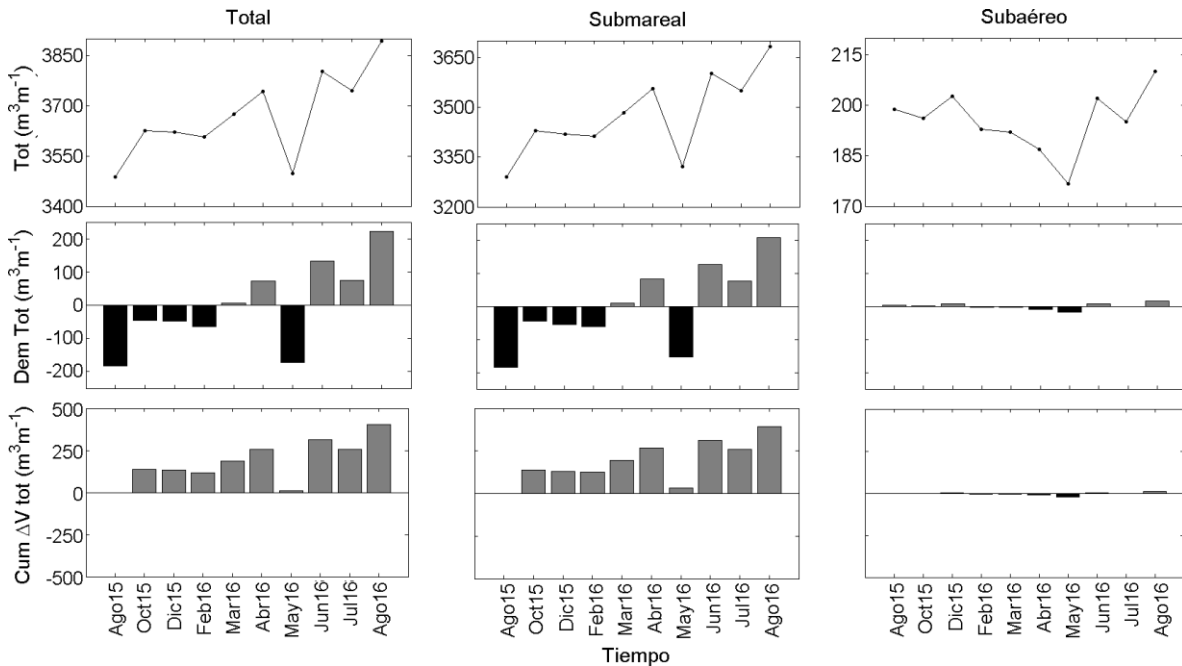


**Figura 43.** Serie volumétrica temporal ( $\text{m}^3\text{m}^{-1}$ ) para la playa de San Miguel (SM) de agosto 2015 a agosto 2016. La fila superior presentan los volúmenes totales, la fila central los volúmenes sin promedio y la fila inferior las diferencias volumétricas acumuladas.

### 5.5.2. PLAYA DE GUIJARRO

La figura 44 muestra la variabilidad volumétrica de la playa de Granada Cove de agosto 2015 a agosto 2016. El 95% del volumen total de la playa se encuentran en la zona submareal y sólo el 5% en la zona subaérea. La variabilidad volumétrica máxima es de  $\pm 202 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ , de los cuales sólo  $\pm 17 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  corresponden a la zona subaérea. La zona subaérea muestra estacionalidad; gana sedimento durante el verano de 2015, alcanzando un máximo en diciembre 2015 ( $7.43 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ), pierde  $26.10 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  desde diciembre 2015 hasta mayo 2016 (se da una pérdida de  $18.67 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ) y lo recupera durante el verano 2016 llegando a su máxima ganancia en agosto 2016 ( $14.70 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ),  $11.28 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  más que en agosto 2015. La variabilidad volumétrica sin promedio indica que la zona submareal tiene un déficit volumétrico de agosto 2015 a abril 2016 pero lo recupera de abril a agosto 2016. Entre abril y mayo 2016 se da una gran pérdida de  $253.31 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ , que recupera en un mes, y sigue incrementando su volumen, hasta llegar a una ganancia de  $392.31 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  en agosto 2016. En términos generales la playa presentó un balance positivo total de

403.62  $\text{m}^3\text{m}^{-1}$ , de los cuales 11.31  $\text{m}^3\text{m}^{-1}$  se dieron en la sección subaérea y 392.31  $\text{m}^3\text{m}^{-1}$  en la submareal.

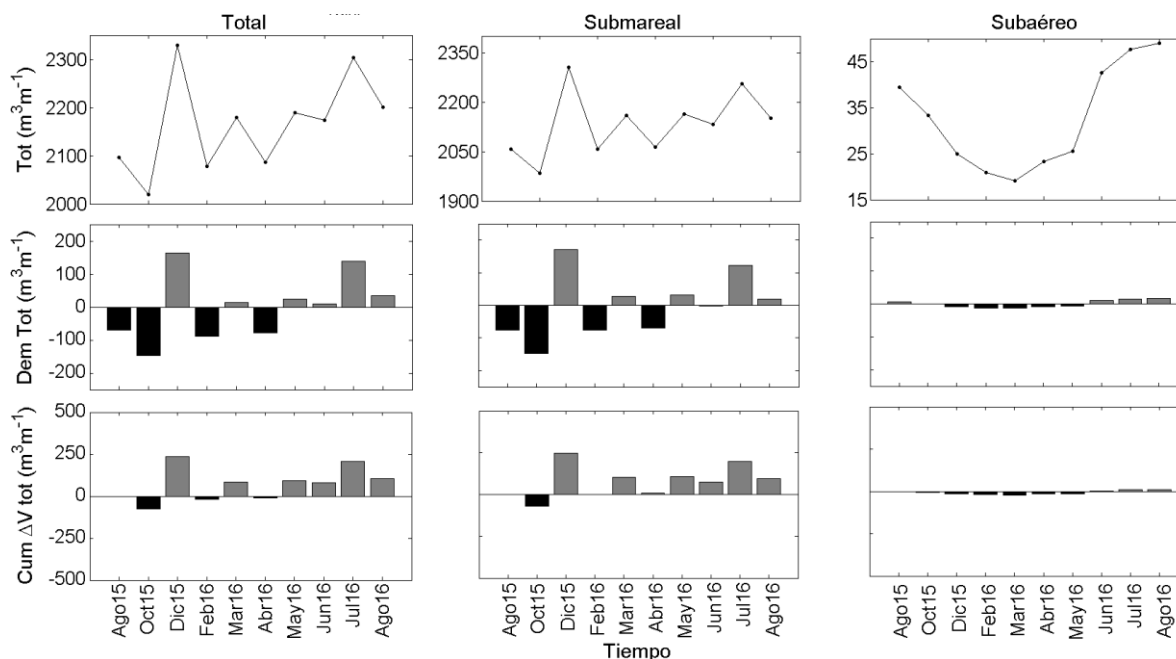


**Figura 44.** Serie temporal volumétrica (en  $\text{m}^3\text{m}^{-1}$ ) para la playa de Granada Cove (GC) de agosto 2015 a agosto 2016. Los paneles superiores presentan el volumen total, el subaéreo y submareal. La fila superior presentan los volúmenes totales, la fila central los volúmenes sin promedio y la fila inferior las diferencias volumétricas acumuladas.

### 5.5.3. PLAYA MIXTA

La figura 45 muestra la variabilidad volumétrica para la playa mixta de Stacks, la cual presenta sólo el 2% del volumen total en la zona subaérea y el 98% restante en la zona submareal. La playa presenta una variabilidad máxima total de  $\pm 98 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ , de los cuales  $\pm 15 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  en la zona subaérea. La zona subaérea muestra una estacionalidad muy marcada, con valores positivos ( $6.9 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ) en verano (agosto 2015) a partir del cual pierde sedimento hasta a finales de invierno (pérdida máxima de  $13.44 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  en marzo 2016). De marzo a agosto 2016 recupera el sedimento perdido, presentando valores positivos a partir de junio 2016 y llegando a su ganancia máxima en agosto 2016 ( $16.37 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ). El comportamiento volumétrico de la zona submareal es completamente diferente, no presenta estacionalidad, sino que una tendencia a ganar sedimento con una serie

de fluctuaciones. Su máxima pérdida se da en octubre 2015 ( $147.61 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ), después de la cual presenta un aumento drástico de  $319.53 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  y alcanzando su ganancia máxima en diciembre 2015 ( $171.92 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ). En términos generales la playa presenta un balance volumétrico positivo para el año de estudio, con una ganancia de  $104.82 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ , de los cuales  $9.48 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  son en la zona subaérea y  $95.34 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  en la submareal.

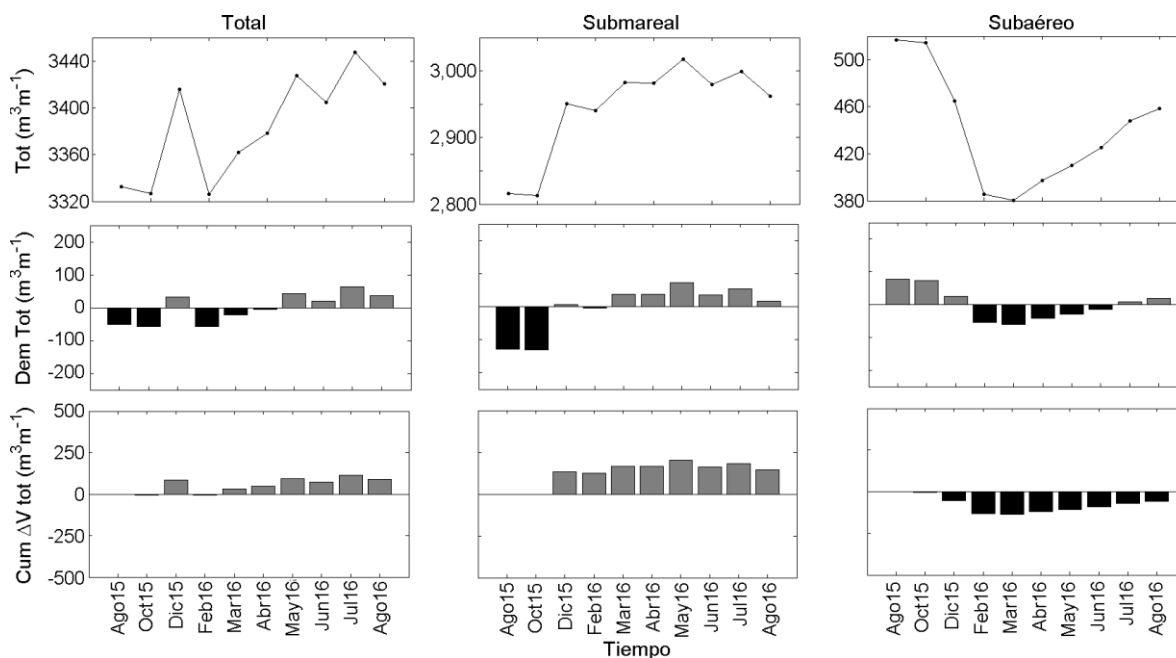


**Figura 45.** Serie temporal volumétrica (en  $\text{m}^3\text{m}^{-1}$ ) para la playa mixta de Stacks (STX) de agosto 2015 a agosto 2016. La fila superior presentan los volúmenes totales, la fila central los volúmenes sin promedio y la fila inferior las diferencias volumétricas acumuladas.

#### 5.5.4. PLAYA DE ARENA

La figura 46 muestra la variabilidad volumétrica para la playa de arena de Playa Hermosa, en la cual el 13% del volumen total se encuentra en la zona subaérea y el 87% restante en la submareal. La playa presenta una variabilidad máxima de  $\pm 61 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  en la zona subaérea y  $\pm 102 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  en la submareal. Ambas zonas presentan un comportamiento volumétrico opuesto. La playa subaérea muestra una estacionalidad muy marcada con un nivel volumétrico alto en agosto 2015 ( $76.51 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  por encima del promedio) después del cual disminuye hasta llegar a su máxima pérdida en marzo 2016 ( $59.93 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ), y a partir de esta fecha

comienza a recuperarse nuevamente. La playa submareal presenta su mayor pérdida en octubre ( $131.24 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ) y su máxima ganancia en mayo ( $73.2 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ). La sección subaérea presenta una pérdida de  $136.45 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  entre agosto 2015 y marzo 2016, mientras que la submareal gana  $166.13 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  en ese periodo de tiempo. Entre marzo y agosto 2016 la sección subaérea recupera parte de la arena perdida, mientras que la sección submareal se presenta bastante estable, con pequeñas fluctuaciones que a finales de verano tienden a disminuir. En términos totales, la playa presenta un balance positivo ( $87.45 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ) para el periodo de estudio, sin embargo, la zona subaérea presenta una pérdida de  $58.02 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ , mientras que la submareal gana  $145.52 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ .



**Figura 46.** Serie temporal volumétrica (en  $\text{m}^3\text{m}^{-1}$ ) para la playa arenosa de Playa Hermosa (PH) de agosto 2015 a agosto 2016. La fila superior presentan los volúmenes totales, la fila central los volúmenes sin promedio y la fila inferior las diferencias volumétricas acumuladas.

## 6. DISCUSIÓN

---

Este trabajo ha analizado la morfodinámica de cuatro playas cercanas, pero sedimentológicamente muy diferentes en el periodo de agosto 2015 a agosto 2016. A través de un análisis granulométrico, se obtuvo que las cuatro playas de estudio se clasificaban como: de canto rodado (San Miguel), de guijarro (Granada Cove), mixta: de guijarro y arena (Stacks) y de arena (Playa Hermosa), con  $D_{50}$  anual promedio de 295 mm, 64 mm, 21 mm y 0.26 mm, respectivamente.

Durante el año de estudio (agosto 2015 a agosto 2016) el oleaje presentó condiciones menos energéticas durante verano y más intensas en invierno con  $H_s$  promedio de 1.27 m,  $T_p$  asociado de 14 s y una potencia de  $7.46 \text{ kWm}^{-1}$ , con una dirección principalmente del suroeste. Comparando el oleaje durante este periodo con años anteriores (Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2017), se identifica que el año de estudio corresponde con el evento de El niño 2015-2016. Por tanto, las condiciones de invierno (diciembre 2015-abril 2016) fueron de mayor energía y se extendieron un poco más que en otros años. En términos generales las playas de sedimento grueso reciben mayor potencia del oleaje siendo la playa de guijarro la que mayor potencia recibe ( $5.26 \text{ kWm}^{-1}$ ), la playa de canto rodado recibe 5% menos potencia, seguida por la playa arenosa con 20% menos, siendo la playa mixta la que recibe menor potencia, 45% menos que la playa de guijarro. Esta disminución en la potencia del oleaje concuerda con Castro-Osuna (2003) quien reporta mayores alturas de ola en la región norte de BTS, principalmente Punta San Miguel y Punta Morro (con un promedio de 1.60 m y 1.08 m respectivamente) y menores alturas para la zona sur de la playa, cercano a la playa municipal (0.93 m)

Este trabajo concuerda en que la morfodinámica de las playas está principalmente controlada por el tamaño del sedimento e intensidad del oleaje incidente (Bascom, 1951), siendo el tamaño del sedimento el factor más relevante

(King, 1972, 1980). Zenkovich (1967) demostró que cuanto más grueso es el sedimento, mayor será la pendiente de la playa, en este estudio, sin embargo, se encontró una mayor pendiente subaérea en la playa de guijarro (0.25) que en la playa de canto rodado (0.17) seguida por la mixta (0.12), siendo la playa de arena la de menor pendiente (0.05). Este resultado coincide con lo reportado por Oak (1984) quien indicó que en playas de sedimento muy grueso el transporte ocurre sólo con oleaje de alta energía, y normalmente se aplana la cara de la playa (Bascom 1951; Shepard 1963), ocasionando pendientes más bajas en la cara de playas de canto rodado como lo observado en este estudio (Fig.50)

La mayoría de las playas estudiadas presentan estacionalidad en el tamaño de sedimento, siendo de mayor tamaño en invierno asociado a condiciones de oleaje energéticas ( $7.46 \text{ kWm}^{-1}$ ), y por ende, relacionado con la erosión del perfil de la zona subaérea. El tamaño de grano es menor durante verano, asociado a condiciones de oleaje menos energéticas ( $2.35 \text{ kWm}^{-1}$ ) y a una depositación del sedimento en el perfil subaéreo. La playa de guijarro es una excepción, porque presenta sedimento más pequeño en invierno y mayor en verano, asociado a condiciones de oleaje energético que erosionan el perfil subaéreo en la región sur de la playa, lo que permite que las arenas gruesas queden expuestas (Tabla IV).

**Tabla IV.** Promedio del  $D_{50}$  (mm) para las diferentes playas de estudio (San Miguel, SM; Granada Cove, GC; Stacks, STX; Playa Hermosa, ENS), promedios anuales para las distintas zonas de la playa y el  $D_{50}$  promedios para cada playa durante todo el periodo de estudio.

