

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

**FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS**



**Efecto de un espigón temporal en la
morfodinámica de una playa intermedia
expuesta a oleaje lejano**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFIA COSTERA

PRESENTA

Brianda Berenice Soto Aguilar

Ensenada, B.C., México Enero, 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

**FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS**

**Efecto de un espigón temporal en la morfodinámica de una playa
intermedia expuesta a oleaje lejano**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFIA COSTERA

PRESENTA

Brianda Berenice Soto Aguilar

Aprobada por:



**Dra. Amaia Ruiz de Alegría Arzaburu
Directora de tesis**



**Dr. Rafael Ramírez Mendoza
Sinodal**



**Dr. Alec Torres Freyermuth
Sinodal**

Dedicatoria

A mi padres Dora Hermila y Juan Francisco, por ser apoyarme en cada paso ya sea profesional o personal. Gracias a ellos estoy aquí.

A mi esposo Martin “chino”, por acompañarme en este camino, por ser el único que estuvo en cada desvelada, cada semana de exámenes, cada fin de semestre, escuchándome renegar por cada código que no me salía (que no fueron pocos) y alentándome a dar un paso a la vez.

A mi hijo Kai Alexander, quien sin saber que pasaba siempre tuvo un abrazo y un beso en los momentos que más los necesite, recordándome que el es la razón por la que busco superarme cada día.

A mi familia y todos aquellos que de alguna forma estuvieron presentes a lo largo de este camino.

Agradecimientos

Al **CONACYT** por otorgarme la beca que me permitió realizar mis estudios de maestría, a la **Facultad de Ciencias Marinas e Instituto de Investigaciones Oceanológicas** por los recursos que me brindaron para complementar mi aprendizaje más allá de las aulas.

A mi directora de tesis, **Dra. Amaia Ruiz de Alegría Arzaburu** por su tiempo, enseñanzas, paciencia, comprensión y recursos otorgados para poder realizar este trabajo. Por orientarme en los momentos más difíciles y alentarme a seguir adelante.

A mis sinodales, **Dr. Rafael Ramírez y Dr. Alec Torres** por siempre estar dispuestos a apoyarme con sus comentarios y sugerencias para mejorar este trabajo.

A todos los MORDICS, por hacer el campo más ameno con su compañía. Personalmente siento la necesidad de agradecer a todos por igual, porque cada uno intentó enseñarme cada una de sus áreas. A **Carsolio** por ser el que me dio la bienvenida al campo desde la licenciatura, además de siempre estar dispuesto a enseñarme a usar todos los juguetes del campo y que siempre puedo hacer las cosas más fácil con un código. A **Julio**, por toda su paciencia para explicarme el procesado de los datos más de una vez y por su tiempo dedicado a revisar los resultados obtenidos, así como ayudarme a buscar la explicación de las cosas “raras”, también por esas madrugadas de chisme en la panga sin duda mi parte favorita del campo. Al Doc **Adrián**, que a pesar de que sus enseñanzas académicas no fueron pocas, me quedo con sus palabras, siempre alentándome a creer en mi, mostrarme con el ejemplo que en este camino necesita mucha paciencia, dedicación y desveladas, gracias por cada vez que quise rendirme estar ahí para decir que ya estaba por terminar, por esas llamadas así fueran a las 2 am para despejar dudas académicas y existenciales. A **Angie** por siempre estar dispuesta a apoyarme sobre todo cuando tenía dudas matemáticas, además de siempre tener las puertas de su cubo abiertas para el café con pan. A **Tadashi** por ayudarme con todas las cuestiones de la modelación numérica, su soporte técnico mejor que la Genius Bar y el apoyo para trabajar de manera remota que sin duda fue de gran ayuda para poder terminar mi tesis. A **Deivid** por ser un gran compañero de clase y por su gran disposición para enseñarme lo más básico de los drones y por siempre tener un tema de conversación interesante. A Bea por ser gran compañera de cubo y siempre recordarme sobre las tareas y siempre estar dispuesta para hacer un grupo de estudio. A mi ex MORDICS favorito, **Martin** que siempre me ofrecía ir a campo por mi, sobre todo en tiempo de frío (aunque no aceptaba).

A **Sandra** y a **Luz** porque a pesar del poco tiempo de conocerlas, me han brindado su amistad y cariño a mi y a mi familia.

A mi yumis **Lalo** por ser la mejor coma del mundo, por estar con nosotros a pesar de la distancia y brindarnos su apoyo incondicional.

Gracias a todos los que hicieron esto posible.

Resumen

Los espigones son estructuras normales a la línea de costa que interrumpen el transporte de sedimento dando como resultado los cambios morfológicos. El objetivo de este trabajo es determinar los cambios morfológicos generados por un espigón de ~250 m de longitud instalado durante 2.5 años en una playa intermedia expuesta a oleaje lejano. Para ello, se recabaron mediciones morfológicas mensuales durante 35 campañas que comprendieron 44 perfiles topobatómicos medidos a lo largo de ~5.5 km de playa desde agosto de 2015 hasta septiembre de 2018. De forma concurrente, se obtuvo una serie de tiempo de parámetros horarios del oleaje medidos con un perfilador acústico de corrientes Doppler (ADCP) instalado a 2.5 km de la costa a una profundidad de 20 m. La playa presenta variaciones estacionales marcadas que muestran la formación de la barra submareal y erosión de la berma en invierno, migración de la barra submareal hacia la orilla en primavera y formación de la berma en verano. Además, se observan variaciones interanuales asociadas a la anomalía climática de El Niño, que indujo oleaje de mayor energía durante los meses de invierno 2015-16. Tres meses después de la instalación del espigón, la línea de costa perdió su homogeneidad al sur de la estructura, sin embargo, tres meses después de su remoción ésta recuperó su forma. La playa al sur del espigón muestra la mayor variabilidad volumétrica, pérdidas mensuales de hasta $-71 \text{ m}^3/\text{m}$ y ganancias de hasta $47 \text{ m}^3/\text{m}$. Por el contrario, la playa al norte del espigón es más estable, y presenta pérdidas y ganancias mensuales máximas de $-55 \text{ m}^3/\text{m}$ y $53 \text{ m}^3/\text{m}$ respectivamente. Los patrones de erosión/acreción en ambos lados de la estructura están controlados por las características del oleaje incidente. Durante periodos de alta energía ($H_s > 2.5 \text{ m}$), ambas secciones de playa se erosionaron de forma similar. Sin embargo, durante condiciones de energía medio-baja ($H_s = 1-1.5 \text{ m}$) típica de primavera y verano la dirección (Dir) del oleaje dictó la respuesta morfológica de cada sección de playa. Cuando la incidencia del oleaje fue ligeramente oblicua ($\text{Dir} = 250-265^\circ$), ambas secciones ganaron sedimento, pero si la energía del oleaje aumentaba ($H_s \sim 2 \text{ m}$), la sección norte es era más vulnerable a erosionarse. Cuando la incidencia del oleaje fue normal a la costa ($\text{Dir} = 270^\circ$), el sur se erosionó y el norte ganó sedimento, pero si la energía del oleaje disminuía ($H_s < 2 \text{ m}$) este patrón se invertía. A pesar de ser una playa con dominancia de transporte de sedimentos transversal, este trabajo demostró que variaciones ligeras en la dirección del oleaje generaron cambios morfológicos relevantes hasta 500 m de cada lado del espigón.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 CONTEXTO GENERAL	1
1.2 ANTECEDENTES	2
1.3 CONCEPTOS BÁSICOS.....	3
1.3.1 <i>Morfodinámica de playas</i>	4
1.3.2 <i>Estructuras costeras: espigones</i>	6
CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	9
2.1 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	9
2.2 HIPÓTESIS	9
2.3 OBJETIVOS	9
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	11
3.1 ÁREA DE ESTUDIO	11
3.2. MEDICIONES DE OLEAJE	12
3.3. MEDICIONES MORFOLÓGICAS.....	13
3.4. CÁLCULOS VOLUMÉTRICOS	15
3.5 FLUJOS DE ENERGÍA	16
3.6 ESPIGÓN TEMPORAL	17
CAPÍTULO 4. RESULTADOS.....	18
4.1 CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE INCIDENTE.....	18
4.2.- VARIABILIDAD MORFOLÓGICA DE LA PLAYA	22
4.3. VARIABILIDAD VOLUMÉTRICA DE LA PLAYA	24
4.3.1. <i>Promedio mensual</i>	24
4.3.2.- <i>Variabilidad longitudinal</i>	27
4.4. EFECTO MORFOLÓGICO DEL ESPIGÓN.....	29
4.4.1 <i>Variabilidad morfológica mensual</i>	29
4.4.2 <i>Diferencias morfológicas mensuales</i>	34
4.4.3 <i>Diferencias morfológicas acumuladas</i>	37
4.4.4 <i>Variabilidad volumétrica a ambos lados del espigón</i>	39
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN	41
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	43
REFERENCIAS.....	44
ANEXOS.....	49