	<b>SM</b>	<b>GC</b>	<b>STX</b>	<b>ENS</b>
Supramareal	166.23	65.86	32.87	0.27
Intermareal	432.70	62.36	35.29	0.25
Submareal	---	---	0.25	0.25
Invierno	321.40	54.64	36.99	0.27
Primavera	272.11	65.78	32.08	0.27
Verano	302.46	74.24	11.40	0.23
<b><math>\overline{D}_{50}</math></b>	<b>294.87</b>	<b>64.33</b>	<b>20.89</b>	<b>0.26</b>

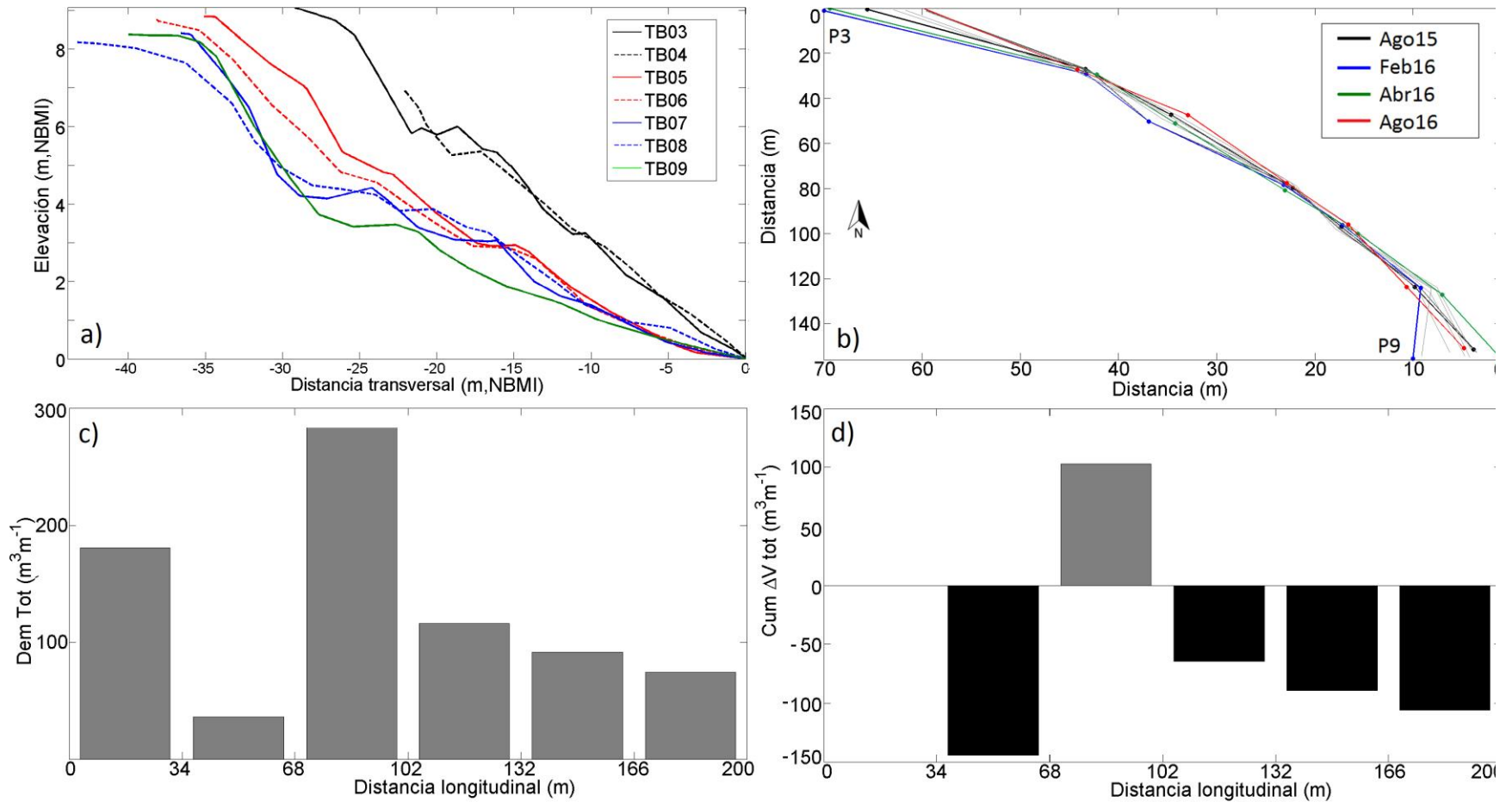
Espacialmente la playa de canto rodado presenta una mayor variabilidad de sedimento entre la zona supramareal y la intermareal, siendo mayor el tamaño de grano en esta última (Tabla IV). Esto se asocia a una mayor concentración de energía del oleaje en esta zona (Chen *et al.*, 2011; Karunarathna *et al.*, 2016). Por otro lado, la playa de guijarros muestra una mayor variabilidad longitudinal, presentando guijarros de mayor tamaño en el norte que en el sur. . La diferencia de tamaño en esta playa se debe a que los guijarros más grandes del extremo norte no se mueven fácilmente, lo que favorecen una morfología de perfil convexa. Por el contrario, los guijarros pequeños del extremo sur se mueven con mayor facilidad, dando lugar a una morfología de perfil cóncava (Komar, 1998; Romanczyk *et al.*, 2005; Trindade y Ramos-Pereira, 2009; Chen *et al.*, 2016) (Fig.47a). Este cambio en la morfología del perfil está asociado a un ensanchamiento en el extremo norte durante invierno y primavera, mientras que el extremo sur se estrecha (Fig.47d), y el comportamiento morfológico se invierte durante el verano, favoreciendo una rotación de la playa. En la playa mixta, el extremo norte presenta cambios de tamaño de sedimento sutiles, de arenas finas a medias, mientras que el extremo sur presenta cambios drásticos, de arenas a guijarros en la parte intermareal y de arenas a un fondo rocoso en la submareal. Por último, la variabilidad del tamaño de sedimento en la playa de arena es mucho menor que en las otras playas, y está compuesta por arenas medias en la zona supramareal y finas en la intermareal y submareal (Tabla IV), con una ligera disminución de tamaño hacía el sur, lo que concuerda con Martínez-Martínez (2015).

Las playas de estudio presentan, en promedio, el 92% de su volumen en la zona submareal, lo que indica la gran importancia de evaluar la morfodinámica de la playa submareal (Vidal-Ruiz, 2016). Las playas de canto rodado y de arena presentan las menores variabilidades morfológicas totales ( $\pm 132$  y  $\pm 61$   $m^3m^{-1}$ , respectivamente), además, ambas playas presentan un balance negativo en la zona subaerea durante el periodo de estudio. Por otro lado, la playa de guijarro y la mixta presentan la mayor variabilidad volumétrica total ( $\pm 202$  y  $\pm 156$   $m^3m^{-1}$ ,

respectivamente) con un balance positivo en la zona subaérea (Tabla V). Siendo la playa de arena y guijarro las que presentan mayor variabilidad subaérea ( $\pm 61$  y  $\pm 17 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  respectivamente) esto se relaciona a mayores potencias del oleaje ( $3.46$  y  $5.26 \text{ kWm}^{-1}$ ) siendo las playas mixta ( $\pm 15 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ) y de canto rodado ( $\pm 13 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ) las que presentan menor variabilidad subaérea, esta última recibe menor potencia del oleaje ( $2.89 \text{ kWm}^{-1}$ ) mientras que la playa de canto rodado a pesar de presentar potencias altas ( $5 \text{ kWm}^{-1}$ ) el tamaño del sedimento ( $295 \text{ mm}$ ) no permite su movilización.

**Tabla V.** Variabilidad volumétrica para las distintas playas de estudio. Vol. Tot indica el volumen total de sedimento que presenta la playa en el periodo de estudio; %SM y %SA indica que porcentaje del total de sedimento pertenece a la zona submareal y subaérea respectivamente; Acum indica el volumen acumulado durante el periodo de estudio para la zona submareal (SM), subaérea (SA) y el total de la playa (Tot) y por último  $\Delta V$  indica la variabilidad volumétrica que presenta la playa.

	Vol Tot	% SM	% SA	AcumSA ( $\text{m}^3\text{m}^{-1}$ )	AcumSM ( $\text{m}^3\text{m}^{-1}$ )	AcumTot ( $\text{m}^3\text{m}^{-1}$ )	$\Delta V$ ( $\text{m}^3\text{m}^{-1}$ )
<b>C.ROD</b>	2868	91	9	-7	166	159	$\pm 132$
<b>GUIJA</b>	3670	95	5	11	392	404	$\pm 202$
<b>MIX</b>	2166	98	2	9	95	105	$\pm 156$
<b>ARE</b>	3384	87	13	-58	146	87	$\pm 61$

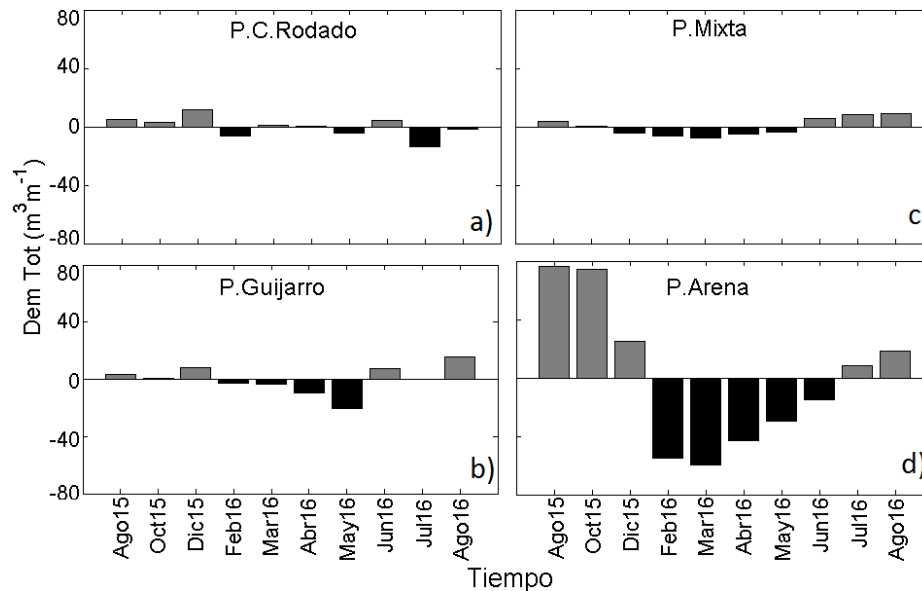


**Figura 47.** Variabilidad morfológica de la playa de guijarro de agosto 2015 a agosto 2016. a) Variabilidad longitudinal de los perfiles de playa de perfil cóncavo en el sur (TB09, en verde) a convexo (TB03, en negro continuo) en febrero 2016; b) evolución de la línea de costa (0 m referido al NBMI); c) evolución volumétrica anual longitudinal de la zona subaérea d) evolución longitudinal de los volúmenes acumulados en la zona SA. Los volúmenes son sin el promedio en  $m^3/m$ .

Las playas de grava tienen características en común con las de canto rodado y guijarro. Por ejemplo, pueden tener eventos de rotación frecuentes, y formación de cúspides, bermas y/o escalones. Sin embargo difieren en la variabilidad volumétrica pues al considerar solamente la zona subaérea, se observó una menor variabilidad en las playas de canto rodado ( $\pm 13 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ) y de guijarro ( $\pm 17 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ) que lo reportado para playas de grava entre  $\pm 30 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  por Ruiz de Alegria-Arzaburu y Masselink (2010) y  $\pm 100 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  (Scott *et al.*, 2016) por Scott *et al.*, (2016). Por otro lado, la playa mixta presenta una variabilidad volumétrica de  $\pm 15 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ , lo cual es menor que lo encontrado en otras playas, entre 27 y  $73 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  (Berguillos *et al.*, 2016) para la playa subaérea, y mayor ( $\pm 156 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ) si se considera el volumen total de la playa, comparado con Roberts, *et al.*, (2013) ( $\pm 70 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ) para una playa del Atlántico. Por último, la playa de arena presenta una variabilidad volumétrica de  $\pm 61 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$  para la zona subaérea, lo cual es ligeramente menor que lo reportado por Ruiz de Alegría-Arzaburu *et al.* (2017) ( $\pm 52 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ) para la misma zona de estudio. Esta diferencia debe de ser debido a que los cálculos realizados por dichos autores consideran dos años de muestreo, mientras que este trabajo considera sólo el año de agosto 2015 a agosto 2016, el cual fue más energético que lo habitual.

En cuanto a la estacionalidad, la playa de canto rodado no tiene una estacionalidad definida mientras que, en las playas de arena, guijarro y mixta se observa cierta estacionalidad en la zona subaérea (Fig.48). Las tres playas muestran valores negativos durante todo el invierno; en la playa mixta (arena y guijarro) y de arena, la erosión se apreció a partir de otoño, mientras que en la de guijarro la erosión ocurre a mediados de invierno. En la playa mixta y de arena, se observó recuperación de la sección subaérea durante la primavera (a partir de abril), mientras que en la de guijarro este proceso se retrasa un mes, y comienza a partir de mayo 2016. Además, los cambios volumétricos en las playas de arena y mixta se presentan de forma gradual, mientras que en la playa de guijarro estos cambios ocurren drásticamente (Fig. 48). Este desfase entre la

erosión/recuperación de las playas podría ser atribuido a la competencia del oleaje para mover el sedimento (Bascom 1951; Shepard 1963).



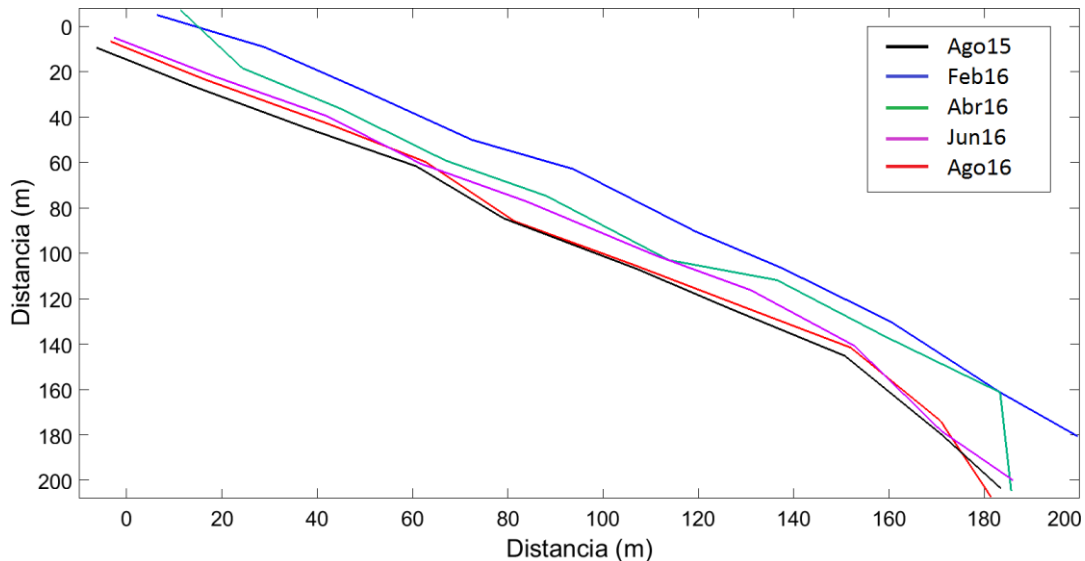
**Figura 48.** Variabilidad volumétrica subaérea temporal de agosto 2015 a agosto 2016 para las diferentes playas; playa de canto rodado (a); de guijarro (b); mixta (c); y de arena (d). El volumen presentado es sin el promedio anual en  $m^3/m$ .

Las playas al norte de BTS presentaron un aporte importante de sedimento en la zona submareal durante los meses febrero a marzo, esto podría atribuirse a las altas precipitaciones (~40 mm) que ocurrieron en el invierno de El Niño 2015-2016, cercano al promedio registrado en 1984-2015 (46 mm) y mayor que el promedio de los últimos tres años (32 mm) (INEGI, 2013, 2014, 2015, 2016). Las lluvias pudieron haber ocasionado aportes sedimentarios a las playas de estudio a través de los arroyos, principalmente a la de canto rodado, y a través de la erosión de cantiles en las playas de canto rodado, mixta y de guijarros (San Miguel, Stacks y Granada Cove) (Cruz-Colin y Cupul-Magaña, 1997). Esto aunado a un ligero incremento en la potencia del oleaje (febrero a marzo) logró transportar sedimento hacia la costa.