Figura 1.- Descripción de las zonas de la playa en vista transversal (Bird, 2008).	5
Figura 2.- Respuesta de la playa en presencia de un espigón (Serkan, 2017). .	7
Figura 3.- Esquema de generación de corrientes de retorno por la presencia de espigones. (French, 2001).	8
Figura 4.- Ubicación geográfica de la playa de estudio (franja roja) en la Bahía de Todos Los Santos, que comprende las playas arenosas de Ensenada (Playa Hermosa) y El Ciprés. El punto naranja muestra la localización del perfilador acústico de corrientes tipo Doppler (ADCP) utilizado para medir las características del oleaje incidente (modificado de Vidal-Ruiz y Ruiz de Alegría-Arzaburu, 2020).	11
Figura 5.- Ejemplos de las estructuras costeras presentes en la bahía Todos Santos. A) muestra el andador y malecón presentes al norte en la zona de estudio, b) el puerto de Ensenada al norte del área de estudio, c) espigón temporal en la zona centro-sur de las playas de ensenada, d) dunas costeras en la parte central del área de estudio, e) enrocamiento al sur del área de estudio.	12
Figura 6.- Anclaje del perfilador acústico de corrientes tipo Doppler (ADCP) instalado a 20 m de profundidad en la mitad del área de estudio.....	13
Figura 7.- Vista aérea de la playa de estudio del TB1 al TB30 comprenden la playa Ensenada, del TB34 al TB44 comprenden la playa El Ciprés. Los perfiles TB31 al TB33 en gris, son los perfiles TB interpolados a partir de perfiles batimétricos. El perfil en azul es el TB33 utilizado para analizar el comportamiento de la playa y el TB35 en naranja muestra el perfil al sur del espigón utilizado para los cálculos volumétricos. En verde podemos apreciar la ubicación del espigón temporal.	14
Figura 8.- Ejemplo de dos personas haciendo mediciones topográficas usando el GPS diferencial montado en un bastón de aluminio con dos ruedas (panel a) y grafica de los 44 perfiles topo-batimétricos colectados mensualmente a lo largo de la playa de estudio (panel b).	15
Figura 9.- Fotografías del espigón temporal. En el panel superior, una imagen de google earth y en el inferior una fotografía tomada desde la playa al norte del espigón.....	17
Figura 10.- Serie de tiempo de las mediciones horarias de los parámetros integrales de oleaje (línea azul) y sus promedios entre las campañas de muestreo (línea negra) de agosto de 2015 a septiembre de 2018; altura de ola significativa (H_s), periodo pico espectral (T_p) y dirección del oleaje (Dir) de arriba abajo, respectivamente.....	19

- Figura 11.-** Promedios entre mediciones topo-batimétricas de altura significativa de la ola (H_s) (panel superior), flujo de energía transversal (P_x) (panel intermedio), los flujos positivos indican un flujo de tierra hacia mar y flujo de energía longitudinal (P_l) (panel inferior) los flujos positivos indican flujos con dirección norte a sur, mientras que los flujos negativos indican flujos de sur a norte..... 21
- Figura 12.-** Evolución estacional del perfil topo-batimétrico TB34 durante los meses de verano, otoño e invierno de 2015 a 2018. La línea negra solida muestra la elevación de 0 m (nivel de bajamar media inferior) que separa la sección IS de SUB, las líneas de color solido indican el perfil de la estación (mes). La línea segmentada en enero 2017 muestra el perfil medido después de una tormenta. 23
- Figura 13.-** Anomalía volumétrica en m^3/m desde agosto 2015 a septiembre 2018: TOT (barras grises), subaérea (IS, línea azul) y submareal (SUB, línea negra)..... 26
- Figura 14.-** Diferencias volumétricas acumuladas de la sección subaérea (IS), submareal (SUB) y total (TOT) de agosto 2015 a septiembre de 2018 a lo largo de la playa (distancia desde la posición de la estructura, valores positivo indican la sección hacia el norte y negativos hacia el sur de la estructura)..... 28
- Figura 15.-** Modelos de elevación digital de agosto de 2015 a septiembre de 2018. El eje X muestra la distancia longitudinal desde el sur de la playa de estudio (TB44). El eje Y muestra la distancia transversal desde la elevación de 5 m. La línea de contorno blanca representa la posición de la línea de costa de 0 m respecto al nivel de bajamar media inferior (NBMI). E17* representa la segunda medición tomada a finales de enero 2017 después del arribo de un oleaje de tormenta. Los colores fríos indican la sección submareal y los cálidos la subaérea. 33
- Figura 16.-** Diferencias morfológicas entre campañas topo-batimétricas desde septiembre 2015 a septiembre 2018. En el año 2017 se cuenta con dos mediciones de enero con la finalidad de captar el efecto de una tormenta (*). El ΔZ muestra la diferencia en elevación con respecto al mes anterior. 36
- Figura 17.-** Diferencias morfológicas acumuladas desde agosto 2015. E17* representa una medición realizada después de una tormenta. El ΔZ muestra la diferencia en elevación con respecto a agosto 2015. 38
- Figura 18.-** En el panel superior volúmenes despromediados de la sección submareal cercana, entre elevaciones de -2 a 2 m al sur (azul) y norte (negro) del espigón. En el panel inferior, energía longitudinal (P_l) de color naranja y energía transversal (P_x) en color azul. Valores de energía negativos indican flujos hacia el sur para P_l , valores positivos para P_x indican flujos hacia fuera de la costa.39

Figura 19.- Anomalías volumétricas subaéreas ($z=[0, 2]$ m) de septiembre 2015 a septiembre 2018. Los colores cálidos representan acreción y los fríos erosión. La distancia transversal está referida a la posición del espigón. Los cuadros en blanco muestran falta de datos.	40
Figura 20.- Modelo conceptual de la variabilidad morfológica longitudinal en ausencia (arriba) y presencia del espigón (abajo) para diferentes escenarios de oleaje incidente, representado por la flecha azul.	42
Figura 21.- Modelo de elevación digital en el panel izquierdo, perfil al norte en el panel superior central y perfil al sur del espigón, en negro el mes anterior y en azul el mes actual. En el panel inferior izquierdo el flujo longitudinal seguido por los parámetros de oleaje.	49
Figura 22.- Modelo de elevación digital en el panel izquierdo, perfil al norte en el panel superior central y perfil al sur del espigón, en negro el mes anterior y en azul el mes actual. En el panel inferior izquierdo el flujo longitudinal seguido por los parámetros de oleaje.	50
Figura 23.- Modelo de elevación digital en el panel izquierdo, perfil al norte en el panel superior central y perfil al sur del espigón, en negro el mes anterior y en azul el mes actual. En el panel inferior izquierdo el flujo longitudinal seguido por los parámetros de oleaje.	50
Figura 24.- Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.	51
Figura 25.- Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.	51
Figura 26.- Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.	52
Figura 27.- Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.	52
Figura 28.- Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.	53
Figura 29.- Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.	53

Figura 30.- Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.
..... 54

Figura 31.- Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.
..... 54

Figura 32.- Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.
..... 55

Figura 33.- Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.
..... 55

Figura 34.- Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.
..... 56

Figura 35.- Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.
..... 56

Capítulo 1. Introducción

1.1 Contexto general

La zona costera es uno de los ecosistemas más dinámicos e importantes, en gran medida por los diversos servicios ambientales y económicos que brinda ([Fabbri, 1998](#)). Esta región, comprende tan solo el 10% del territorio total de nuestro planeta pero en éste se concentra el 50% de la población mundial ([Thia-Eng, 1993](#)). Las proyecciones de cambio climático futuro indican que la población costera seguirá creciendo ([Vousdoukas et al., 2020](#)); esto ha dado lugar a que el campo de la investigación costera aumente de manera importante.

Al menos un tercio de la zona costera está compuesta por playas arenosas y una gran parte se están erosionando. A pesar de que la erosión es un proceso natural en las playas ([Senechal et al., 2015](#)), en los últimos años este proceso se ha visto acelerado por efectos del calentamiento global, el represamiento de sedimentos, así como por la construcción de estructuras costeras que modifican el transporte de sedimentos en las playas. Y la erosión de las playas, sea natural o antropogénica, puede causar impactos ambientales y económicos importantes ([Medellín y Torres-Freyermuth, 2019](#)).

La morfología de las playas es modificada por distintos forzamientos, como el oleaje incidente, nivel de marea astronómica, marea de tormenta, viento local, geología de la zona, corrientes, y la interacción entre ellos, definirá el estado morfodinámico de la playa. Uno de los factores mas importantes que dominan los ciclos de erosión en las playas son las tormentas ([Hill et al., 2004](#)). Los procesos de recuperación de la playa han sido menos estudiados, mientras que algunas playas tardan unos pocos días en recuperarse, otras pueden tardar décadas ([Burvington et al., 2017](#)).

Actualmente existe poca información acerca de los mecanismos que controlan la recuperación de las playas después de la remoción de estructuras costeras ([Medellín et al., 2018](#)). La magnitud de la erosión inducida dependerá de la

resiliencia de la playa ([Jiménez et al., 2011](#)), y la resiliencia determinará el tiempo que tomará la playa en regresar a su condición pre-disturbio ([Medellín et al., 2018](#)). Por esto, es de suma importancia conocer el estado morfodinámico, capacidad de recuperación y estabilidad de la playa. La estabilidad de un ecosistema dependerá de la capacidad de resistencia y resiliencia para afrontar una perturbación natural o antropogénica ([Medellín et al., 2018](#)). La forma más común de evaluar la resiliencia es medir la capacidad de la playa para recuperarse (reconstruirse) después del impacto de una tormenta, o medir la capacidad de la playa de soportar los cambios morfológicos asociados a una tormenta ([Senechal et al., 2015](#)).

1.2 Antecedentes

Los espigones son estructuras costeras comunes utilizadas para atrapar sedimentos con el fin de (re)construir una playa o retardar la erosión o deriva de sedimentos. Estas estructuras han sido ampliamente estudiadas debido a las modificaciones que generan en la morfodinámica de la costa adyacente. A pesar de ser estructuras muy comunes, no existen tantos estudios que reporten la relación entre las tasas de erosión/acreción asociadas a estas estructuras costeras ([Medellín y Torres-Freyermuth, 2019](#)).

A través de distintos estudios se ha reportado que los espigones son capaces de generar corrientes de retorno como resultado de la desviación de la corriente longitudinal hacia mar adentro por colisión con la estructura ([Castelle y Coco, 2013](#); [Scott et al., 2016](#)). Estas corrientes son capaces de generar el movimiento de grandes cantidades de sedimento costa afuera, generando un desbalance sedimentario de la playa.

La respuesta clásica de los espigones es generar acreción de sedimentos corriente arriba y erosión corriente abajo ([Rea y Komar, 1975](#); [Fowler y Smith 1987](#); [Bodge y Dean 1987](#)). Debido a la disminución de la velocidad de la corriente (e incluso puede cambiar la dirección) se favorece la deposición del sedimento, y cuando la corriente longitudinal sobrepasa el espigón, ésta se intensifica e induce

la erosión en el lado de deriva corriente abajo. En algunos casos, la instalación de espigones se realiza en grupos o series de espigones, y estos interfieren en el recambio de agua y pueden modificar la calidad del agua ([Kantardgi,1996](#)).

Debido a los efectos relevantes de los espigones en el transporte de sedimentos, es imperativo tratar de predecir su comportamiento bajo distintos escenarios hidrodinámicos. Por tanto, diversos estudios han tratado de reproducir la modificación de la dinámica costera generada por los espigones mediante modelación física y numérica (e.g. [Sherman et al., 1990](#), [Perlin y Dean, 1978](#), [Price y Tomlinson, 1968](#) , [Hanson y Kraus, 1991](#)). Para analizar los efectos de las estructuras costeras es necesario conocer las condiciones del oleaje, comprender los procesos que controlan la morfodinámica costera, así como el análisis del transporte de sedimentos ([Appendini et al., 2012](#)).

Existen pocos estudios que reporten la resiliencia de las playas y sus aplicaciones en ingeniería costera, y la información disponible sobre los mecanismos que controlan la recuperación morfológica de la playa después de retirar estructuras costeras es limitada ([Lira-Pantoja et. al., 2014](#) ; [Medellin et al., 2018](#)). En México se han realizado algunos estudios para comprender la morfodinámica costera asociada a los efectos de estructuras costeras ([Medellin y Torres-Freyermuth, 2019](#)). Además, se han realizado distintos estudios relacionados con la erosión de las playas y su capacidad de recuperación después de oleaje energético asociado al fenómeno de El Niño ([Ruiz de Alegría-Arzaburu y Vidal-Ruiz, 2018](#)), o a la respuesta morfológica de la playa asociada a la instalación de estructuras costeras temporales ([Medellín et al., 2018](#)).

1.3 Conceptos básicos

En esta sección se describen conceptos necesarios para la comprensión adecuada del contenido de la tesis. Por un lado, se define el concepto de morfodinámica de playas, donde se describe el concepto de playa y sus secciones a través de un perfil, la estacionalidad de las playas, así como otros cambios morfológicos típicos durante las variaciones de la energía del oleaje incidente.

Después se define el concepto de espigón, y se describen los cambios morfológicos típicos asociados a estas estructuras costeras transversales.

1.3.1 Morfodinámica de playas

El concepto de “morfodinámica costera” fue descrito por primera vez por [Wright y Thom \(1977\)](#) como la interacción entre la morfología y la hidrodinámica, que resulta en el transporte de sedimentos. Los estudios de morfodinámica tienen como objetivo entender los procesos físicos que generan los cambios morfológicos costeros, y que están asociados a forzamientos hidrodinámicos, que son principalmente el oleaje, el viento, la marea, y las corrientes asociadas. La finalidad de estos estudios es entender los procesos físicos, para poder mejorar las predicciones de los cambios morfológicos de las costas a corto, mediano y largo plazo ([Masselink et al., 2008](#)).

[Short \(1999\)](#) define playa (**Figura 1**), como "una acumulación de sedimentos depositados por las olas que se encuentran entre la base de la ola modal y el límite superior de la zona de lavado (*swash*), donde la base de la ola es la profundidad máxima a la que las olas pueden transportar sedimento hacia la costa". Las playas presentan variaciones morfológicas continuas debido principalmente a la incidencia del oleaje, las corrientes y cambios en el nivel del mar ([Wright et al., 1985](#); [Splinter et al., 2018](#)).

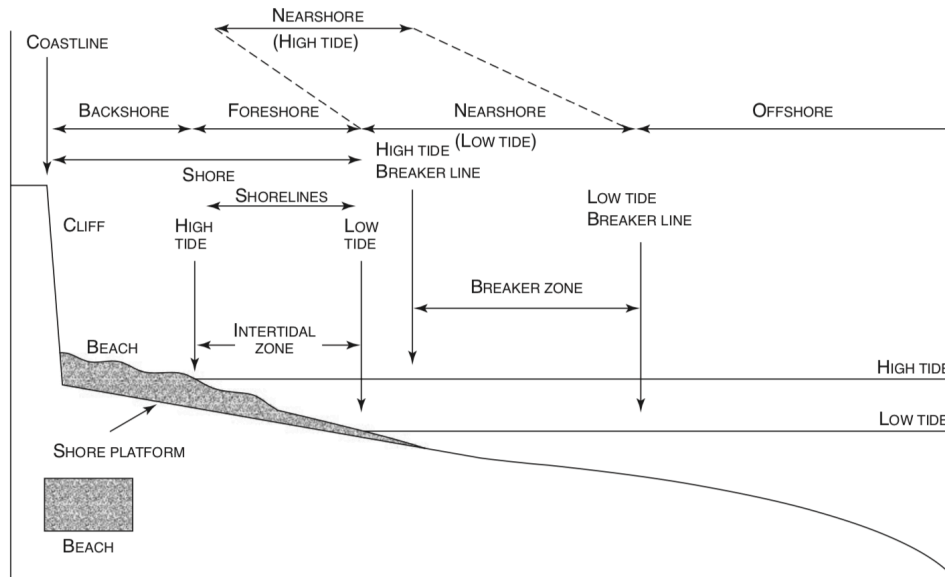


Figura 1.- Descripción de las zonas de la playa en vista transversal (Bird, 2008).

Cuando las playas presentan oleaje con variabilidad estacional muy marcada, los cambios morfológicos también son estacionales ([Short, 1980](#)). Las playas del NW de Baja California, al igual que las de California (EEUU), están expuestas a oleaje estacional, por tanto, muestran erosión en condiciones de alta energía de invierno y recuperación en condiciones de baja energía de verano ([Ruiz de Alegría-Arzaburu et al., 2016](#)) . [Shepard \(1950\)](#) describió los cambios estacionales del perfil de playa asociados a cambios en la energía del oleaje, y mostró que en invierno la playa subaérea se erosiona dando lugar a la formación de una barra submareal, mientras que, en verano, la playa subaérea recupera sedimento debido a la migración de la barra hacia tierra.

Los cambios morfológicos de la playa pueden ser cuantificados de forma transversal, a través de la variación estacional del perfil de playa, o de forma longitudinal a través de la evolución de la línea de costa o modificaciones en la forma de las barras submareales ([González et al., 2010](#)). En 1969 [Hayes y Boothroyd](#) reportaron que durante condiciones de oleaje más intenso, que se presenta en invierno, la berma de la playa se erosiona y ese material generalmente se deposita en la barra; mientras que en condiciones de calma de verano propician la migración de la barra hacia la costa, esto es mejor conocidos

como “variación estacional del perfil de playa” ([Aubrey, 1979](#)). Una forma muy común de cuantificar la recuperación o pérdida de la línea de costa es mediante la comparación de la misma, en un intervalo de tiempo determinado.

La erosión de las playas es un proceso natural que ocurre cuando en un intervalo de tiempo la línea de costa se traslada tierra adentro y conlleva una pérdida volumétrica en la sección subaérea. Pero también puede ocurrir un desequilibrio sedimentario a lo largo de la celda litoral, por tanto, existe erosión cuando el sistema litoral en su conjunto pierde su equilibrio dinámico y su cantidad de sedimento disminuye año tras año ([González, 2013](#)). Una forma muy común de cuantificar la recuperación de la costa después de un periodo de erosión es mediante la comparación de la posición de la línea de la costa o del volumen de arena año tras año durante la misma estación.

1.3.2 Estructuras costeras: espigones

En muchas costas se está reduciendo el aporte sedimentario por ríos debido a la construcción de presas, ocasionando así, dificultades en la estabilización de la línea de costa ([Álvarez et al., 2006](#)). Muchas playas presentan la construcción de estructuras costeras, las cuales alteran los procesos de transporte de sedimentos ([Odériz et al., 2014](#)), y junto con el hecho de que el aporte sedimentario por ríos es limitado, pueden generar un desequilibrio en la distribución longitudinal del sedimento, y ocasionar erosión en algunos lugares.

Los espigones son estructuras costeras salientes que tienen el propósito de alterar la morfología litoral ([Ozolçer, 2006](#); [Vaidya 20015](#)). Estas estructuras se ubican dentro de la zona de rompiente y están típicamente orientadas de forma perpendicular a la costa, su principal función es atrapar el sedimento transportado por las corrientes longitudinales. Se utilizan principalmente para crear playas o mitigar la erosión, y estabilizar canales para facilitar la navegación marítima ([Mohanty et al., 2015](#); [French, 2001](#)). Consecuentemente, modifican la distribución natural de los sedimentos ([Pranzini et al., 2018](#)).