Debido a la dificultad de la movilización del sedimento, en la playa de canto rodado no se observó un definido sistema de transporte, sólo se observó una redistribución de los sedimentos. Por otro lado, la playa de guijarro exhibe un

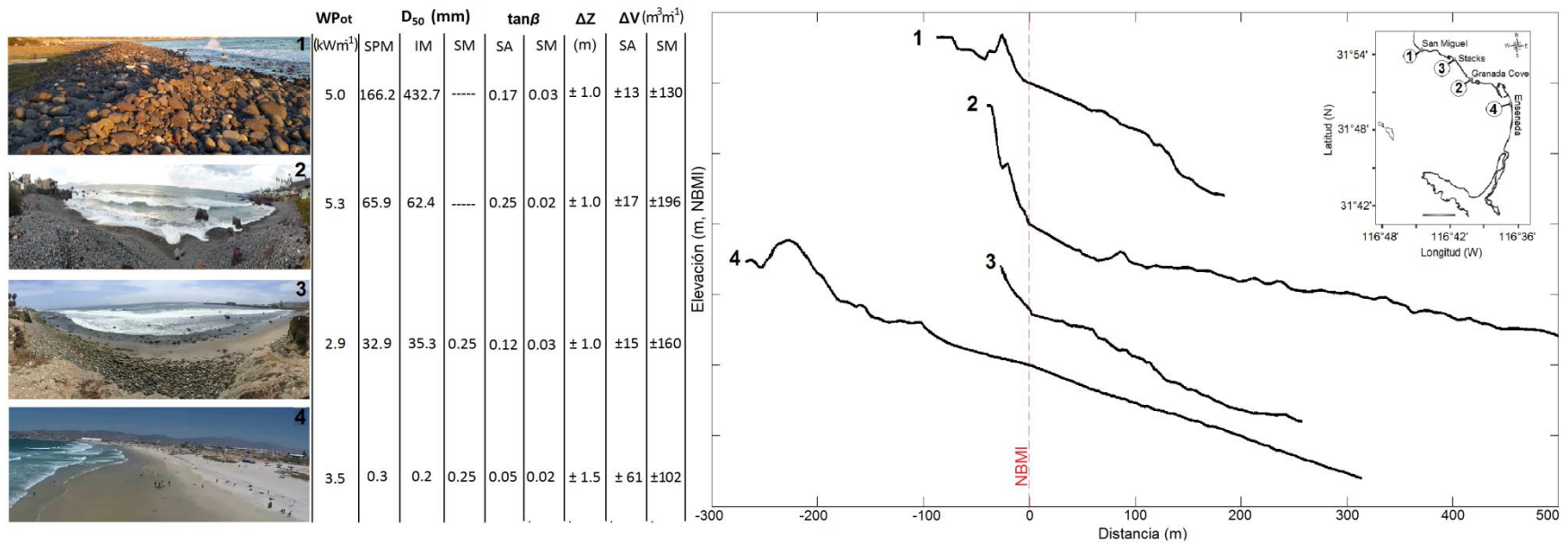
sistema de rotación de playa (Fig. 47), el cual está asociado a un dominio del transporte longitudinal (sobre el transversal) en la playa. La rotación de playa está relacionada con la incidencia oblicua del oleaje (Chadwick *et al.* 2005; Buscombe, 2008; Ruiz de Alegría y Masselink. 2010), sin embargo, los resultados numéricos no mostraron variaciones estacionales de la dirección del oleaje (Tabla. III), incidiendo principalmente de sur a norte (dirección promedio 301° suroeste). El extremo norte avanzó con mayor potencia de oleaje en invierno y primavera, y retrocedió con menor potencia en verano (Tabla III). Por lo tanto, la rotación de la playa parece estar dominada por la diferencia longitudinal de la potencia del oleaje, lo cual coincide con Harley *et al.* (2007). Por otro lado, la playa mixta presentó una variabilidad dominada por el transporte transversal de sedimentos, con cambios de hasta 27 m de anchura (erosión-acreción) entre invierno-verano (Fig.49). La playa presentó un escalón (sección norte) o barra (sección sur), después de los cuales se da una topografía plana, lo que concuerda con lo encontrado por Ivamy y Kench (2006) y Roberts *et al.* (2013), quienes encontraron también una morfología plana en la zona submareal de una playa mixta asociado a la ausencia de banco de arena y la presencia de una barra, únicamente en los meses de transición. Por último, la playa de arena también se encuentra dominada por un transporte transversal de sedimento, y exhibe cambios morfológicos dominados por el sistema barra-berma. Ocurre la formación de una berma por acreción en la parte subaérea durante condiciones menos energéticas del oleaje (agosto–octubre). Mientras que durante condiciones más energéticas del oleaje (diciembre–abril) la playa subaérea se erosiona hasta 2 m, y se da una acreción submareal en forma de barra (alrededor de 2.5 m de profundidad). A pesar de que la playa muestra una variabilidad morfológica estacional muy marcada, coincidiendo con lo descrito por diversos autores (Shepard, 1950; Aagaard *et al.*, 2013; Sénéchal *et al.*, 2015), en el periodo de estudio de agosto 2015 a agosto 2016 la playa subaérea no se recupera del todo en verano, y la barra submareal persiste, lo que difiere con lo reportado por Vidal-Ruíz (2016), que indica una recuperación subaérea en el verano del 2015. Durante el periodo de este estudio el oleaje fue más energético que en años anteriores, debido al evento de El Niño

2015-2016, lo que impidió la recuperación completa de la playa subaérea y permitió la presencia de la barra submareal (Ruiz de Alegría-Arzaburu y Vidal-Ruiz, 2017). Esto concuerda con estudios previos que indican que durante eventos de El Niño (1982-1983 y 1997-1998) ocurre un desfase de unos años en la recuperación completa de la erosión de la playa subaérea (Barnard *et al.*, 2011; Doria *et al.*, 2016).



**Figura 49.** Evolución temporal de la línea de costa de la playa mixta (0 m, referido al NBMI) de agosto 2015 a agosto 2016.

El modelo conceptual de este trabajo se resume en la Figura 50, donde se muestran los resultados morfodinámicos de las playas estudiadas en Bahía Todos Santos de agosto 2015 a agosto 2016. De forma general, las playas que están expuestas a mayor potencia del oleaje presentan un mayor tamaño de grano y una pendiente más pronunciada en la cara de la playa. A excepción de la playa de canto rodado, que tiene menor pendiente que la de guijarro. Todas las playas presentan variaciones verticales de  $\pm 1$  m, excepto la de arena, que presenta cambios mayores de  $\pm 1.5$  en promedio. Esto se ve reflejado en una mayor variabilidad volumétrica subaérea (en  $\text{m}^3\text{m}^{-1}$ ) en la playa de arena ( $\pm 68 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ), seguida por la de guijarro y canto rodado, siendo la playa mixta la que presenta una zona subaérea más estable. Por otro lado, en la zona submareal la playa de guijarro es la más dinámica, seguida por la mixta y la de canto rodado, siendo la de arena la playa la más estable.



**Figura 50.** Perfil transversal representativo para cada playa de estudio de BTS con su foto: (1) canto rodado (San Miguel); (2) de guijarro (Granada Cove); (3) mixta de arena y guijarros (Stacks); y (4) arenosa (Playa Hermosa). La tabla incluye los valores anuales promedio (agosto 2015-agosto 2016) de la potencia del oleaje ( $kWP_{ot}$ ); tamaño de sedimentos en la zona supramareal (SPM), intermareal (IM) y submareal (SM); la pendiente de la playa ( $\tan\beta$ ) para la zona subaérea (SA) y submareal (SM); la diferencia en elevación ( $\Delta Z$ ) en metros y la variabilidad volumétrica total ( $\Delta V$ ) para la zona subaérea (SA) y submareal (SM).

## 7. CONCLUSIONES

---

Con este estudio se logró caracterizar y comparar cuatro playas cercanas, sedimentológicamente diferentes y expuestas a condiciones hidrodinámicas similares, durante el año El Niño 2015-2016. Los resultados morfológicos muestran que a pesar de la relación entre el tamaño de sedimento y la pendiente de la playa, la playa de canto rodado (San Miguel) tiene menor pendiente subaérea ( $\tan\beta=0.17$ ) que la de guijarro (Grana Cove,  $\tan\beta=0.25$ ), seguidas por la playa mixta: de arena y guijarro (Stacks,  $\tan\beta=0.12$ ), siendo la playa de arena (Playa Hermosa) la que presenta menor pendiente ( $\tan\beta=0.05$ ). Debido a la ineficiencia del oleaje para movilizar el sedimento de la playa SM, está presentó una menor pendiente y una ausencia de un sistema de transporte defino, mostrando solo una redistribución de los sedimentos. Por su parte la playa de guijarro exhibe un dominio en el transporte longitudinal lo que ocasiona un sistema de rotación de playa, mientras que la playa mixta y de arena presenta una variabilidad dominada por el transporte transversal, asociado a la presencia de un escalón o barra, después de los cuales se da una topografía plana en la mixta y un sistema de barra/canal en la de arena. Esto ocasiona una variabilidad volumétrica, que es mayor en la playa de guijarro ( $202 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ) seguida por la mixta ( $156 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ) y de canto rodado ( $132 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ), siendo la playa arena ( $\pm 61 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ ) la más estable.

Las playas estudiadas exhiben una estacionalidad marcada, con una acreción de la zona subaérea durante verano, asociada a condiciones menos energéticas ( $P_{ot}=2.35 \text{ kWm}^{-1}$ ) y sedimentos de menor tamaño. Mientras que en invierno, cuando las condiciones son más energéticas ( $P_{ot}=7.46 \text{ kWm}^{-1}$ ) la zona subaérea se erosiona dejando expuesto sedimento de mayor tamaño. Esta estacionalidad también es clara en la variabilidad volumétrica, ocurriendo de forma gradual para las playas de arena y mixta, con una estacionalidad bien definida, mientras que en la playa de guijarro los cambios son repentinos y existe un desfase con respecto a la estacionalidad de las otras playas.

## 8. REFERENCIAS

---

- Aagaard, T.B., Greenwood y Hughes, M.G., 2013. Sediment transport on dissipative, intermediate and reflective beaches. *Earth-Science Reviews*, 124: 32–50.
- Ahumada-Sempoal, M.A., 1993. Corrientes litorales inducidas por oleaje en la Bahía de Todos Santos, B.C. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B.C., México. 38 pp.
- Aranda-Manteca, F., 1983. Estudio de los minerales pesados como trazadores de las corrientes litorales en la Bahía de Todos Santos, B.C., Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B.C., México. 180 pp.
- Austin, M. J. and Masselink, G. 2006. Observations of morphological change and sediment transport on a steep gravel beach. *Marine Geology* 229 (1-2), 59–77.
- Barnard, P.L., Allan, J., Hansen, J.E., Kaminsky, G.M., Ruggiero, P. y Doria, A., 2011. The impact of the 2009–10 El Niño Modoki on U.S. West Coast beaches. *Geophysical Research Letters* 38 (13).
- Bergillos, R.J. Ortega-Sánchez, M., Masselink, G. y Losada, M.A., 2016. Morpho-sedimentary dynamics of a micro-tidal mixed sand and gravel beach, Playa Granada, southern Spain. *Marine Geology* 379, 28–38
- Bluck, B.J., 1967. Sedimentation of beach gravels: examples from south Wales. *J. Sediment. Petrol.* 37, 128-156.
- Bodge, K.R., 1992. Representing equilibrium beach profiles with an exponential expression. *Journal of Coastal Research* 8 (1), 47–55.
- Buscombe, D., 2008. Morphodynamics, sedimentation and sediment dynamics of a gravel beach. Tesis de doctorado, University of Plymouth, U.K.
- Buscombe, D. y Masselink, G., 2006. Concepts in gravel beach dynamics. *Earth Science Reviews* 79 (1–2), 33–52.

- Carter, R.W.G. y Orford, J.D., 1993. The morphodynamics of coarse clastic beaches and barriers. *Journal of Coastal Research* 15 (1), 158–179.
- Castro-Osuna, D.A., 2003. Simulación numérica del oleaje en la Bahía de Todos Santos: Influencia de las condiciones de frontera. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B.C., México. 128 pp.
- Chadwick, A.J., Karunaratna, H., Gehrels, W.R., O'Brien, D. y Dales, D., 2005. A new analysis of the Slapton barrier beach system, U.K. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers–Maritime Engineering* 158 (4), 147–161.
- Chappell, J. y Eliot, I.G., 1979. Surf-beach dynamics in time and space an Australian case study, and elements of a predictive model. *Mar. Geol.* 32, 221-250.
- Chen, B., Chen, Z., Stephenson, W. y Finlayson, B., 2011. Morphodynamics of a boulder beach, Putuo Island, SE China coast: the role of storms and typhoon. *Mar. Geol.* 283, 106–115.
- Cruz-Colín, M.E. y Cupúl-Magaña, L.E., 1997. Erosión y aporte sedimentario de los cantiles marinos de la Bahía de Todos Santos Baja California, en el periodo de 1970-1991. *Ciencias Marinas* 23(3): 303-315.
- Dean, R.G., 1977. Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts. Department of Civil Engineering, Ocean Engineering Report No. 12. University of Delaware, Newark, Delaware.
- Doria, A., Guza, R.T., O'Reilly, W.C. y Yates, M.L., 2016. Observations and modeling of San Diego beaches during El Niño. *Continental Shelf Research* 124, 153–164.
- Etienne, S. y Paris, R., 2010. Boulder accumulations related to storms on the south coast of the Reykjanes Peninsula (Iceland). *Geomorphology* 114, 55–70.
- Felton, E.A., 2002. Sedimentology of rocky shorelines: 1. A review of the problem, with analytical methods, and insights gained from the Hulopoe Gravel and the modern rocky shoreline of Lanai, Hawaii. *Sediment. Geol.* 152, 221–245.
- Forbes, D.L., Taylor, R.B., Orford, J.D., Carter, R.W.G. y Shaw, J., 1991. Gravel-barrier migration and overstepping. *Marine Geology* 97(3-4), 305–313.

- Gastil, R.G., Phillips, R.P. y Allison, E.D. 1975. Reconnaissance Geology of the State of Baja California. Geological Society of America, Memoir 140.170 p.
- Gallaway, E., Trenhaile, A.S., Cioppa, M.T. y Hatfield, R.G., 2012. Magnetic mineral transport and sorting in the swash-zone: Northern Lake Erie, Canada. *Sedimentology* 59, 1718–1734.
- Gómez-Pujol, L., Orfila, A., Cañellas, B., Alvarez-Ellacuria, A., Méndez, F.J., Medina, R. y Tintoré., 2007. Morphodynamic classification of Sandy beaches in low energetic marine environment. *Mar. Geol.* 242 (4), 235–246.
- Gordon, G.R., Allison, E.C. y Phillips, R.P. 1971. Reconnaissance Gology of the state of Baja California. The Geological Society of America, Inc. Memoir 140, 170.
- Goto, K., Miyagi, K., Kawana, T., Takahashi, J. y Imamura, F., 2011. Emplacement and movement of boulders by known storm waves — field evidence from the Okinawa Islands, Japan. *Mar. Geol.* 283, 66–78.
- Grottoli, E., Bertoni, D. y Ciavola, P. 2017. Short- and medium-term response to storms on three Mediterranean coarse-grained beaches. *Geomorphology* 295, 738–748
- Harley, M.D., Turner, I.L., Morris, B.D., Short, A. y Ranasinghe, R. 2007. Nearshore wave climate and localized erosion during high wave events-SE Australia, Coasts and Ports Australasian Conference.
- Hegge, B., Eliot, I. y Hsu, J., 1996. Sheltered sandy beaches of southwestern Australia. *J. Coast. Res.* 12 (3), 748–760.
- Inman, D.L., Elwany, M.H. y Jenkins, S.A., 1993. Shorerise and bar-berm profiles on ocean beaches. *Journal of Geophysical Research* 98 (C10), 18,181–18,199.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Anuario estadístico y geográfico de Baja California 2013. México: INEGI, 2013.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Anuario estadístico y geográfico de Baja California 2014. México: INEGI, 2014.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Anuario estadístico y geográfico de Baja California 2015. México: INEGI, 2015.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Anuario estadístico y geográfico de Baja California 2016. México: INEGI, 2016.
- Jennings, R. y Shulmeister, J. 2002. A field based classification scheme for gravel beaches. *Marine Geology*, 186: 211–228.
- Jiménez, J.A., Guillén, J. y Falqués, A., 2008. Comment on the article Morphodynamic classification of sandy beaches in low energetic marine environment. *Marine Geology*, 242, pp. 235–246, 2007.
- Job, D., 1993. The Start Bay barrier beach system. FSC Occasional Publication 27 of A Field Guide of the Geomorphology of the Slapton Region. Field Studies Council (Slapton Ley Field Studies Centre), U.K.
- Karunaratna, H., Horrillo-Caraballo, J., Kuriyama, Y., Mase, H., Ranasinghe, R. y Reeve, D.E., 2016. Linkages between sediment composition, wave climate and beach profile variability at multiple timescales. *Marine Geology* 381, 194–208
- Karunaratna, H., Horrillo-Caraballo, J.M., Ranasinghe, R., Short, A.D. y Reeve, D.E., 2012. An analysis of the cross-shore beach morphodynamics of a sandy and a composite gravel beach. *Marine Geology* 299–302, 33–42
- Kirk, R.M., 1980. Mixed sand and gravel beaches: morphology, processes and sediments. *Prog. Phys. Geogr.* 4, 189-210.
- Larson, M. y Kraus, N.C., 1994. Temporal and spatial scales of beach profile change, Duck, North Carolina. *Marine Geology* 117, 75–94.
- Larson, M., Kraus, N.C. y Wise, R.A., 1999. Equilibrium beach profiles under breaking and non-breaking waves. *Coastal Engineering* 36, 59–85.
- Lisi, I., Molfetta, M., Bruno, M., DiRisio, M. y Damiani, L., 2011. Morphodynamic classification of sandy beaches in enclosed basins: the case study of Alimini (Italy). *J. Coast. Res.* 64, 180–184.
- Lopez de San Roman-Blanco, B., Coates, T. T., Holmes, P., Chadwick, A. J., Bradbury, A., Baldock, T. E., Pedrozo-Acuna, A., Lawrence, J. y Grune, J. (2006), 'Large scale experiments on gravel and mixed beaches: Experimental

procedure, data documentation and initial results', *Coastal Engineering* 53(4), 349–362.

Martínez-Martínez, M.D. (2015) Posibles cambios en la morfología de la playa Municipal de Ensenada, Baja California, México, debido a la probable prolongación del rompeolas del puerto de Ensenada. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B.C., México. 44 pp.

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.

Mason, T., 1997. Hydrodynamics and Sediment Transport on a Macro Tidal, Mixed (Sand and Shingle) Beach. PhD Thesis, University of Southampton, Southampton.

Mason, T. y Coates, T.T., 2001. Sediment transport processes on mixed beaches: a review for shoreline management. *J. Coast. Res.* 17 (3), 645–657.

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

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

Neal, A., Pontee, N.I. y Pye, K., 2002. Internal structure of mixed-sand-and-gravel beach deposits revealed using ground-penetrating radar. *Sedimentology* 49, 789–804.

Nolan, T.J., 1993. Beach Cusps as Indicators of Sea-level. Unpubl. MSc Thesis, Canterbury University, Canterbury.

Noormets, R., Crook, K.A.W. y Felton, E.A., 2004. Sedimentology of rocky shorelines: 3. Hydrodynamics of megaclast emplacement and transport on a shore platform Oahu, Hawaii. *Sediment. Geol.* 172, 41–65.