La **Figura 2** representa la respuesta clásica de un espigón en la presencia de una corriente longitudinal predominante por la incidencia oblicua del oleaje. Esta estructura favorece la acreción de la playa en dirección del oleaje dominante ([Jackson et al., 2015](#); [Guimarães et al., 2016](#)) y erosión del otro lado de la estructura. Cuando la corriente longitudinal se acerca al espigón, su velocidad disminuye (e incluso puede cambiar su dirección) favoreciendo la depositación del sedimento que acarrea y generando acreción en el lado de deriva (*updrift*). Una vez que la corriente longitudinal sobrepasa el espigón, se intensifica, y aunado a la falta de sedimento, induce la erosión en el lado de deriva hacia abajo (*downdrift*) ([Serkan, 2017](#)).

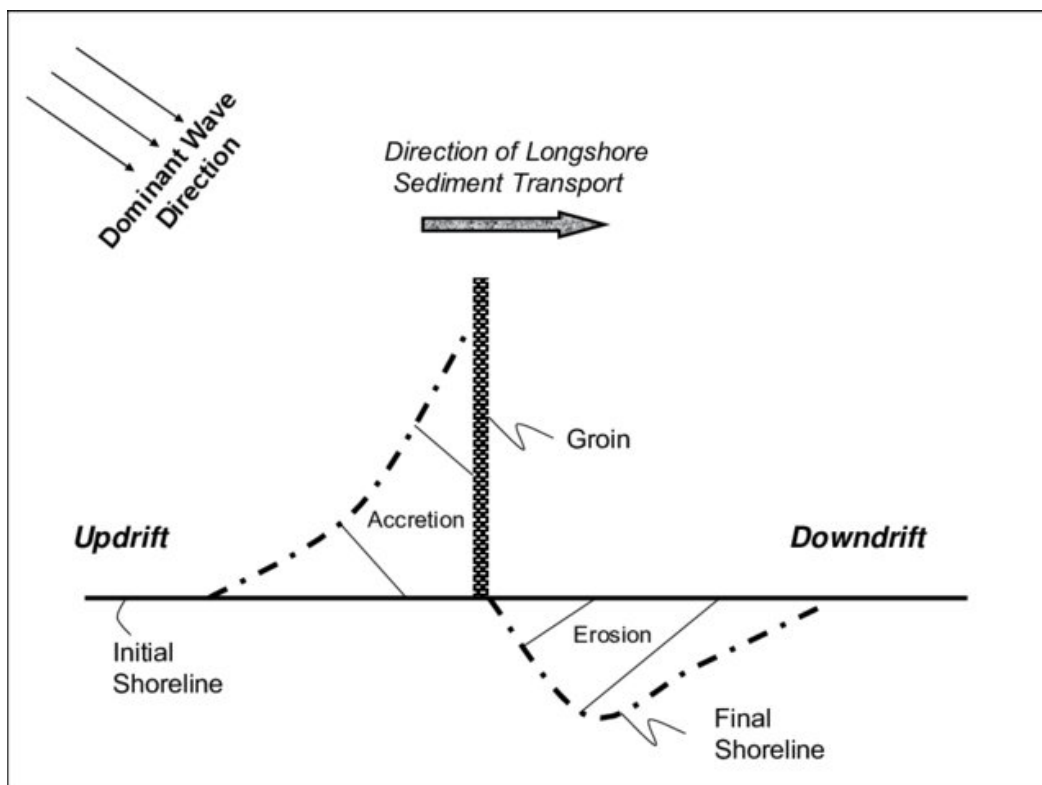


Figura 2.- Respuesta de la playa en presencia de un espigón (Serkan, 2017).

Durante el diseño de estas estructuras es importante tomar en cuenta algunos aspectos. [French \(2001\)](#) recomienda que los espigones no se extiendan más allá de la zona de rompientes, ya que puede generar corrientes de retorno que transporte sedimento hacia mar profundo (**Figura 3**). La respuesta morfológica de la playa dependerá de las características de la estructura (i.e. longitud,

orientación, altura, localización), e incluso del espaciamiento en el caso de que exista un grupo de espigones ([French, 2001](#)).

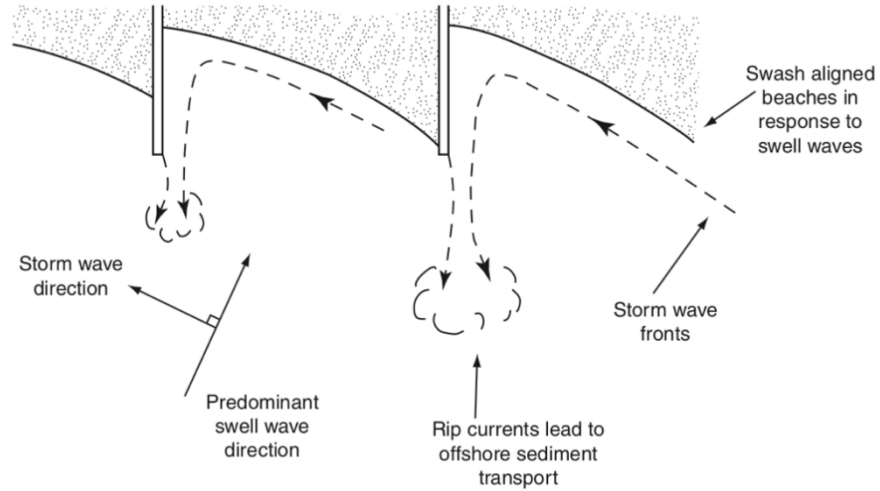


Figura 3.- Esquema de generación de corrientes de retorno por la presencia de espigones. (French, 2001).

Capítulo 2. Justificación y objetivos

2.1 Justificación del estudio

La playa de Ensenada presenta un transporte de sedimentos de dominancia transversal respecto al longitudinal ([Ruiz de Alegría-Arzaburu et al., 2017](#)). A pesar de que los cambios morfológicos a lo largo de la playa son mínimos, existen periodos en los que se puede observar una intensificación del flujo de energía longitudinal sobre el transversal ([Vidal-Ruiz y Ruiz de Alegría-Arzaburu, 2020](#)). Este estudio tiene como objetivo evaluar el efecto que tuvo un espigón temporal de 250 m de longitud (de los cuales 200 m estuvieron sumergidos) en los cambios morfológicos longitudinales a lo largo de una sección de 5.5 km de playa entre El Ciprés y Playa Hermosa en Ensenada, Baja California. El espigón fue instalado en octubre de 2015 y retirado en marzo de 2018, para posibilitar la instalación de tuberías de una desalinizadora. A través de mediciones topo-batimétricas mensuales se analizan los cambios morfológicos de la playa antes, durante y después de la instalación de la estructura.

2.2 Hipótesis

La presencia del espigón generará un cambio morfológico longitudinal durante periodos de intensificación del flujo de energía longitudinal (presencia de oleaje oblicuo), pero la forma de la línea de costa reestablecerá su equilibrio en cuanto se retire la estructura.

2.3 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es determinar el efecto de un espigón temporal en la morfología de una playa intermedia expuesta a oleaje lejano estacional a

través de mediciones de campo. Para llevar a cabo este objetivo se llevarán a cabo los siguientes objetivos particulares:

OP1. Determinar las variaciones morfológicas estacionales, anuales e interanuales de la playa a través del cálculo volumétrico subaéreo y submareal en relación a las características del oleaje incidente.

OP2. Investigar el efecto morfológico ocasionado por el espigón en la sección de playa adyacente en relación a las características del oleaje incidente.

OP3. Generar un modelo conceptual de transporte de sedimentos en la sección de playa de estudio en presencia y ausencia de un espigón.

Capítulo 3. Metodología

3.1 Área de estudio

La playa de estudio está ubicada en la Bahía de Todos Santos, en el noroeste de la península de Baja California. La playa es arenosa (arenas medias) y abarca 6.5 km de la sección norte de la desembocadura del estero de Punta Banda (Figura 4). La playa se ubica en un régimen micro-meso mareal, siendo el rango anual promedio de 1.7 m. El oleaje anual promedio que incide en estas playas tiene una altura de ola significativa (H_s) de 1 m con un periodo de pico espectral (T_p) asociado de 11 s (Ruiz de Alegria-Arzaburu et al., 2015) y dirección dominante del oeste debido a la refracción del oleaje (270°) (Ruiz de Alegria-Arzaburu y Vidal-Ruiz, 2018).

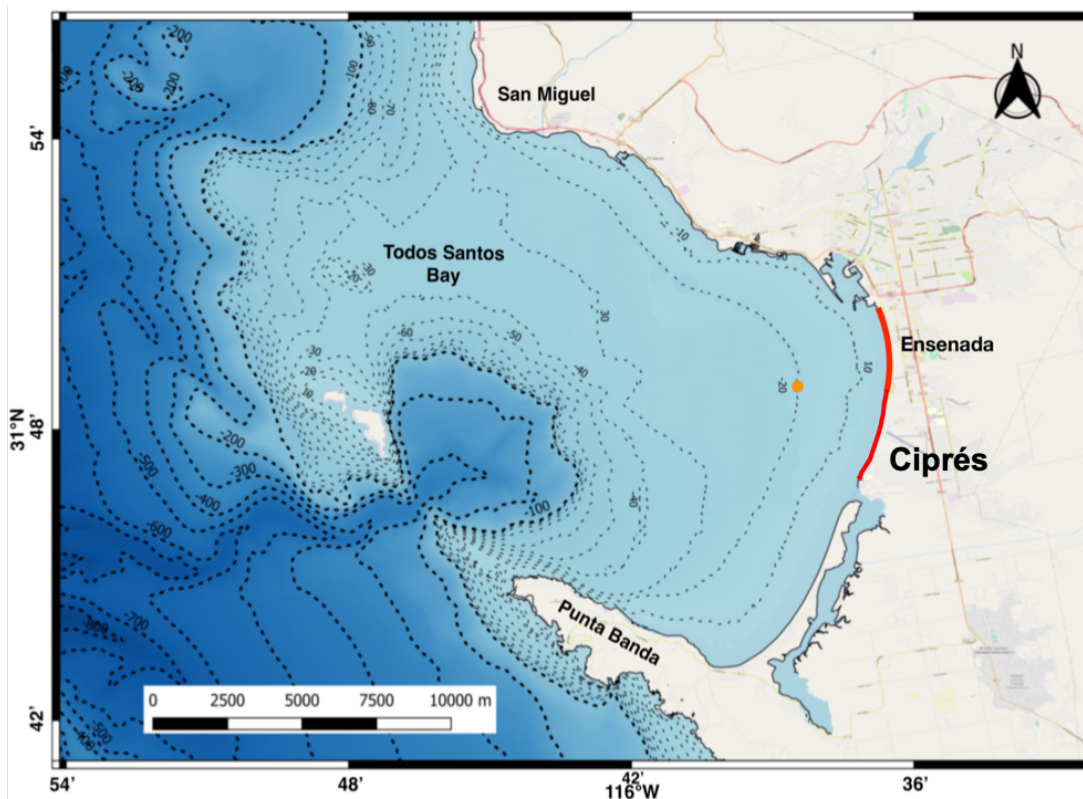


Figura 4.- Ubicación geográfica de la playa de estudio (franja roja) en la Bahía de Todos Los Santos, que comprende las playas arenosas de Ensenada (Playa Hermosa) y El Ciprés. El punto naranja muestra la localización del perfilador acústico de corrientes tipo Doppler (ADCP) utilizado para medir las características del oleaje incidente (modificado de Vidal-Ruiz y Ruiz de Alegria-Arzaburu, 2020).

En la Bahía Todos Santos se encuentra la isla Todos Santos, la cual protege a la bahía del oleaje lejano y, en conjunto con el fondo marino, transforman el oleaje que llega a las playas de la bahía (Ruiz de Alegría-Arzaburu y Vidal-Ruiz, 2018; Ruiz de Alegría-Arzaburu et al., 2017). A su vez, a lo largo de la costa de la Bahía de Todos Santos se presentan diferentes tipos de estructuras costeras, entre ellas, dos puertos (Sauzal y Ensenada) y una marina (Marina Coral), conformados por rompeolas y espigones (**Figura 5**). A lo largo de la playa estudio se encuentra un rompeolas que funciona como malecón y algunos enrocamientos (**Figura 5e**). Además de estas estructuras rígidas, la playa muestra estructuras de protección natural como es el campo de dunas, con elevaciones máximas de 10 m (**Figura 5d**). La sección costera más estructurada es la zona sur de estudio, El Ciprés, que presenta un enrocamiento para proteger del impacto del oleaje una unidad habitacional ubicada en la zona intermareal (**Figura 5e**).



Figura 5.- Ejemplos de las estructuras costeras presentes en la bahía Todos Santos. A) muestra el andador y malecón presentes al norte en la zona de estudio, b) el puerto de Ensenada al norte del área de estudio, c) espigón temporal en la zona centro-sur de las playas de Ensenada, d) dunas costeras en la parte central del área de estudio, e) enrocamiento al sur del área de estudio.

3.2. Mediciones de oleaje

Las características del oleaje incidente se midieron cada hora con un perfilador acústico tipo Doppler (ADCP; AWAC de Nortek) de 1 MHz instalado a 20 m de profundidad a 2.5 km de distancia de la orilla de la mitad del área de estudio (**Figura 6**). El instrumento utiliza mediciones de velocidad y presión a 1Hz durante 1024 s para obtener las características del oleaje, que son promediadas cada hora. Así, se obtiene una serie de tiempo continua de los parámetros integrales del oleaje como la altura de ola significativa (H_s), periodo espectral pico asociado (T_p) y la dirección del oleaje. Para este estudio se analiza la serie de tiempo horaria desde agosto 2015 hasta septiembre 2018.

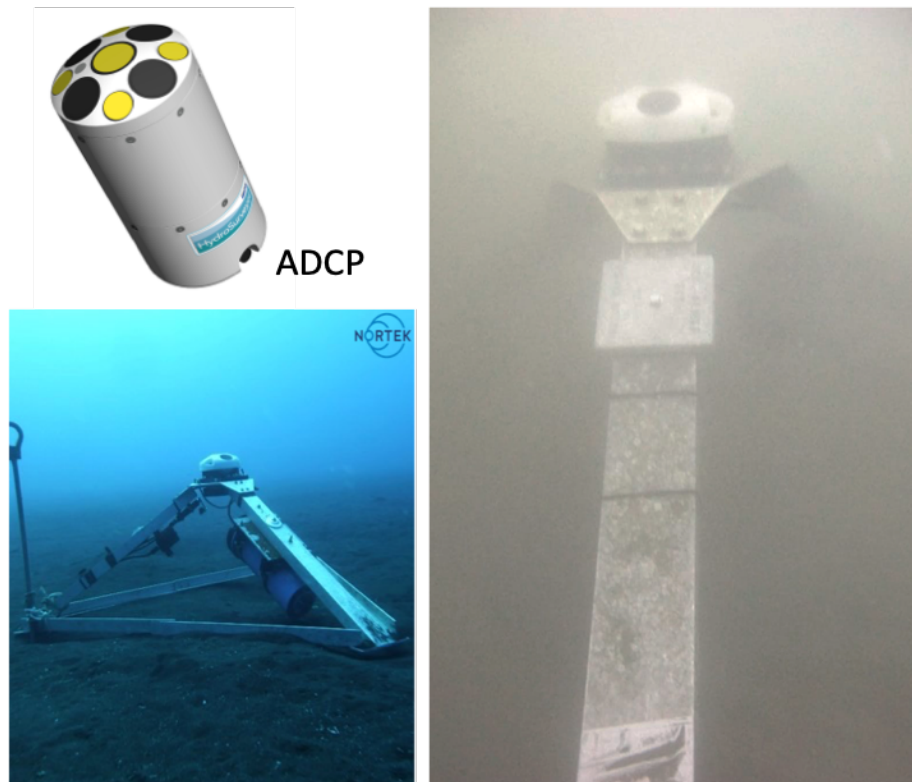


Figura 6.- Anclaje del perfilador acústico de corrientes tipo Doppler (ADCP) instalado a 20 m de profundidad en la mitad del área de estudio.

3.3. Mediciones morfológicas

Con el fin de medir los cambios morfológicos a lo largo del área de estudio, se realizaron 35 campañas topo-batimétricas (TB), durante las cuales se midieron mensualmente 44 perfiles topográficos y batimétricos, desde agosto de 2015 a

septiembre de 2018. Dichos perfiles cubren una longitud total de 5.5 km de playa, por fines prácticos, dividida en dos secciones: Ensenada (ENS; playa Hermosa) y El Ciprés (CIP). Debido a que se contaba con 3 perfiles batimétricos sin topografía (de color gris en **Figura 7**) se realizó una regresión lineal tipo LOESS para obtener la sección topográfica del perfil TB31, TB32 y TB33, obteniendo así 33 perfiles TB espaciados 100 m entre sí para la playa ENS, y 11 perfiles TB espaciados 250 m entre sí para la playa CIP (**Figura 7**).



Figura 7.- Vista aérea de la playa de estudio del TB1 al TB30 comprenden la playa Ensenada, del TB34 al TB44 comprenden la playa El Ciprés. Los perfiles TB31 al TB33 en gris, son los perfiles TB interpolados a partir de perfiles batimétricos. El perfil en azul es el TB33 utilizado para analizar el comportamiento de la playa y el TB35 en naranja muestra el perfil al sur del espigón utilizado para los cálculos volumétricos. En verde podemos apreciar la ubicación del espigón temporal.

Las topografías se midieron durante la bajamar de mareas vivas, con un sistema de posicionamiento cinemático global (GPS) diferencial marca Leica GS14 montado en un bastón de aluminio con dos ruedas operado por dos personas a pie (**Figura 8**). Se obtienen datos a 1 Hz y con una precisión de $\pm 0.03\text{m}$, alcanzando a la profundidad del nivel de bajamar medio inferior (NBMI). Las mediciones están en coordenadas Universal Transverse Mercator (UTM) y las elevaciones referidas al nivel de bajamar media inferior (+36.135m de las alturas

elipsoidales). Las batimetrías se midieron durante la pleamar en mareas vivas con una moto acuática equipada con un perfilador de corrientes acústico tipo Doppler (ADCP), marca Sontek M9 Hydrosurveyor (con una frecuencia de 0.5 MHz), sincronizado con una antena GPS diferencial y midiendo a 1 Hz. Para el post-procesamiento de los datos, se estableció un umbral de error de 0.05 m de elevación siguiendo la metodología de [Ruiz de Alegría-Arzaburu y Vidal-Ruiz \(2018\)](#).