- Oak, H.L., 1984. The boulder beach; a fundamentally distinct sedimentary assemblage. *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 74, 71–82.
- Ojeda E. y Guillen J. 2008. Shoreline dynamics and beach rotation of artificial embayed beaches. *Marine Geology* 253: 51–62.
- Orford, J.D., 1977. A proposed mechanism for storm beach sedimentation. *Earth Surf. Process. Landf.* 2, 381-400.
- Orford, J.D., Carter, R.W.G. y Jennings. S. 1996. Control domains and morphological phases in gravel-dominated coastal barriers of Nova Scotia. *JCR* 12(3), 589-604.
- Paris, R., Naylor, L.A. y Stephenson, W.J., 2011. Boulders as a signature of storms on rock coasts. *Mar. Geol.* 283, 1–11.
- Peredo-Jaime, J.I. 1994. Estimación de oleaje extremo a partir del análisis de clastos en costas rocosas. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B.C., México. 73 pp.
- Perez-Alberti, A. y Trenhaile, A.S., 2015. An initial evaluation of drone-based monitoring of boulder beaches in Galicia, northwestern Spain. *Earth Surf. Process. Landf.* 40,
- Pérez-Alberti, A., Trenhaile, A.S., Pires, A., López-Bedoya, J., Chamine, H. y Gomes, A., 2012. The effect of boulders on shore platform development and morphology in Galicia, NW. Spain. *Cont. Shelf Res.* 48, 122–137.
- Pedrozo-Acuña, A., 2011. Procesos costeros y morfodinámica de playas, apuntes de clase. Instituto de Ingeniería, UNAM. Primera edición. 240 p
- Plaza-Flores, J.F. 1979. Cambios en la playa San Miguel debidos a un deslizamiento y a la adición de Nuevo material vertido a la línea de costa. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California, México; 67.
- Pontee, N. I., Pye, K. y Blott, S. J. 2004. Morphodynamic behaviour and sedimentary variation of mixed sand and gravel beaches, Suffolk, UK. *Journal of Coastal Research* 20(1), 256–276.

- Quick, M.C. y Dyksterhuis, P., 1994. Cross shore transport for beaches of mixed sand and gravel. International Symposium: Waves-Physical and Numerical Modelling. Canadian Society of Civil Engineers, pp. 1443-1452.
- Ranasinghe, R., McLoughlin, R., Short, A. y Symonds, G. (2004), 'The Southern Oscillation Index, wave climate, and beach rotation', *Marine Geology* 204(3-4), 273–287
- Roberts, T.M., Wang, P., y Puleo, J.A., 2013. Storm-driven cyclic beach morphodynamics of a mixed sand and gravel beach along the Mid-Atlantic Coast, USA. *Marine Geology* 346 (2013) 403–421
- 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., Pape, L. y Turner, I. L. 2009. 'Daily to interannual cross-shore sandbar migration: Observations from a multiple sandbar system', *Continental Shelf Research* 29(14), 1663–1677.
- Ruiz de Alegria-Arzaburu, A. y Masselink, G. 2010. Storm response and beach rotation on a gravel beach, Slapton Sands, U.K. *Marine Geology*, 278(1-4): 77–99
- Ruiz de Alegria, A., Masselink, G., Kingston, K., Williams, J. y Buscombe, D. 2008. Monitoring storm impacts on a gravel beach using the Argus video system, in J. M. Smith, ed., 'Coastal Engineering 2008', Vol. 3, pp. 2633–2645. 31st International Conference on Coastal Engineering 2008, Hamburg, Germany.
- Ruiz de Alegria-Arzaburu, A., Arreola-Cortez, M.A. García-Nava, H. Hernández-Walls, R. y Mejía-Trejo, A. 2016. The effects of beach morphology variations on the profile of nearshore currents on a gently sloping mesotidal beach. En: 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.
- Ruiz de Alegria-Arzaburu, A. y Vidal-Ruiz, J.A. 2017. Post-storm beach recovery capabilities after el Niño winter at Ensenada beach, Mexico. *Coastal Dynamics*. Paper No. 124

- Ruggiero, P., Kaminsky, G.M., Gelfenbaum, G. y Voigt, B., 2005. Seasonal to interannual morphodynamics along a high-energy dissipative littoral cell. *Journal of Coastal Research* 21 (3), 553–578.
- Scott, T., Masselink, G., O'Hare, T., Saulter, A., Poate, T., Russell, P., Davidson, M. y Conley, D. 2016. The extreme 2013/2014 winter storms: Beach recovery along the southwest coast of England. *Marine Geology* 382, 224–241.
- Sénéchal, N., Coco, G. Castelle B. y Marieu, V. 2015. Storm impact and the seasonal shoreline dynamics of a mesotidal-macrotidal open sandy beach (Biscarrosse, France), *Geomorphology*, 228, 448–461.
- Shaw, J., Taylor, R. B. y Forbes, D. L. 1993. Impact of the Holocene transgression on the Atlantic coastline of Nova-Scotia, *Geographie Physique Et Quaternaire* 47(2), 221–238.
- Sherman, D.J., Orford, J.D. y Carter, R.W.G., 1993. Development of cusp-related, gravel size and shape facies at Malin Head, Ireland. *Sedimentology* 40, 1139-1152.
- Short, A., 1991. Macro-mesotidal beach morphodynamics: an overview. *J. Coast. Res.*, 417–436.
- Short, A. D., 2006. Australian beach systems - nature and distribution. *Journal of coastal research*, 22(1): 11-27 von Hann, J., 1901. *Lehrbuch der Meteorologie*. Chr. Herm. Tauchnitz, Leipzig. 805 p
- Short, A.D., 1979. Three-dimensional beach-stage model. *J. Geol.* 87, 553-571.
- Short, A.D., 1984. Temporal change in beach type resulting from a change in grain size. *Search* 15 (7–8), 228–230.
- Stark, N. y Hay, A.E. 2016. Pebble and cobble transport on a steep, mega-tidal, mixed sand and gravel beach. *Marine Geology* 382, 210–223
- Van de Lageweg, W.I., Bryan, K.R., Coco, G. y Ruessink, B.G., 2013. Observations of shoreline–sand bar coupling on an embayed beach. *Mar. Geol.* 344 (0), 101–114.
- Vidal-Ruíz, J.A. 2016. Morfodinámica estacional de barras sumergidas en Playa Hermosa, Ensenada, Baja California, México. Tesis de maestría. Facultad de

Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B.C., México. 52 pp.

Vidal-Ruíz, J.A. y Ruiz de Alegria-Arzaburu, A. 2017. An annual cycle of sandbar migration on an intermediate mesotidal beach: Ensenada, Mexico. Coastal Dynamics. Paper No. 223

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

Wright, L. D., Chappell, J. Thom, B. G. Bradshaw M. P. y Cowell, P. 1979. Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore systems: Southeastern Australia. Mar. Geol., 32: 105-140

Wright, L., Nielsen, P., Short, A. y Green, M. 1982. Morphodynamics of a macrotidal beach, Marine Geology 50, 97–128.

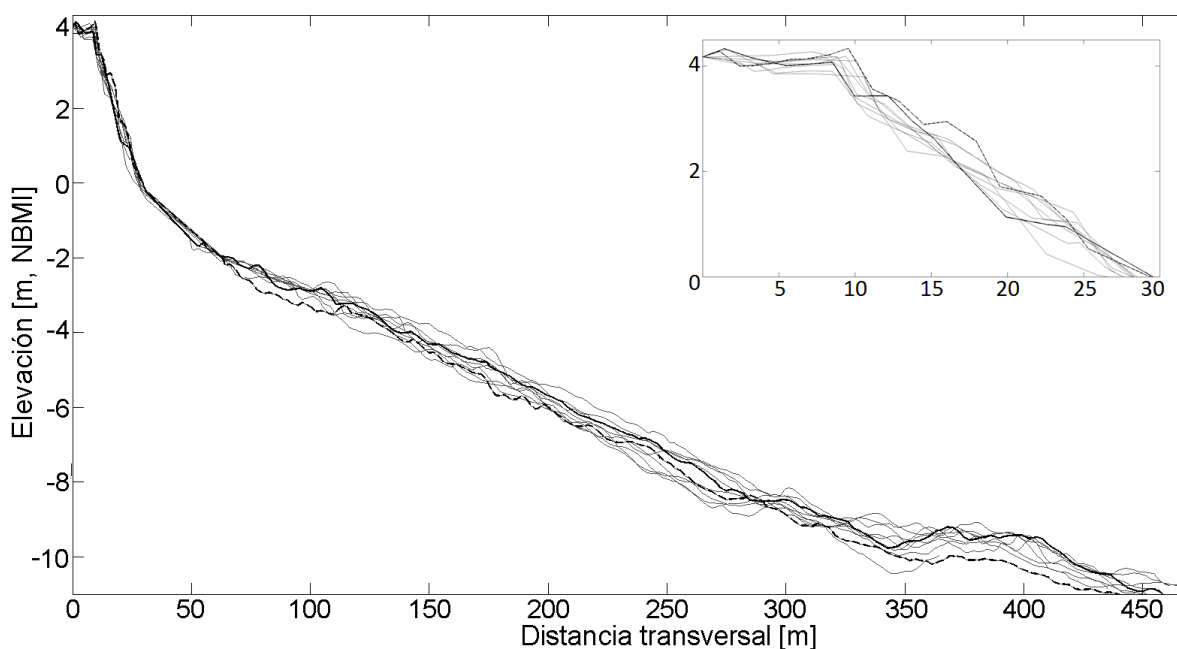
Wright, L. D. y Short, A. D., 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. Marine Geology, 56: 93-118

Wright, L.D., y Thom, B.G., 1977. Coastal depositional landforms: a morphodynamic approach. Progress in Physical Geography 1, 412–459.

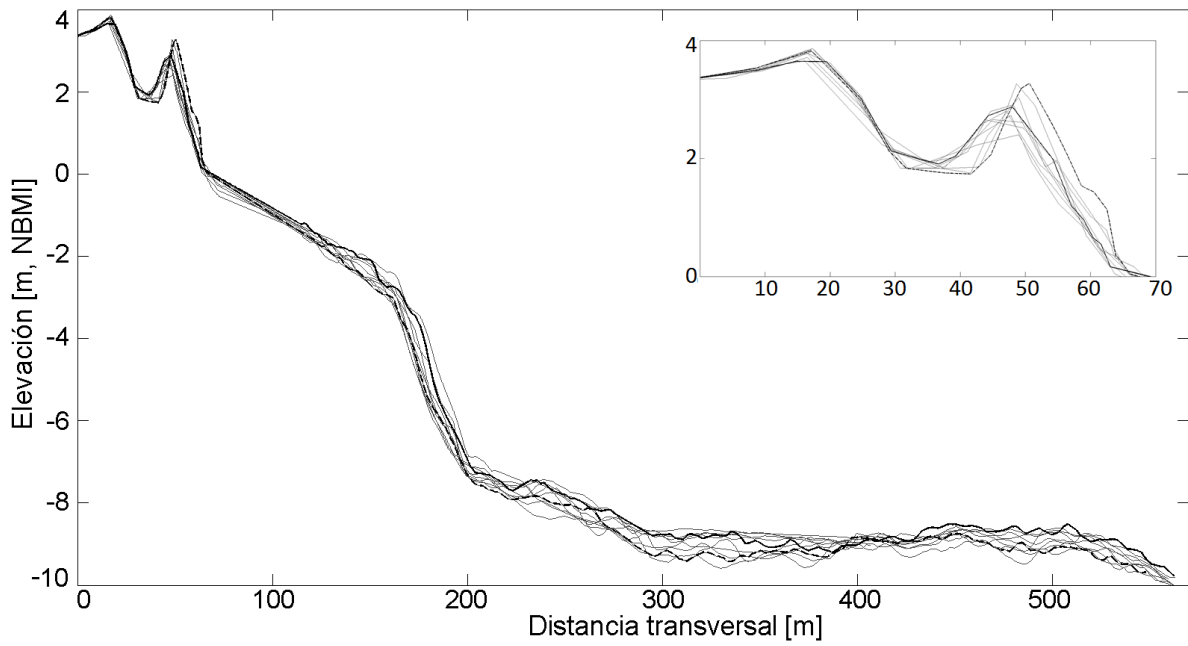
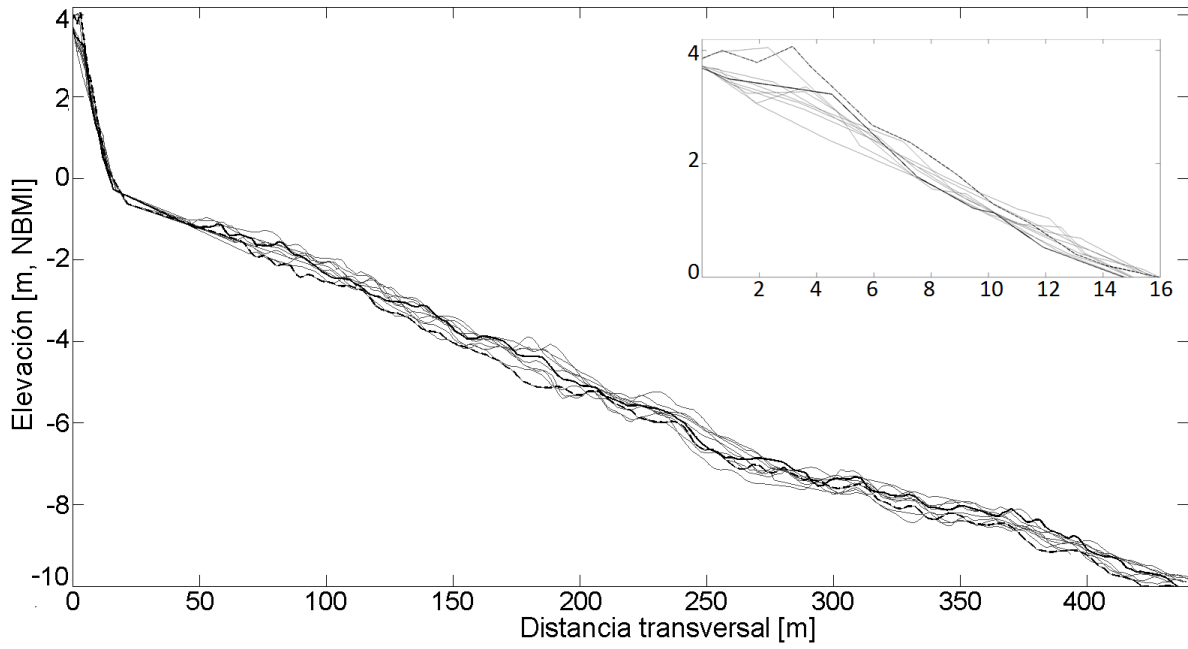
## ANEXO A

---

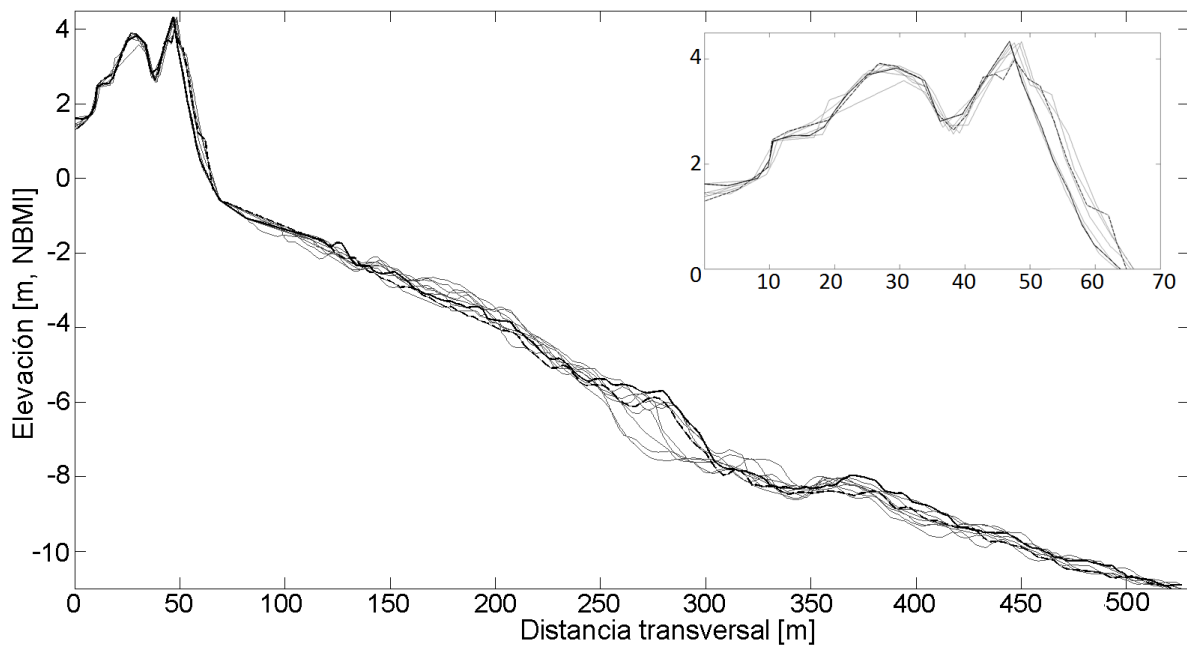
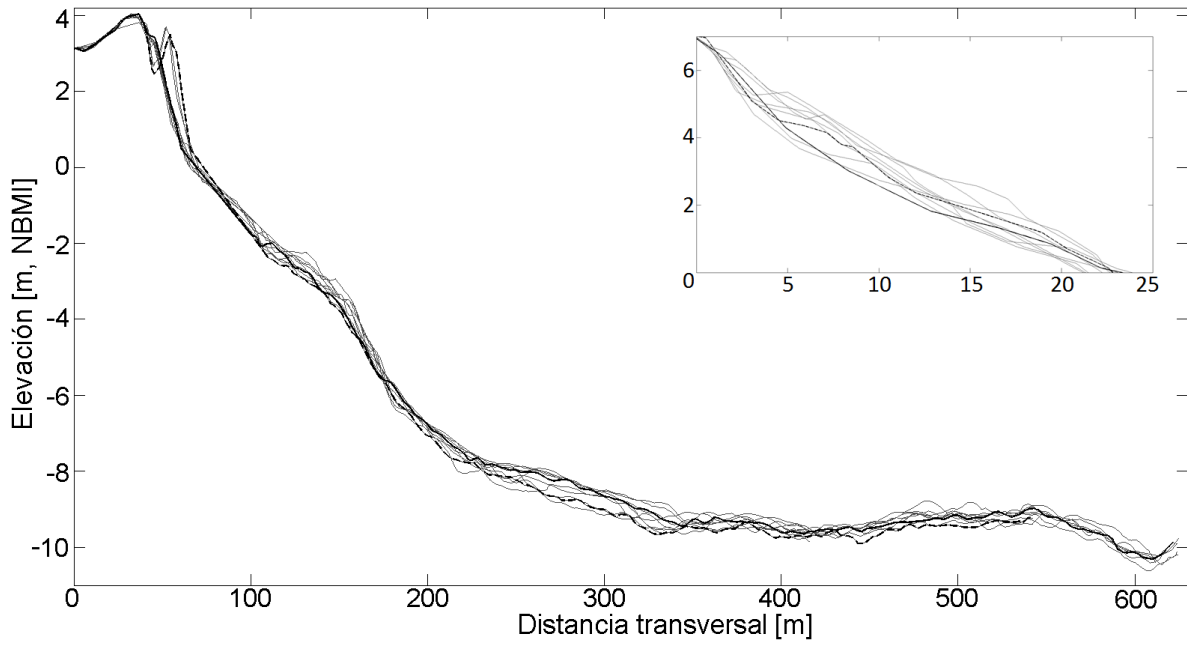
Perfiles topo-batimétricos mensuales medidos de agosto de 2015 a agosto de 2016 (referidos al NBMI) en las playas de: canto rodado (San Miguel) en las figuras A.1, A.2, A.3, A4; de guijarro (Granada Cove) en las figuras A.5, A.6, A.7, A8; mixta (Stacks) en las figuras A.9, A.10, A.11, A12, A.13; y en la arenosa (Playa Hermosa) en las figuras A.14, A.15, A.16, A.17.



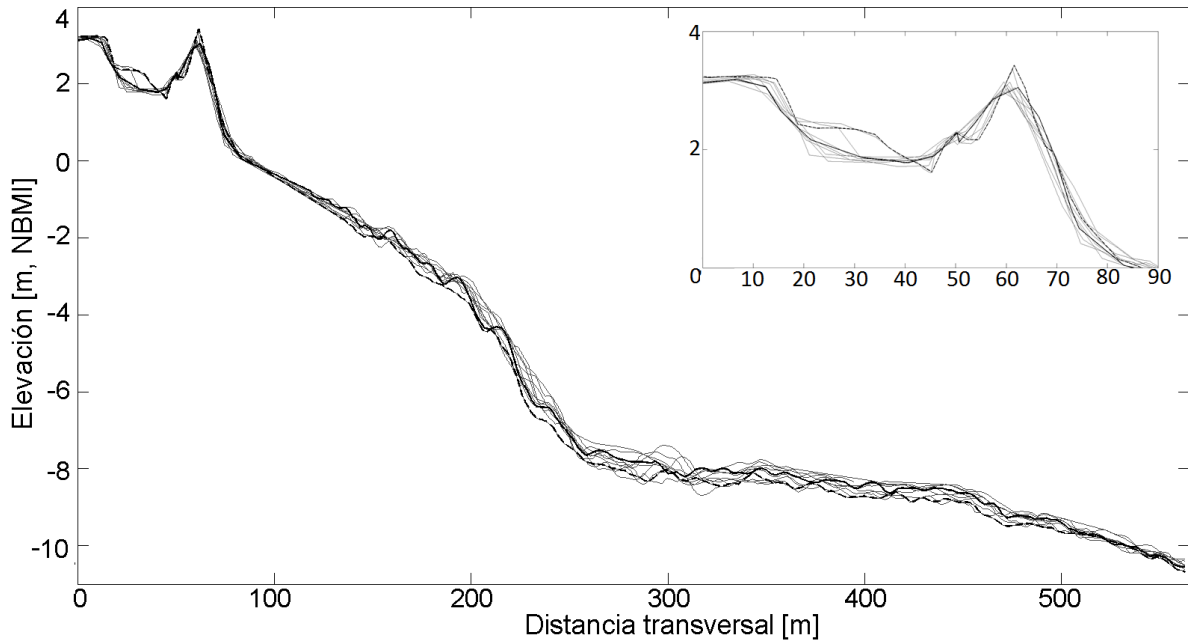
**Figura A1.** Evolución temporal del perfil TB1 para la playa de canto rodado (SM) para el periodo de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015) y la línea negra continua muestra el perfil final (agosto 2016). Con las líneas grises se muestran el resto de los meses. En la esquina superior derecha se hace un acercamiento a la zona subaérea.



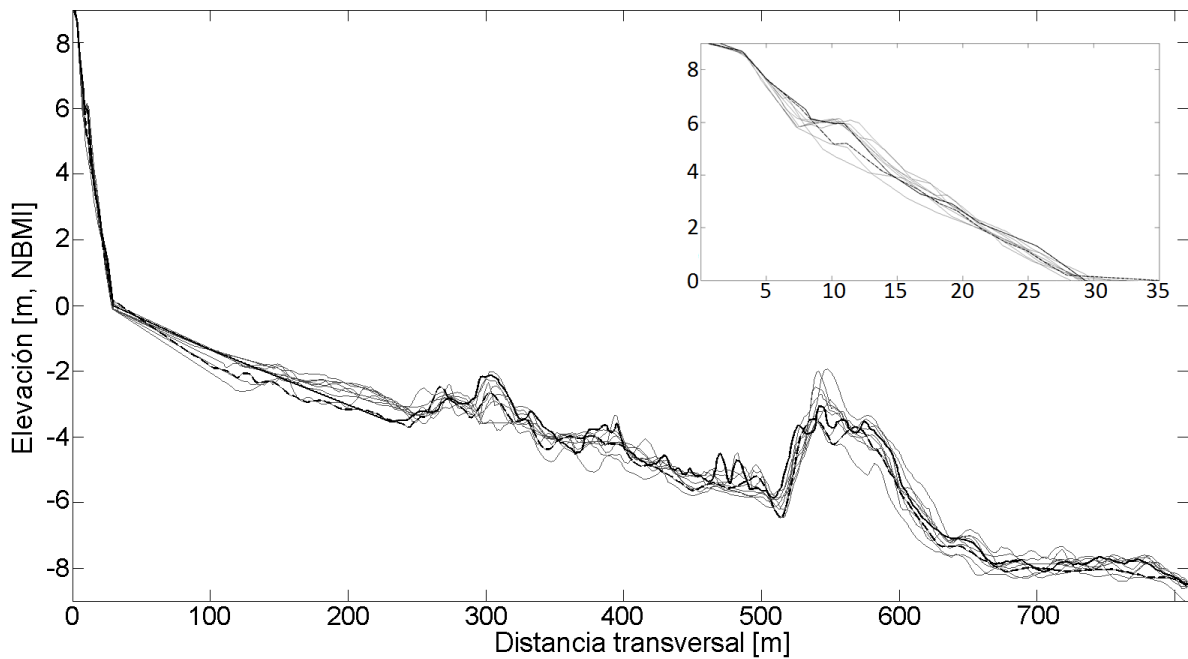
**Figura A2.** Evolución temporal del perfil TB2 y TB3 para la playa de canto rodado (SM) para el periodo de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015) y la línea negra continua muestra el perfil final (agosto 2016). Con las líneas grises se muestran el resto de los meses. En la esquina superior derecha se hace un acercamiento a la zona subaérea.



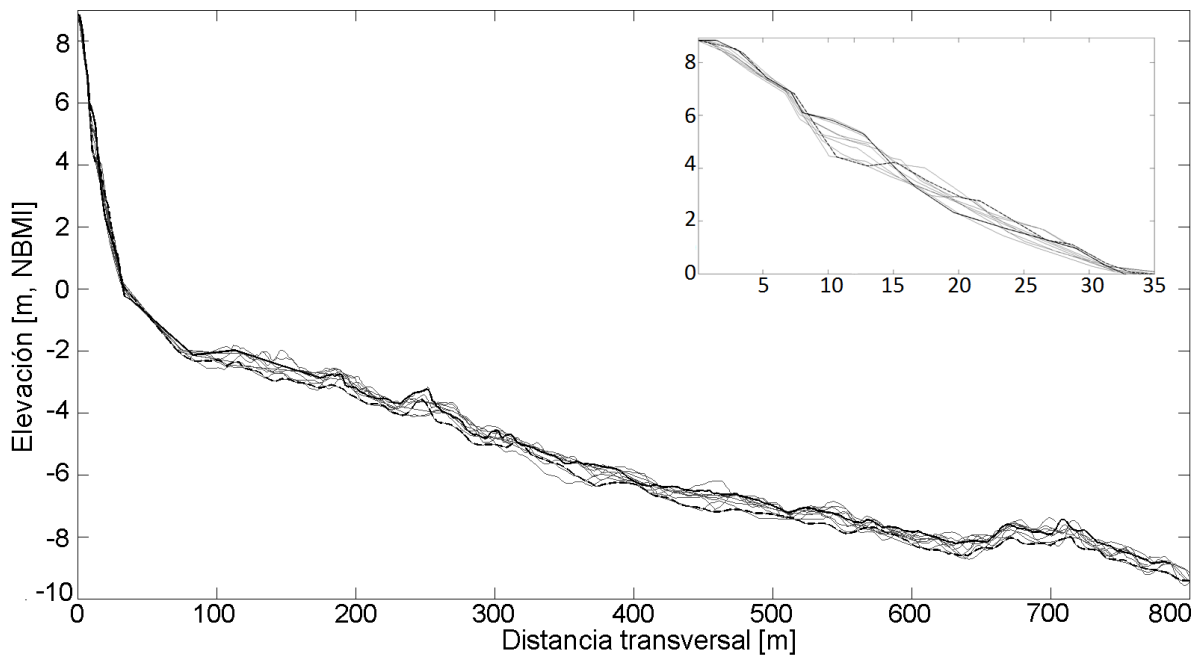
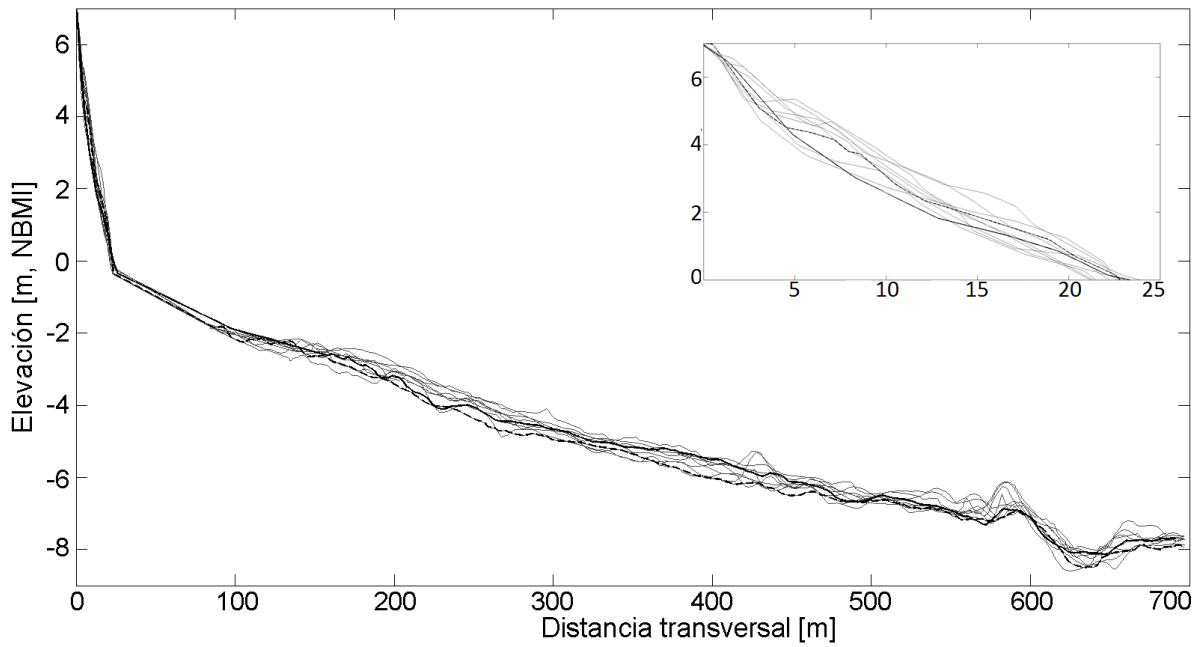
**Figura A3.** Evolución temporal del perfil TB4 y TB5 para la playa de canto rodado (SM) para el periodo de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015) y la línea negra continua muestra el perfil final (agosto 2016). Con las líneas grises se muestran el resto de los meses. En la esquina superior derecha se hace un acercamiento a la zona subaérea.



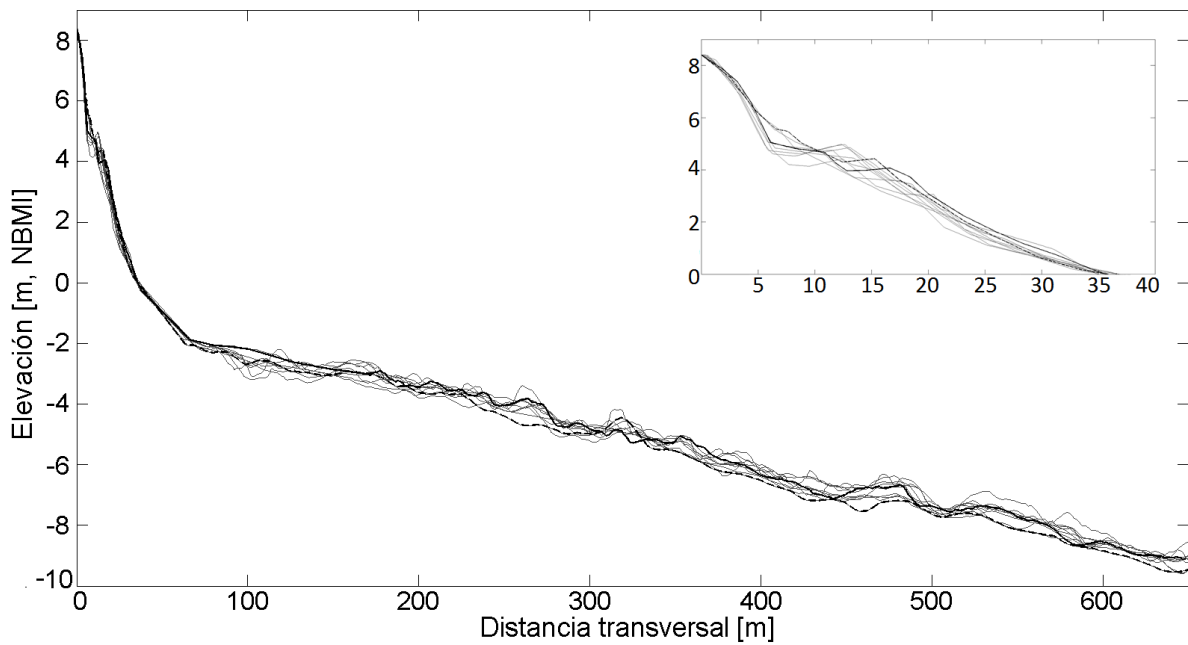
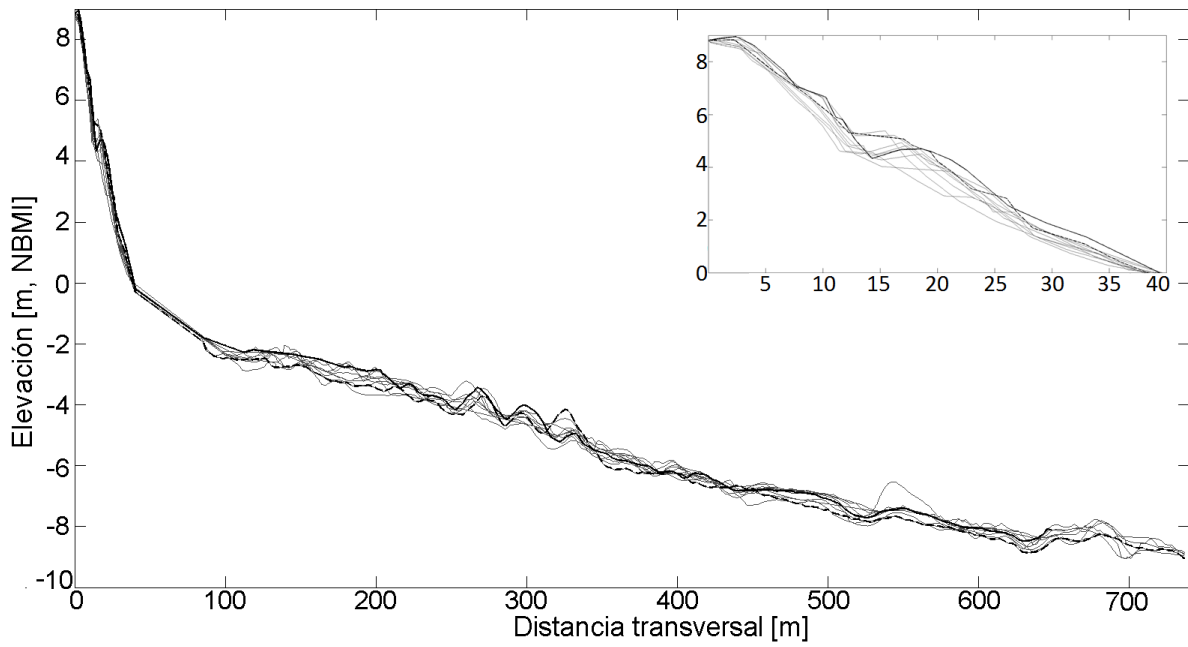
**Figura A4.** Evolución temporal del perfil TB6 para la playa de canto rodado (SM) para el periodo de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015) y la línea negra continua muestra el perfil final (agosto 2016). Con las líneas grises se muestran el resto de los meses. En la esquina superior derecha se hace un acercamiento a la zona subaérea.