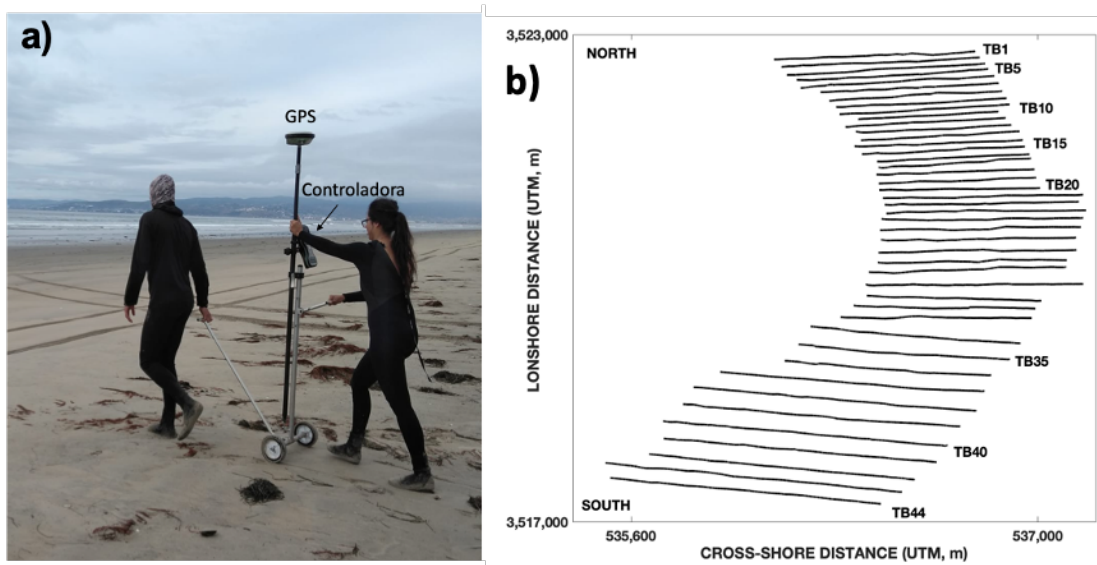


Figura 8.- Ejemplo de dos personas haciendo mediciones topográficas usando el GPS diferencial montado en un bastón de aluminio con dos ruedas (panel a) y grafica de los 44 perfiles topobatimétricos colectados mensualmente a lo largo de la playa de estudio (panel b).

3.4. Cálculos volumétricos

Para realizar los cálculos volumétricos, la playa se dividió en dos secciones: la subaérea (IS) que comprende de 0 m a 5.5 m de elevación, y submareal (SUB) de -10 m a 0 m de elevación. Para que los perfiles TB medidos tuvieran la misma distancia entre puntos de medición, se realizó una interpolación lineal transversal cada 0.2 m, y después se utilizó la fórmula trapezoidal para su integración (Ec. 1)

y obtener así las áreas de cada sección IS y SUB para cada perfil de playa. Para el área total (TOT) se sumo el área de IS y SUB.

$$\text{Área} = \int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{2N} [f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_N) + f(x_{N+1})] \quad (\text{Ec. 1})$$

Las áreas (m³/m) fueron multiplicadas por las distancias longitudinales representativas de cada perfil (mitad de distancia entre perfiles consecutivos) para obtener volúmenes (m³).

Para analizar los cambios volumétricos en el tiempo, se calcularon los volúmenes despromediados. Es decir, se obtuvo el volumen total promedio a lo largo de toda la playa que se dividió por la distancia longitudinal total (5572 m), y a cada uno de los volúmenes totales se le resto el valor promedio. Los periodos de acreción y erosión correspondieron con valores positivos y negativos respecto al volumen despromediado para cada sección IS, SUB y TOT. Por último, se determinó la evolución volumétrica de la playa sumando las diferencias volumétricas en el tiempo (diferencias volumétricas acumuladas; Cum ΔV).

3.5 Flujos de energía

Para el calculo de los flujos de energía se utilizaron los parámetros del oleaje como la altura significativa del oleaje (H_s), el periodo del pico espectral (T_p) y la dirección (α). El flujo de energía total se descompuso en flujo de energía longitudinal (PI) (Ec. 2) y flujo de energía transversal (Px) (Ec. 3) siguiendo la ecuaciones utilizadas en Ruiz de Alegría-Arzaburu et al., 2017.

$$Pl = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_p \text{sen}(\alpha) \cos(\alpha) \quad (\text{Ec. 2})$$

$$Px = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_p \cos^2(\alpha) \quad (\text{Ec. 3})$$

donde ρ es la densidad del agua de mar y g es la aceleración gravitacional.

3.6 Espigón temporal

La construcción del espigón temporal (**Figura 9**) inició en octubre de 2015, la obra se realizó por etapas. La longitud y anchura del espigón varió según las necesidades, durante el mes de septiembre de 2016 fue cuando el espigón tuvo su máxima longitud (250 m) con 200 m expuestos al oleaje, el ancho de la obra fue de aproximadamente 11m y una altura aproximada de 3m.

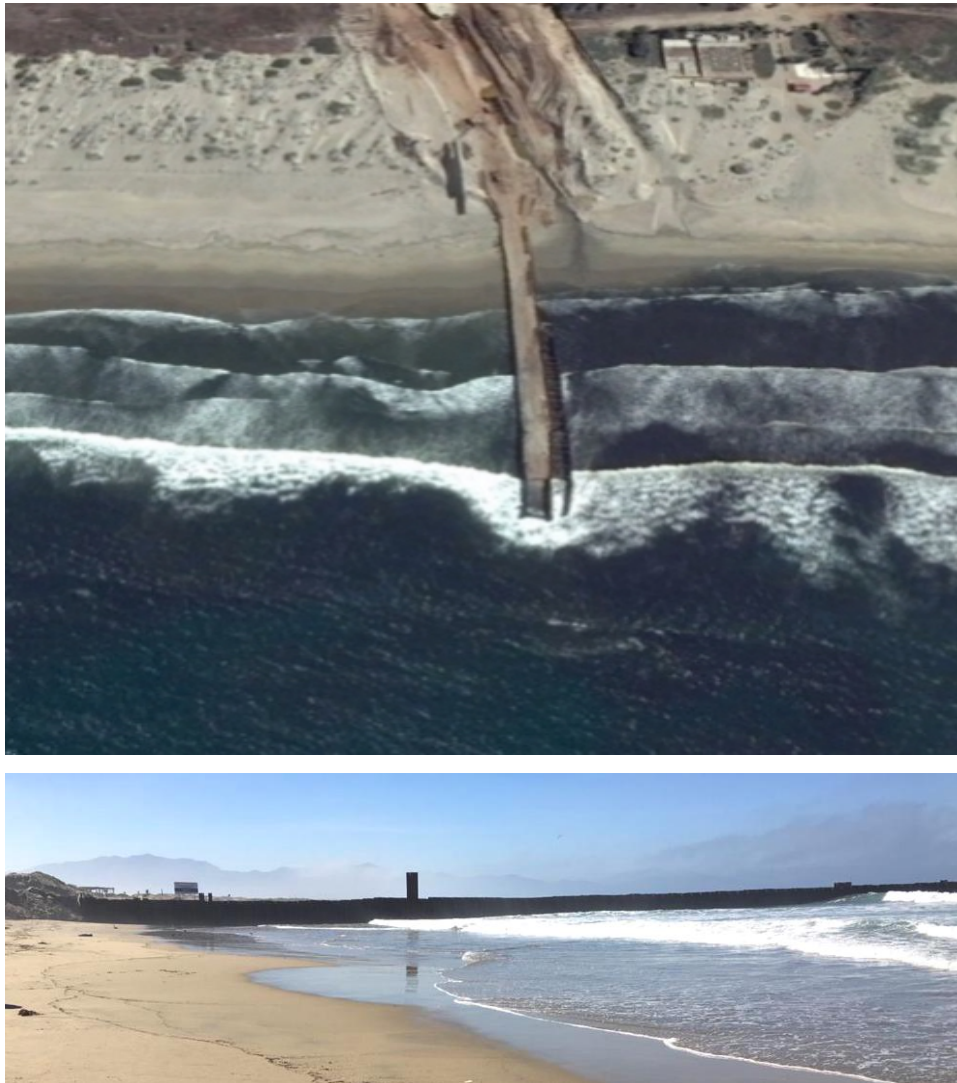


Figura 9.-Fotografías del espigón temporal. En el panel superior, una imagen de google earth y en el inferior una fotografía tomada desde la playa al norte del espigón.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Caracterización del oleaje incidente

Con el fin de determinar las condiciones de oleaje a las que está sujeta el área de estudio, se analizaron los promedios entre las campañas topo-batimétricas de H_s , T_p y la dirección predominante del oleaje (**Figura 10**). En los meses de invierno (diciembre-febrero) la H_s y T_p son mayores respecto a los otros meses. En particular, durante el invierno El Niño de 2015-2016 mostró las H_s mayores, en febrero de 2016 se presentó el promedio mensual más alto con $H_s=1.95$ m. Durante verano se presentan los valores menores de H_s , y en particular, agosto de 2017 presentó el promedio mínimo de $H_s=0.58$ m. Esto indica que el oleaje tiene una estacionalidad y una variación interanual bien definida, siendo el oleaje más energético en invierno (entre noviembre y marzo) y menos energético en primavera y verano (entre abril y octubre).

T_p presenta un comportamiento similar a H_s , oleaje con periodo más largo en invierno y más corto en verano. El T_p más largo se registró en febrero de 2016 con un promedio de $T_p=13.8$ s y el más corto en septiembre de 2017 con $T_p=7.6$ s. La dirección del oleaje no muestra grandes variaciones.

Existen diferencias significativas entre los años de estudio, principalmente asociadas a la presencia de la anomalía climática de El Niño 2015-2016. Durante ese invierno aumentó la frecuencia e intensidad del oleaje de tormenta que arribó a costa y que es capaz incluso de prolongar las condiciones del oleaje de invierno, las condiciones de alta energía se extendieron hasta abril en vez de hasta febrero como en los otros dos años.

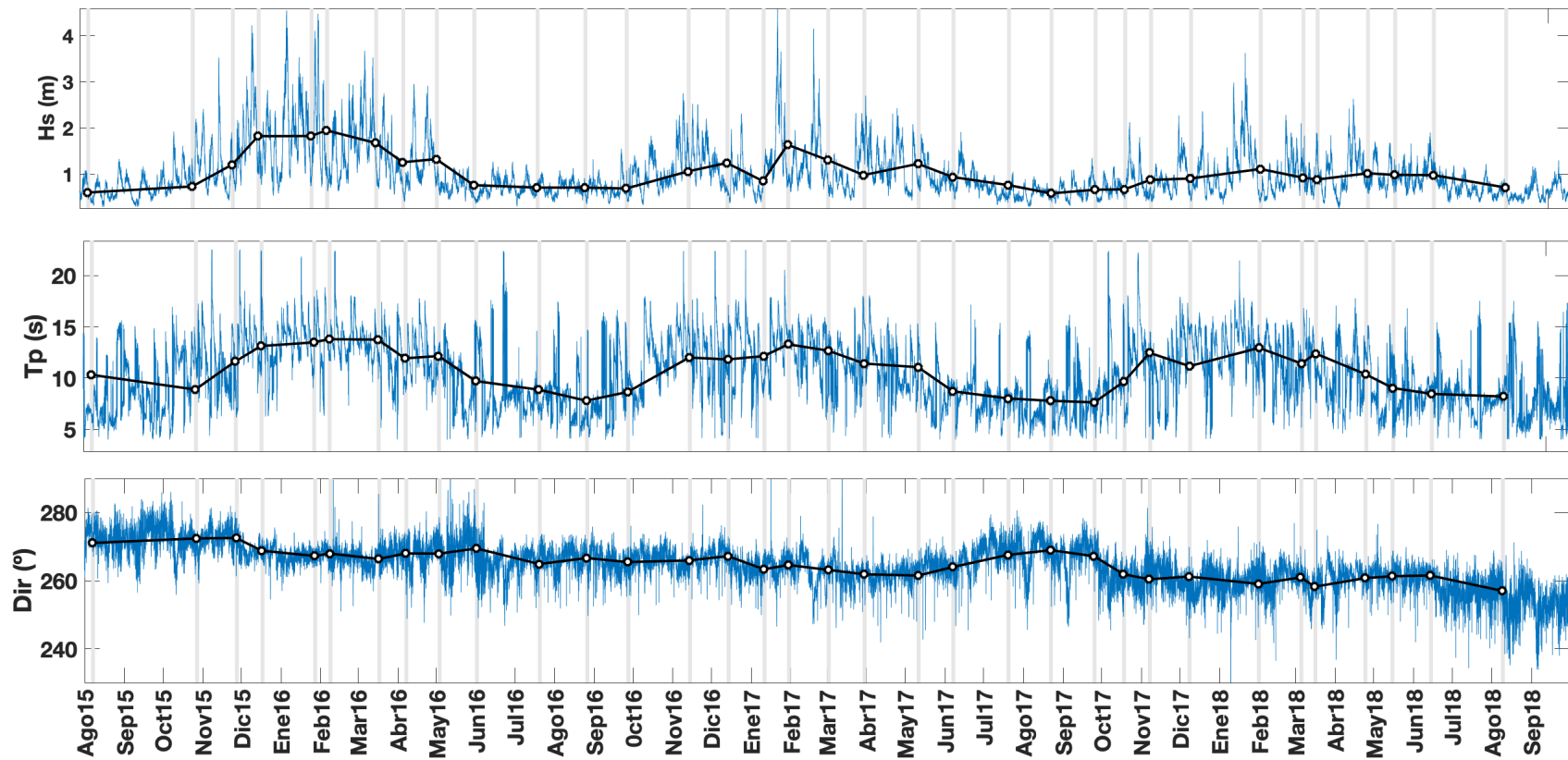


Figura 10.- Serie de tiempo de las mediciones horarias de los parámetros integrales de oleaje (línea azul) y sus promedios entre las campañas de muestreo (línea negra) de agosto de 2015 a septiembre de 2018; altura de ola significativa (H_s), periodo pico espectral (T_p) y dirección del oleaje (Dir) de arriba abajo, respectivamente.

La playa de estudio presenta dominancia de flujo de energía transversal, P_x muestra una orden de magnitud más que P_l (**Figura 11**). Los flujos positivos de la componente transversal (P_x) indican que los flujos se dirigen de costa a mar y el flujo transversal promedio es de $7.78 \text{ kNm}^{-1}\text{s}^{-1}$. Los valores máximos de P_x ocurrieron durante el invierno de El Niño ($30 \text{ kNm}^{-1}\text{s}^{-1}$), entre noviembre 2015 y marzo 2016. Los dos inviernos, 2016-17 y 2017-18 también presentan máximos locales (20 y $10 \text{ kNm}^{-1}\text{s}^{-1}$ respectivamente), pero de menor intensidad y duración. Los flujos P_l presenta mínimos en los periodos invernales, particularmente entre enero y febrero de 2017 ($-4.5 \text{ kNm}^{-1}\text{s}^{-1}$). Durante el invierno de El Niño P_l presentó valores alrededor de los $-3 \text{ kNm}^{-1}\text{s}^{-1}$ y se extiende la duración hasta marzo 2016, en los demás inviernos se observaron mínimos locales, e incluso un mínimo absoluto en febrero 2017 ($-4.5 \text{ kNm}^{-1}\text{s}^{-1}$), pero de menor intensidad y duración. Los incrementos de magnitud de P_x y P_l ocurren cuando aumenta la altura significativa de la ola por encima del 1 m e incluso superando los 1.5 m de altura (entre noviembre y marzo), y una disminución evidente ($<1 \text{ m}$) entre julio y septiembre, periodos de calma. Este comportamiento marca la estacionalidad de tanto la componente longitudinal como la transversal de los flujos de energía del oleaje.

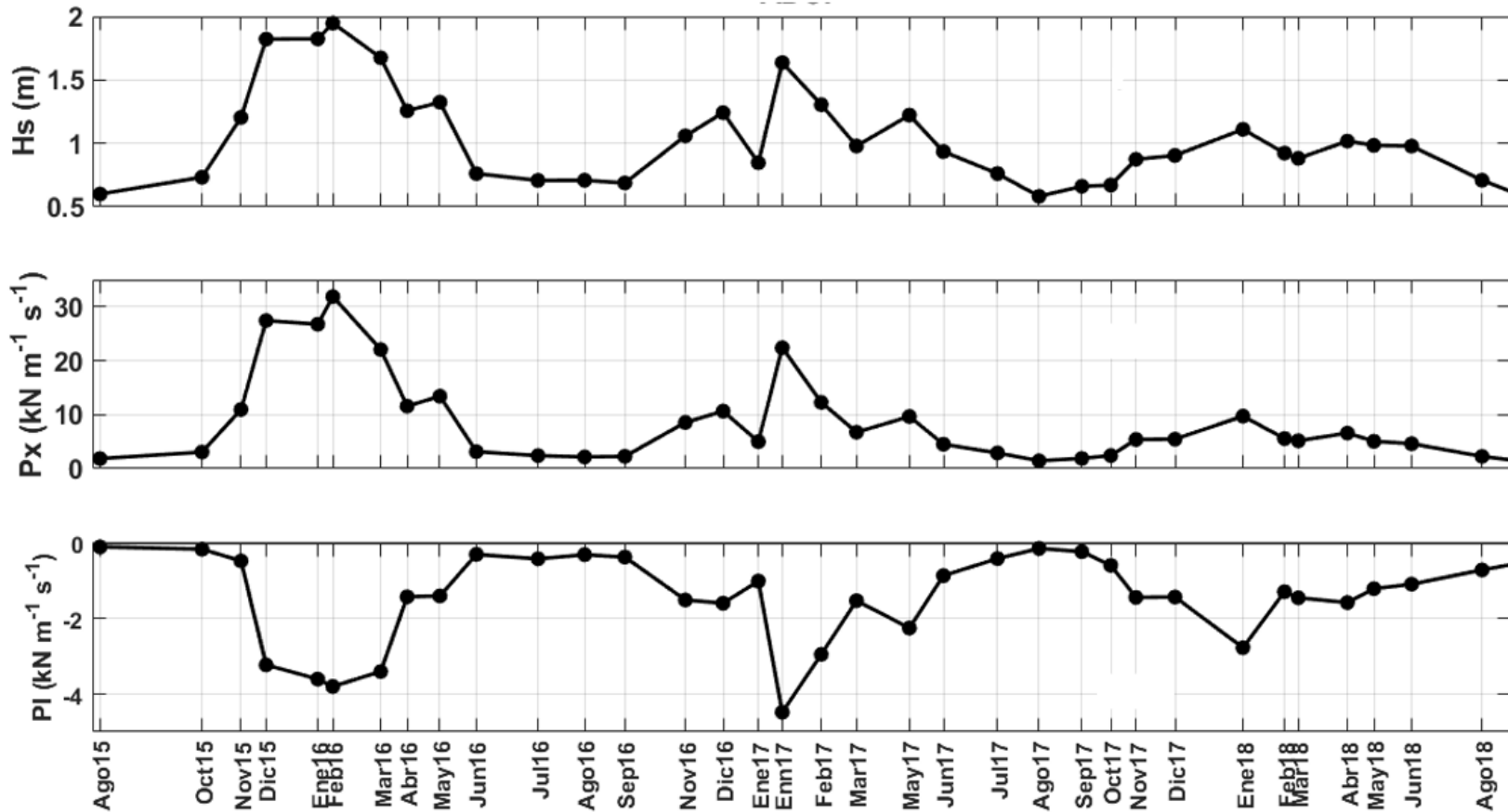


Figura 11.- Promedios entre mediciones topo-batimétricas de altura significativa de la ola (H_s) (panel superior), flujo de energía transversal (P_x) (panel intermedio), los flujos positivos indican un flujo de tierra hacia mar y flujo de energía longitudinal (P_l) (panel inferior) los flujos positivos indican flujos con dirección norte a sur, mientras que los flujos negativos indican flujos de sur a norte.