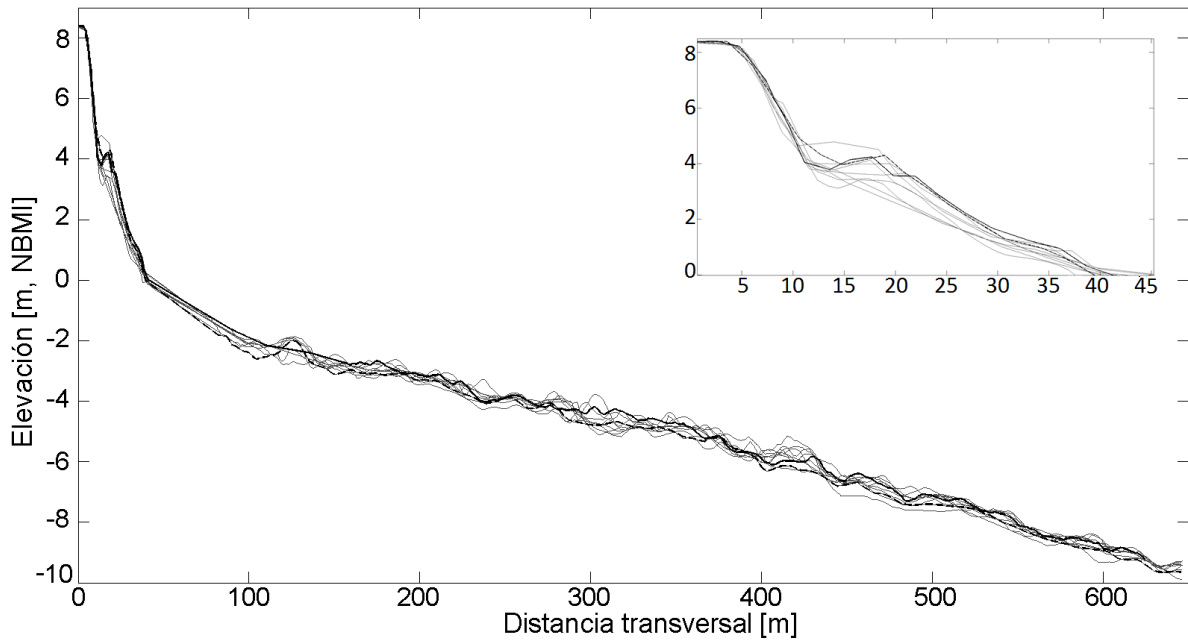
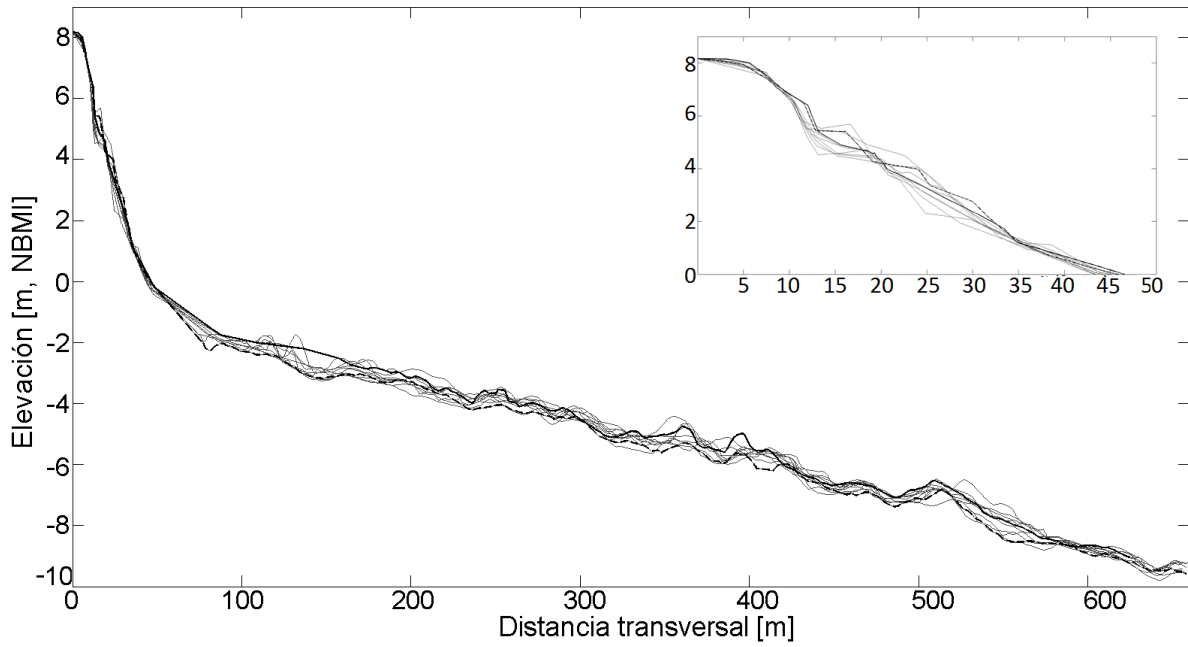
**Figura A5.** Evolución temporal del perfil TB3 para la playa de canto rodado (GC) para el periodo de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015) y la línea negra continua muestra el perfil final (agosto 2016). Con las líneas grises se muestran el resto de los meses. En la esquina superior derecha se hace un acercamiento a la zona subaérea.



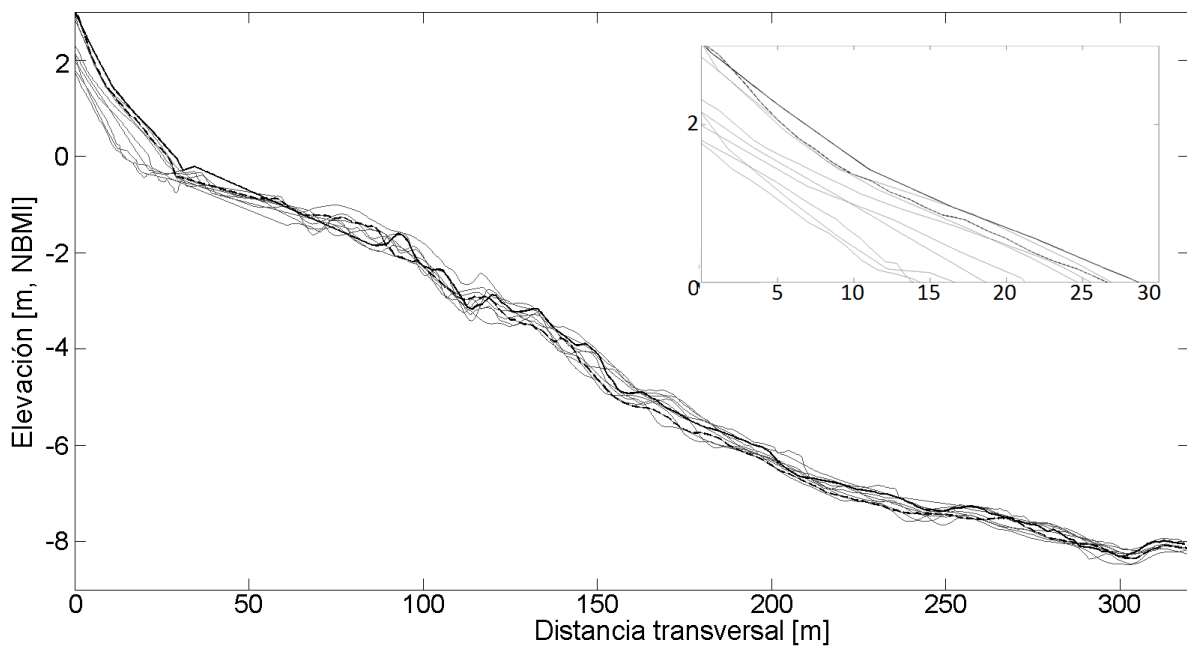
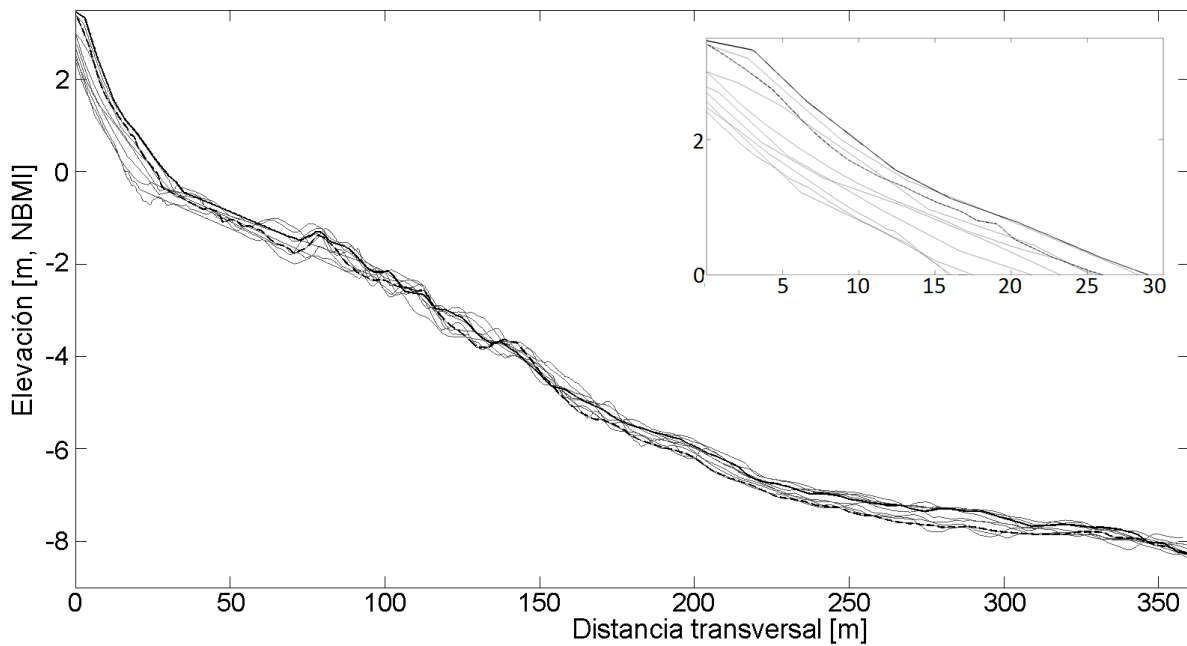
**Figura A6.** Evolución temporal del perfil TB4 y TB5 para la playa de guijarro (GC) para el periodo de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015) y la línea negra continua muestra el perfil final (agosto 2016). Con las líneas grises se muestran el resto de los meses. En la esquina superior derecha se hace un acercamiento a la zona subaérea.



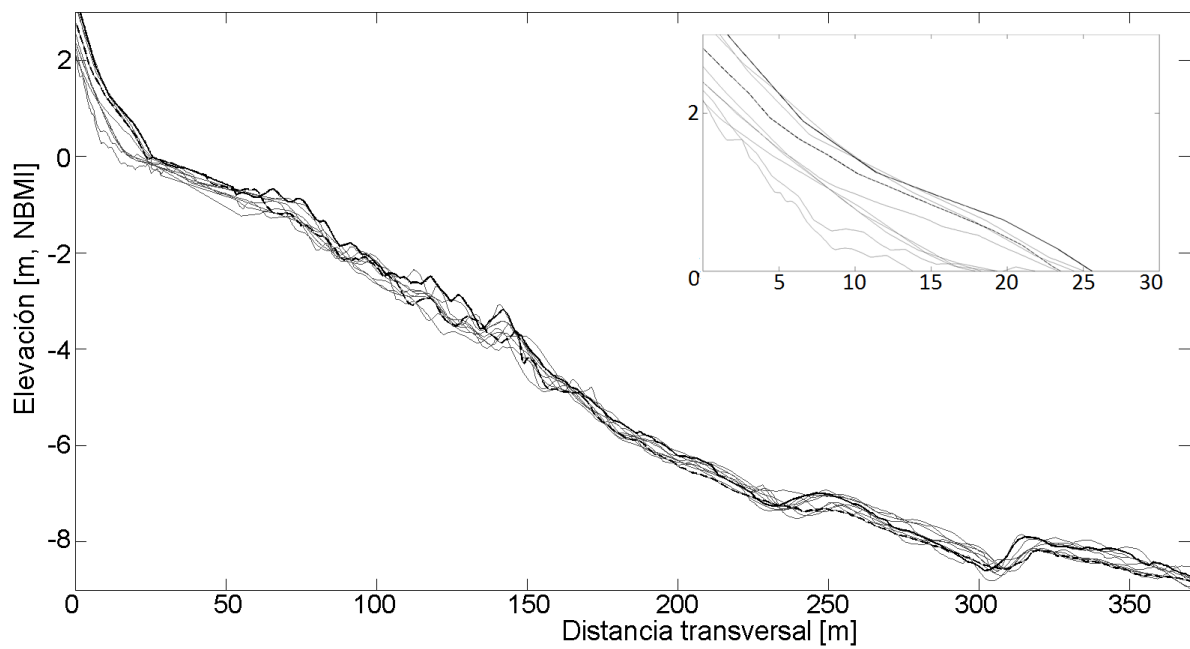
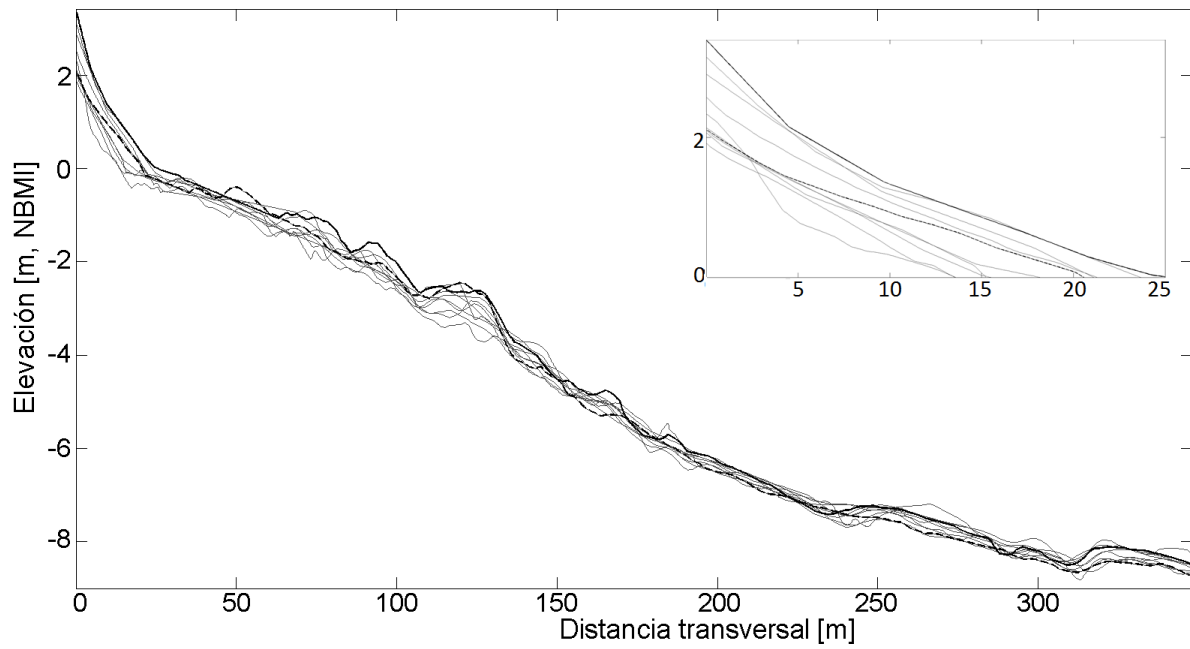
**Figura A7.** Evolución temporal del perfil TB6 y TB7 para la playa de guijarro (GC) para el periodo de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015) y la línea negra continua muestra el perfil final (agosto 2016). Con las líneas grises se muestran el resto de los meses. En la esquina superior derecha se hace un acercamiento a la zona subaérea.



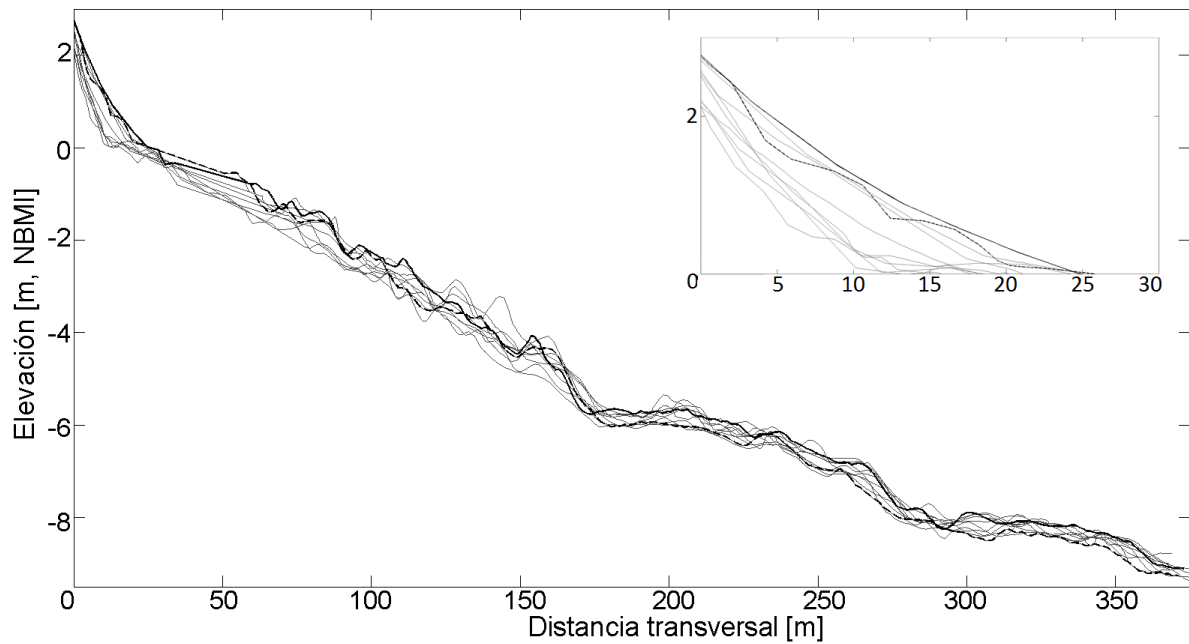
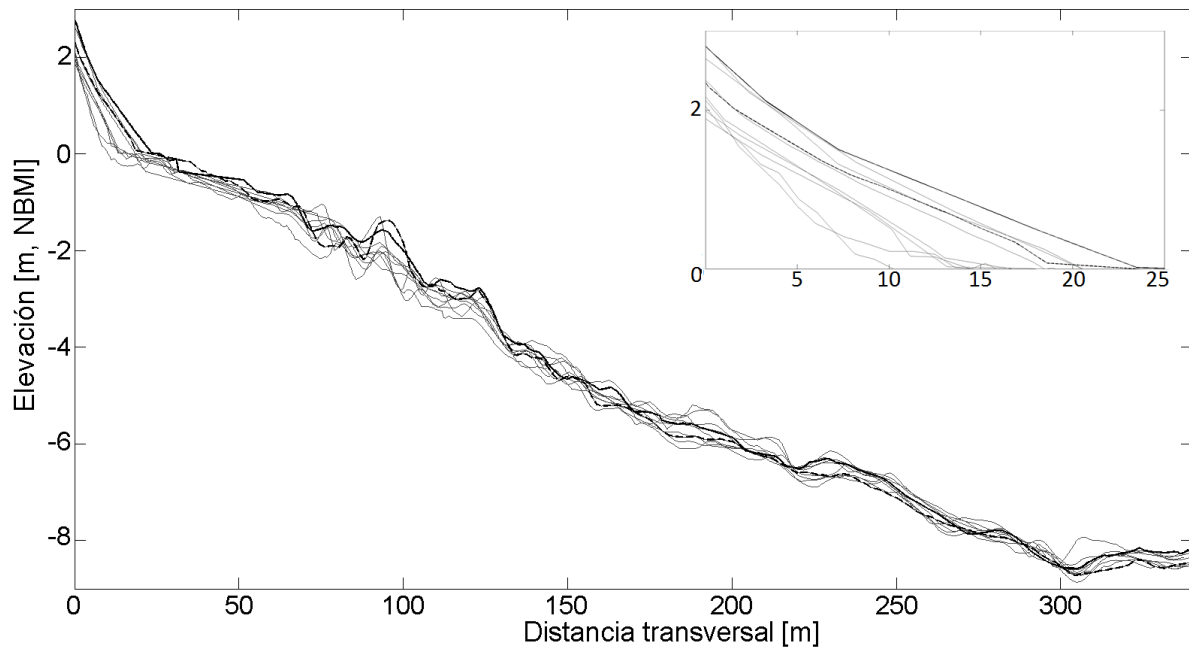
**Figura A8.** Evolución temporal del perfil TB8 y TB9 para la playa de guijarro (GC) para el periodo de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015) y la línea negra continua muestra el perfil final (agosto 2016). Con las líneas grises se muestran el resto de los meses. En la esquina superior derecha se hace un acercamiento a la zona subáerea.



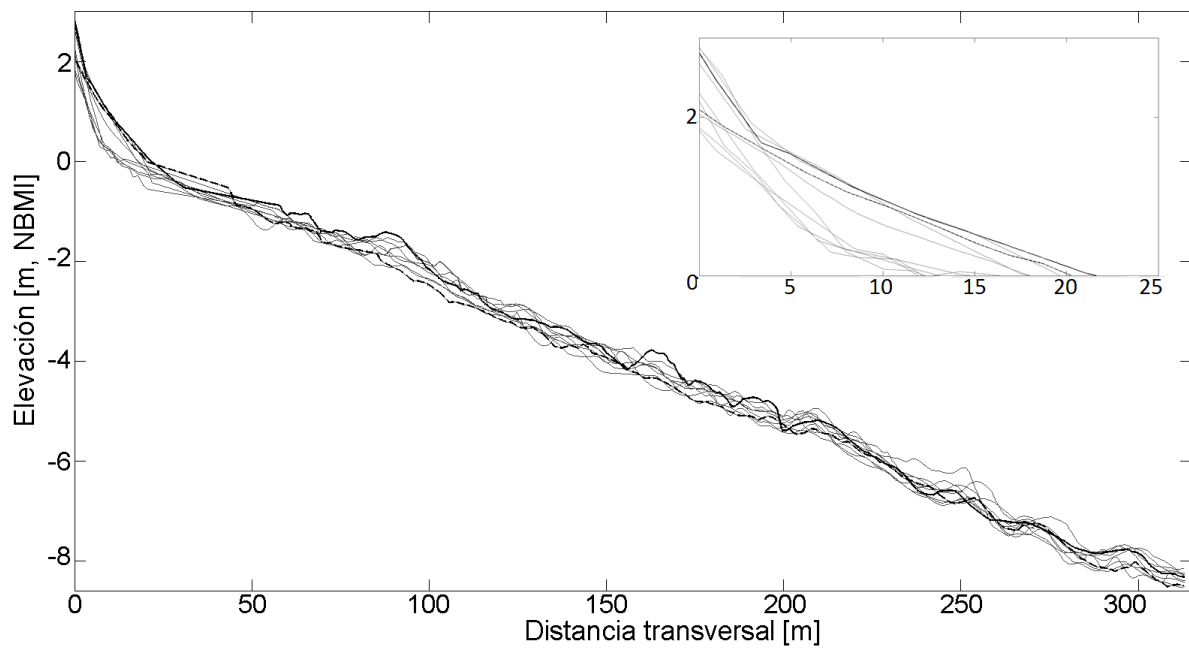
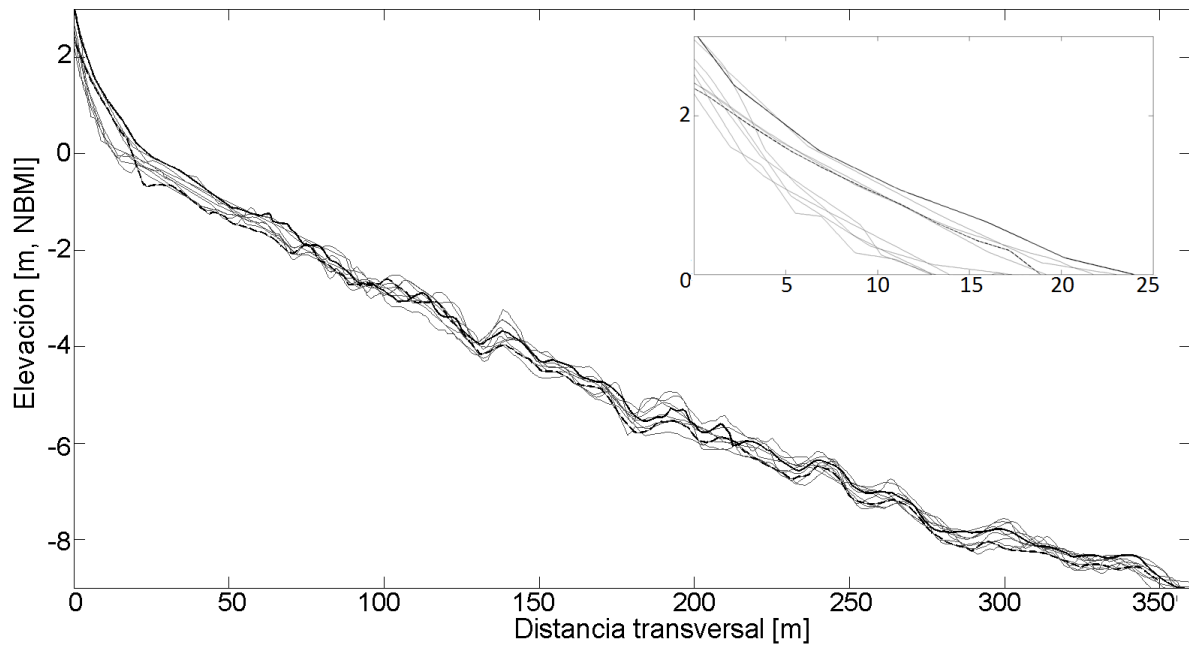
**Figura A9.** Evolución temporal del perfil TB1 y TB2 para la playa mixta (STX) para el periodo de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015) y la línea negra continua muestra el perfil final (agosto 2016). Con las líneas grises se muestran el resto de los meses. En la esquina superior derecha se hace un acercamiento a la zona subáerea.



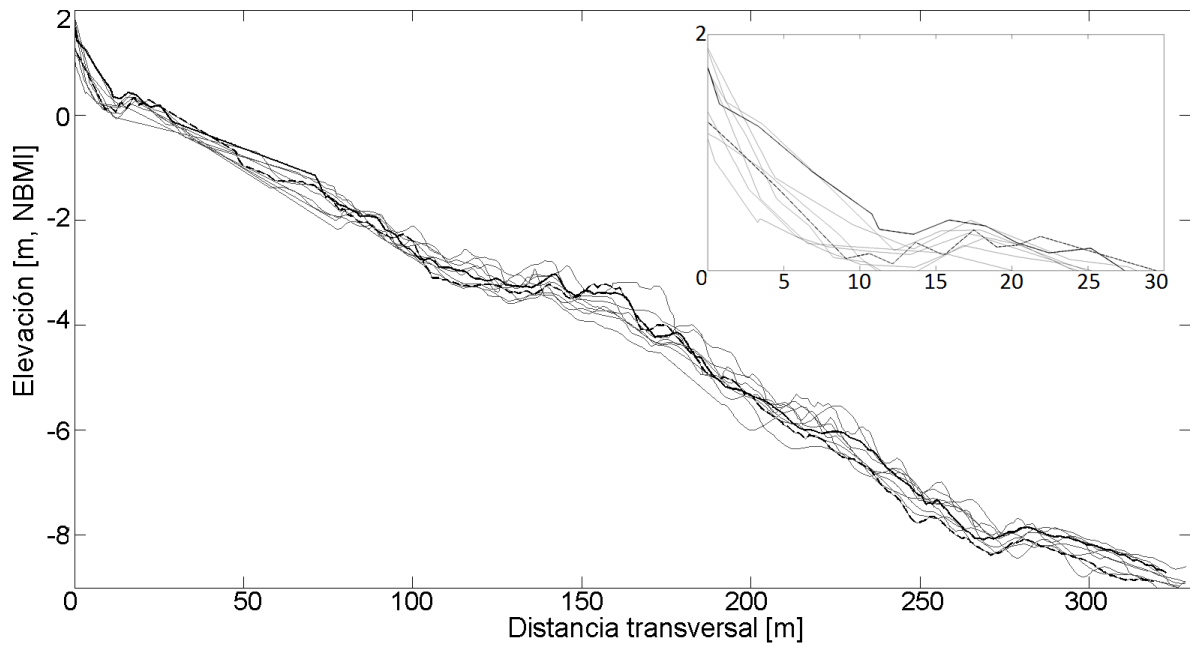
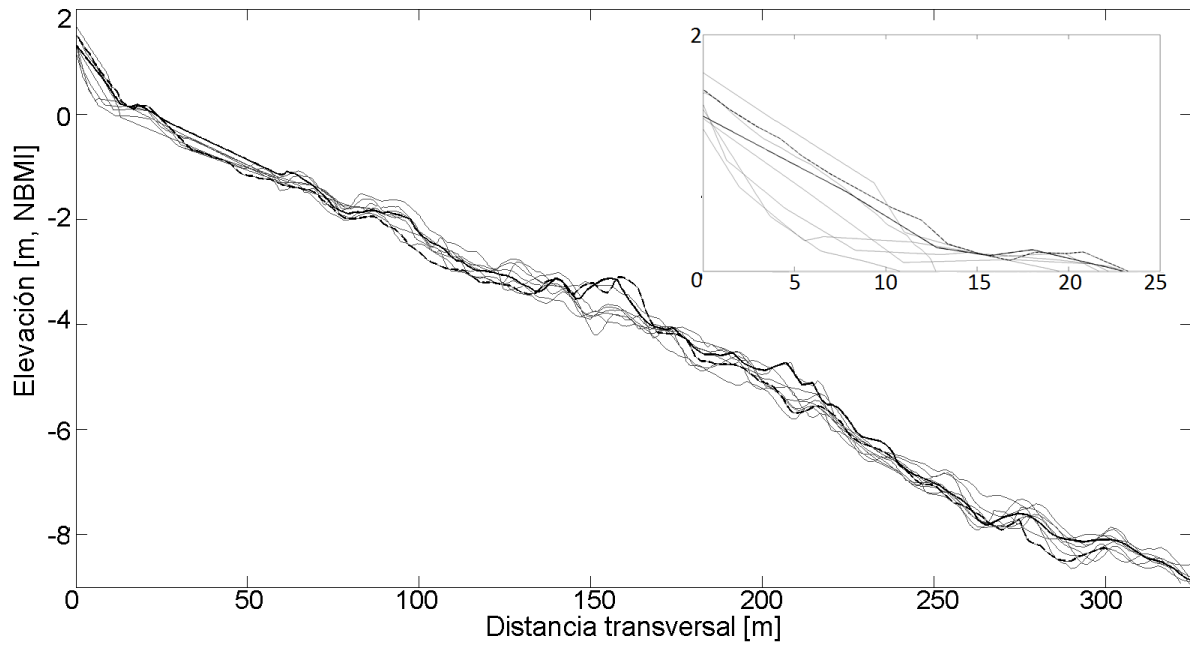
**Figura A10.** Evolución temporal del perfil TB3 y TB4 para la playa mixta (STX) para el periodo de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015) y la línea negra continua muestra el perfil final (agosto 2016). Con las líneas grises se muestran el resto de los meses. En la esquina superior derecha se hace un acercamiento a la zona subaérea.



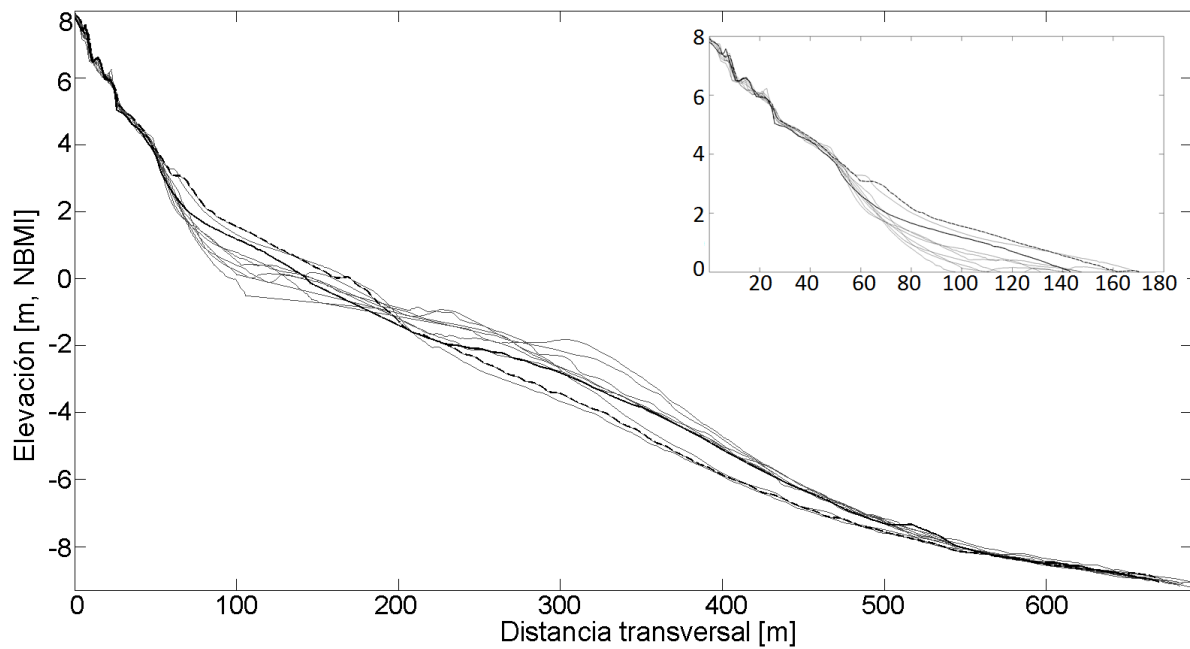
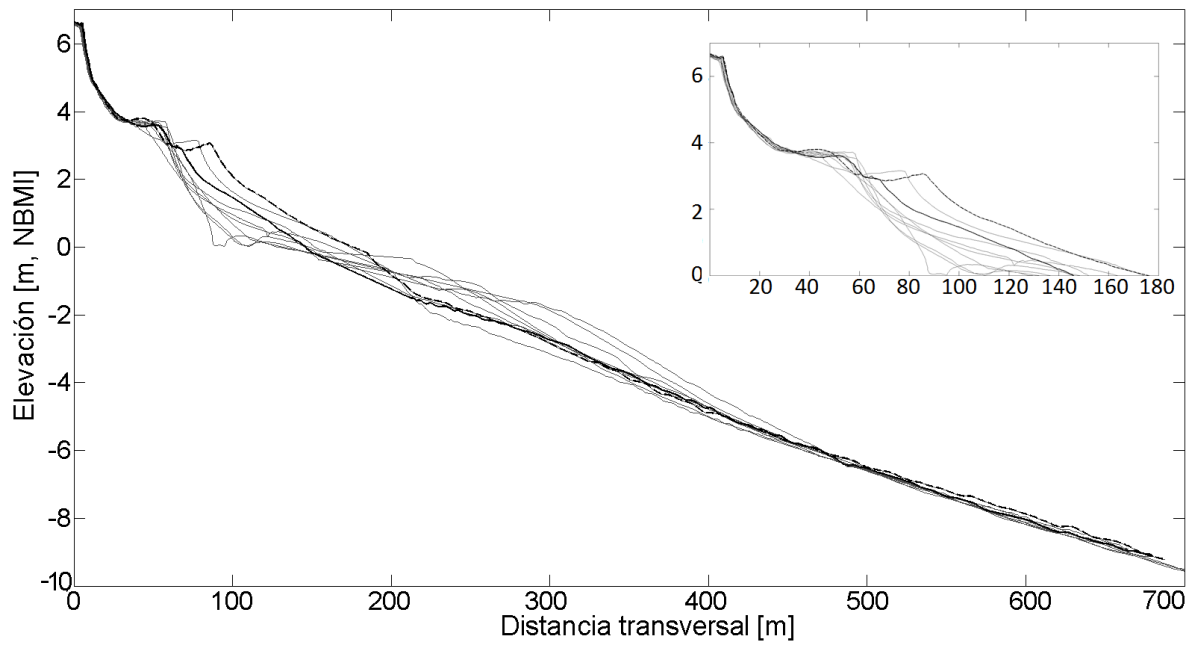
**Figura A11.** Evolución temporal del perfil TB5 y TB6 para la playa mixta (STX) para el periodo de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015) y la línea negra continua muestra el perfil final (agosto 2016). Con las líneas grises se muestran el resto de los meses. En la esquina superior derecha se hace un acercamiento a la zona subaérea.



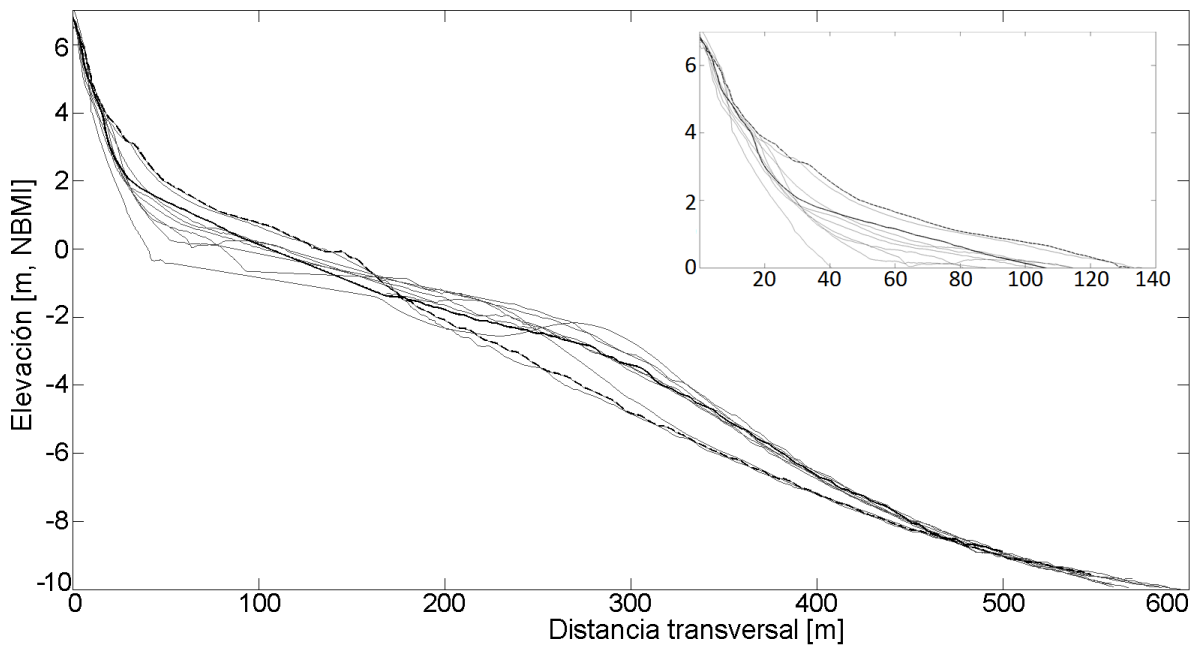
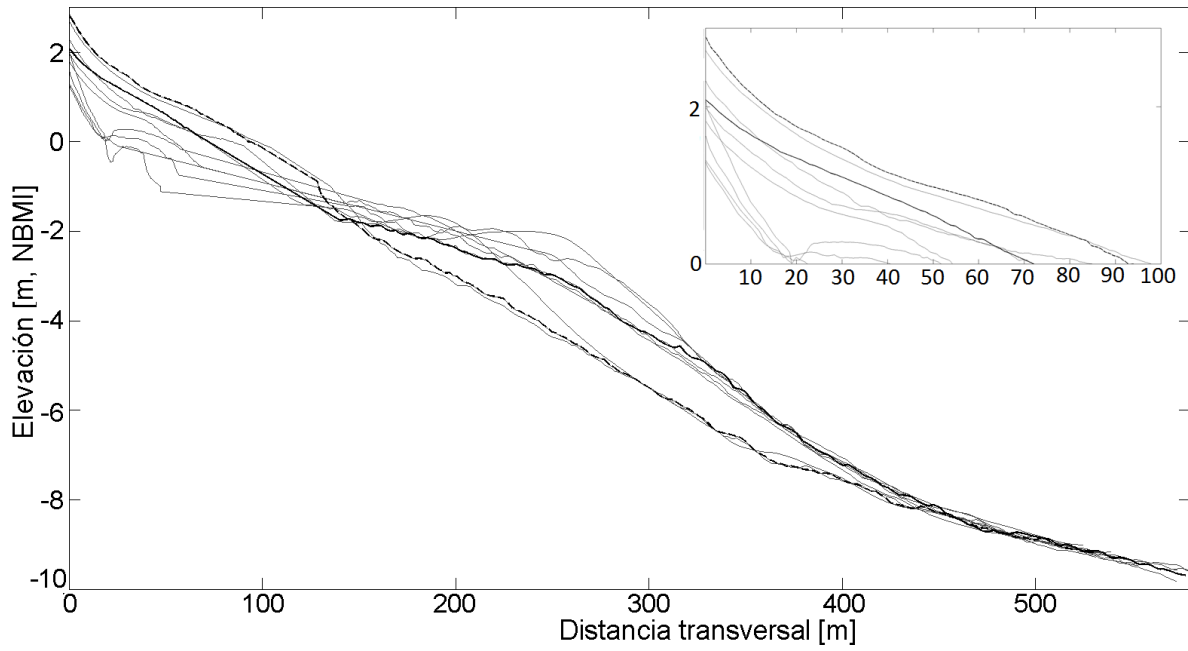
**Figura A12.** Evolución temporal del perfil TB7 y TB8 para la playa mixta (STX) para el periodo de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015) y la línea negra continua muestra el perfil final (agosto 2016). Con las líneas grises se muestran el resto de los meses. En la esquina superior derecha se hace un acercamiento a la zona subaérea.



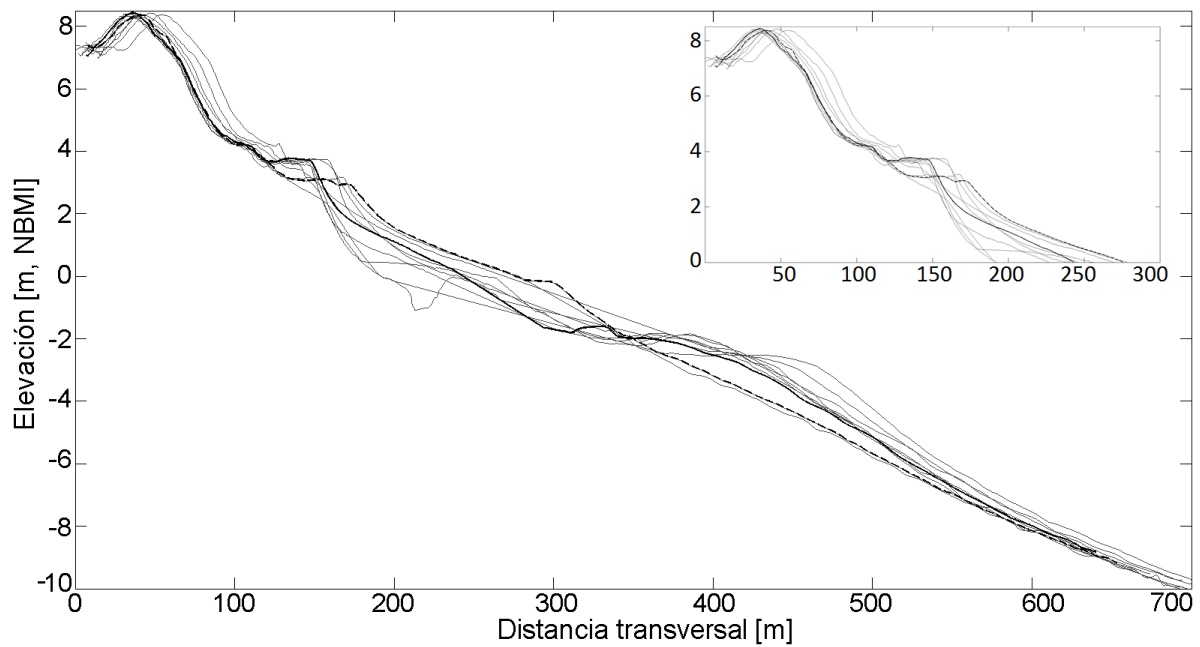
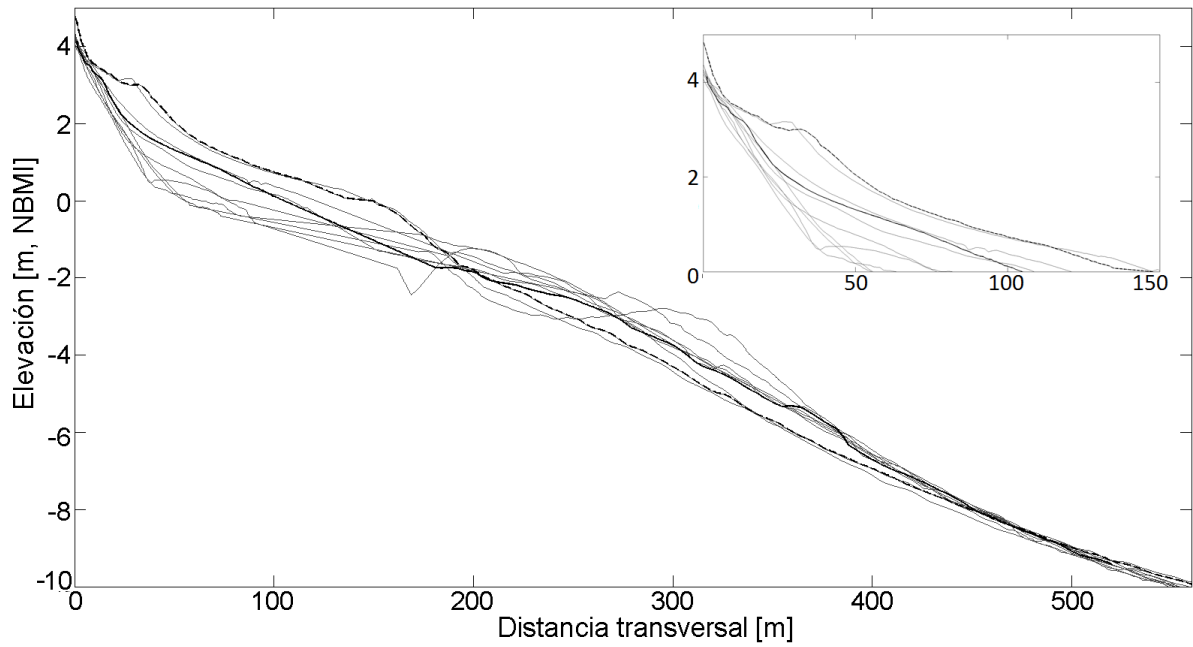
**Figura A13.** Evolución temporal del perfil TB9 y TB10 para la playa mixta (STX) para el periodo de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015) y la línea negra continua muestra el perfil final (agosto 2016). Con las líneas grises se muestran el resto de los meses. En la esquina superior derecha se hace un acercamiento a la zona subaérea.



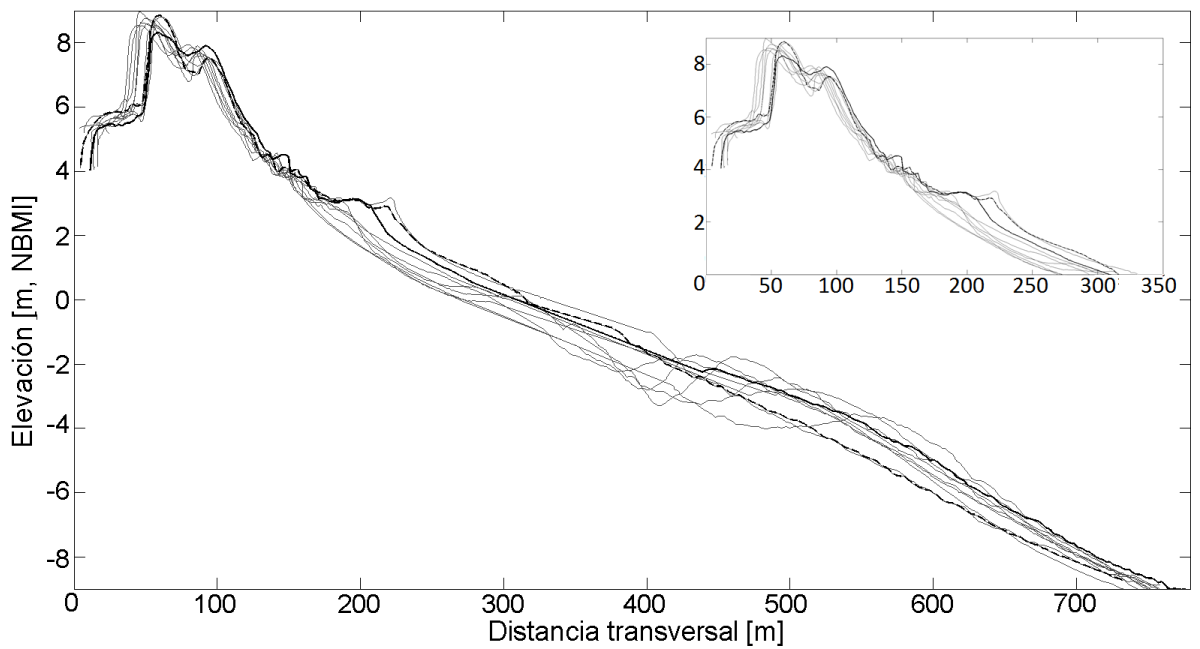
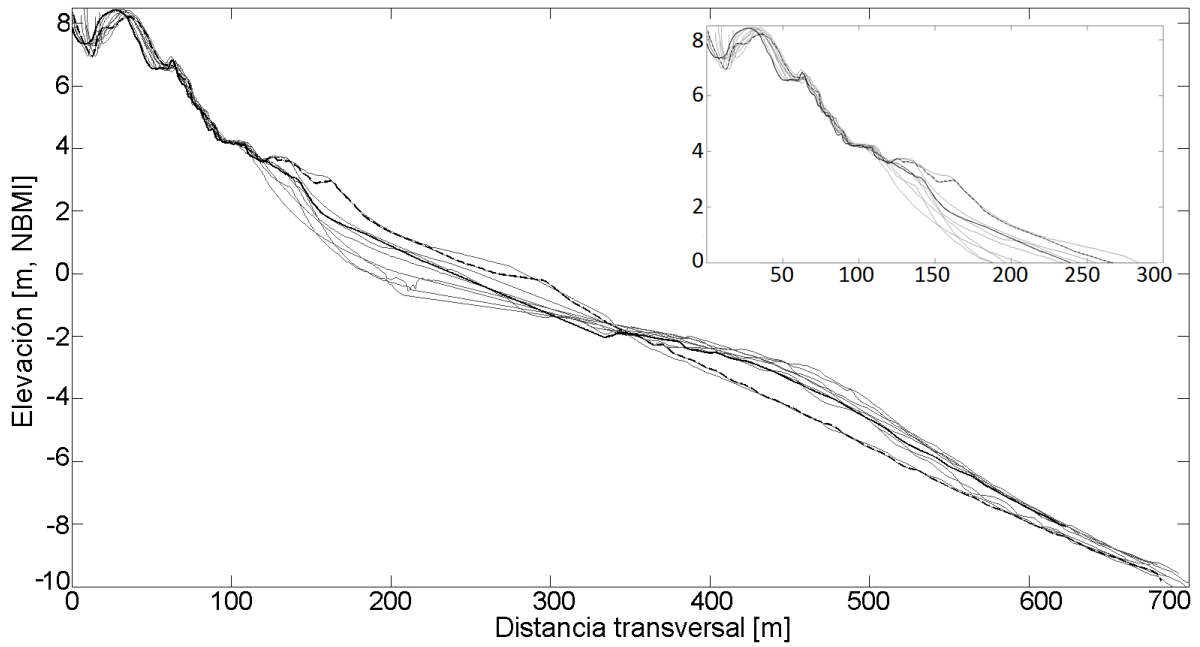
**Figura A14.** Evolución temporal del perfil TB1 y TB5 para la playa de arena (PH) para el periodo de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015) y la línea negra continua muestra el perfil final (agosto 2016). Con las líneas grises se muestran el resto de los meses. En la esquina superior derecha se hace un acercamiento a la zona subaérea.



**Figura A15.** Evolución temporal del perfil TB10 y TB14 para la playa de arena (PH) para el periodo de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015) y la línea negra continua muestra el perfil final (agosto 2016). Con las líneas grises se muestran el resto de los meses. En la esquina superior derecha se hace un acercamiento a la zona subaérea.



**Figura A16.** Evolución temporal del perfil TB19 y TB23 para la playa de arena (PH) para el periodo de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015) y la línea negra continua muestra el perfil final (agosto 2016). Con las líneas grises se muestran el resto de los meses. En la esquina superior derecha se hace un acercamiento a la zona subaérea.



**Figura A17.** Evolución temporal del perfil TB27 y TB30 para la playa de arena (PH) para el periodo de agosto 2015 a agosto 2016. La línea negra discontinua muestra el perfil inicial (agosto 2015) y la línea negra continua muestra el perfil final (agosto 2016). Con las líneas grises se muestran el resto de los meses. En la esquina superior derecha se hace un acercamiento a la zona subaérea.