4.2.- Variabilidad morfológica de la playa

La **Figura 12** presenta la evolución estacional de agosto de 2015 a agosto de 2018 del perfil topo-batimétrico TB34, ubicado en la mitad del área de estudio. Se presenta la variabilidad del perfil de agosto (verano), noviembre (otoño) y enero (invierno) y mayo (primavera). El perfil muestra un comportamiento estacional bien definido. Se observa erosión de la playa subaérea (IS) y presencia de una barra submareal y un canal en la sección submareal (SUB) durante el invierno. Mientras que en verano el perfil cuenta con una berma bien definida y mayor anchura de la sección IS y ausencia de barra submareal.

Existen diferencias interanuales muy claras en el comportamiento del perfil de playa (**Figura 12**). Comparando el comportamiento de los diferentes veranos, el primer perfil de 2015 muestra una berma por encima de los 2 m de elevación y sin presencia de barra, al igual que 2016, sin embargo, en 2017 el comportamiento es muy diferente, se observan dos barras submareales y un canal bien definido. Pero para agosto 2018, el canal deja de existir y se ve la presencia de una barra pequeña cerca de la orilla (**Figura 12**).

Otoño es considerado un periodo de transición, debido a que las condiciones del oleaje empiezan a ser más energéticas que en verano, pero no tan energéticas como en invierno. En la evolución TB no se observan grandes diferencias entre agosto y noviembre. En 2015 se observa una pequeña berma por encima de los 2 m de elevación y sin presencia de barra submareal, mientras que en 2016 el perfil carece de berma y presenta una barra submareal. En 2018 se presenta un perfil con un canal y una barra bien definidos (**Figura 12**).

En invierno de 2016 se observa un perfil IS erosionado (sin berma) y la presencia de una barra submareal a 4 m de profundidad. Antes de la tormenta en 2017 (línea azul sólida) la barra submareal se ubicaba cerca de 2 m de profundidad, y después de la tormenta (línea segmentada) se alejó hasta 4 m de profundidad. En 2018 se observa una barra muy pequeña respecto a los años anteriores. En primavera la playa carece de berma y presenta una barra definida (**Figura 12**).

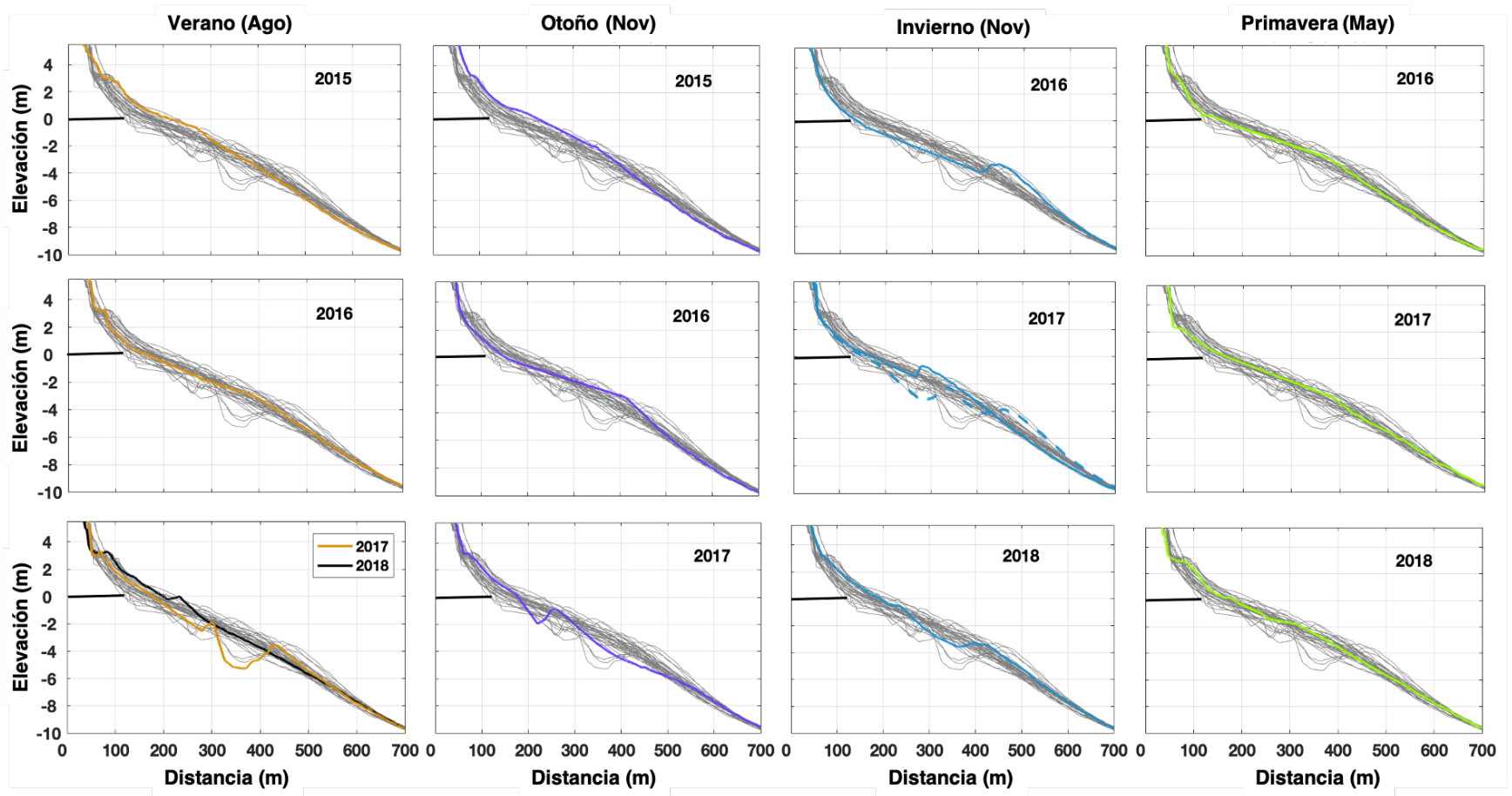


Figura 12.- Evolución estacional del perfil topo-batimétrico TB34 durante los meses de verano, otoño e invierno de 2015 a 2018. La línea negra sólida muestra la elevación de 0 m (nivel de bajamar media inferior) que separa la sección IS de SUB, las líneas de color sólido indican el perfil de la estación (mes). La línea segmentada en enero 2017 muestra el perfil medido después de una tormenta.

4.3. Variabilidad volumétrica de la playa

4.3.1. Promedio mensual

La serie de tiempo de anomalías volumétricas (AV) de las 35 campañas TB (de agosto 2015 a septiembre 2018) se presentan en la **Figura 13**. Se muestran las variaciones volumétricas de sedimento (ganancias en positivo y pérdidas en negativo) en las dos secciones de la playa IS (línea azul) y SUB (línea negra) y el total (TOT, barras grises). Las mediciones iniciaron un par de meses antes de la incidencia del oleaje energético de El Niño 2015-2016, por tanto, se observa la evolución de la playa después del fenómeno climático. En general, las variaciones de volumen en IS y SUB muestran un comportamiento estacional y opuesto, mientras que el volumen TOT no presenta una tendencia clara, y generalmente valores muy cercanos a 0 m³/m en los meses de agosto 2015, 2017 y 2018.

Durante los primeros cuatro meses de 2015, IS muestra anomalías positivas (acreción subaérea) (línea azul en **Figura 13**). A partir de noviembre 2015 se pierde sedimento subaéreo hasta alcanzar el mínimo en febrero 2016, y después inicia un periodo de recuperación relativa (anomalía positiva) hasta septiembre 2016. En los siguientes años se observa la misma estacionalidad, con mínimos en febrero y máximos en septiembre en 2017 y 2018, respectivamente. Durante el invierno 2017-2018 la erosión de IS fue mínima, los valores de volumen mínimo fueron positivos, y en septiembre 2018 se observó el máximo de volumen IS muy similar al de agosto de 2015, indicativo de una recuperación total de la playa subaérea (línea azul en **Figura 13**).

La variabilidad del volumen de la sección de playa SUB es opuesto al de IS, sin embargo, los máximos de sedimento se encuentran desfasados, aunque generalmente los mínimos ocurren en verano (a principios o finales) y los máximos ocurren en invierno, excepto durante El Niño 2015-16 (**Figura 13**). El volumen máximo de SUB ocurrió en junio de 2016, en febrero 2017 se observa otro máximo, y el de febrero 2018 por debajo del promedio e inicia un periodo erosivo hasta septiembre 2018 (**Figura 13**). La variabilidad volumétrica TOT muestra

mínimos valores en el invierno 2015-2016 y máximos en verano 2016, de similar magnitud. La diferencia volumétrica total de agosto 2015 a 2018 es mínima, lo que indica que se mantiene un balance sedimentario.

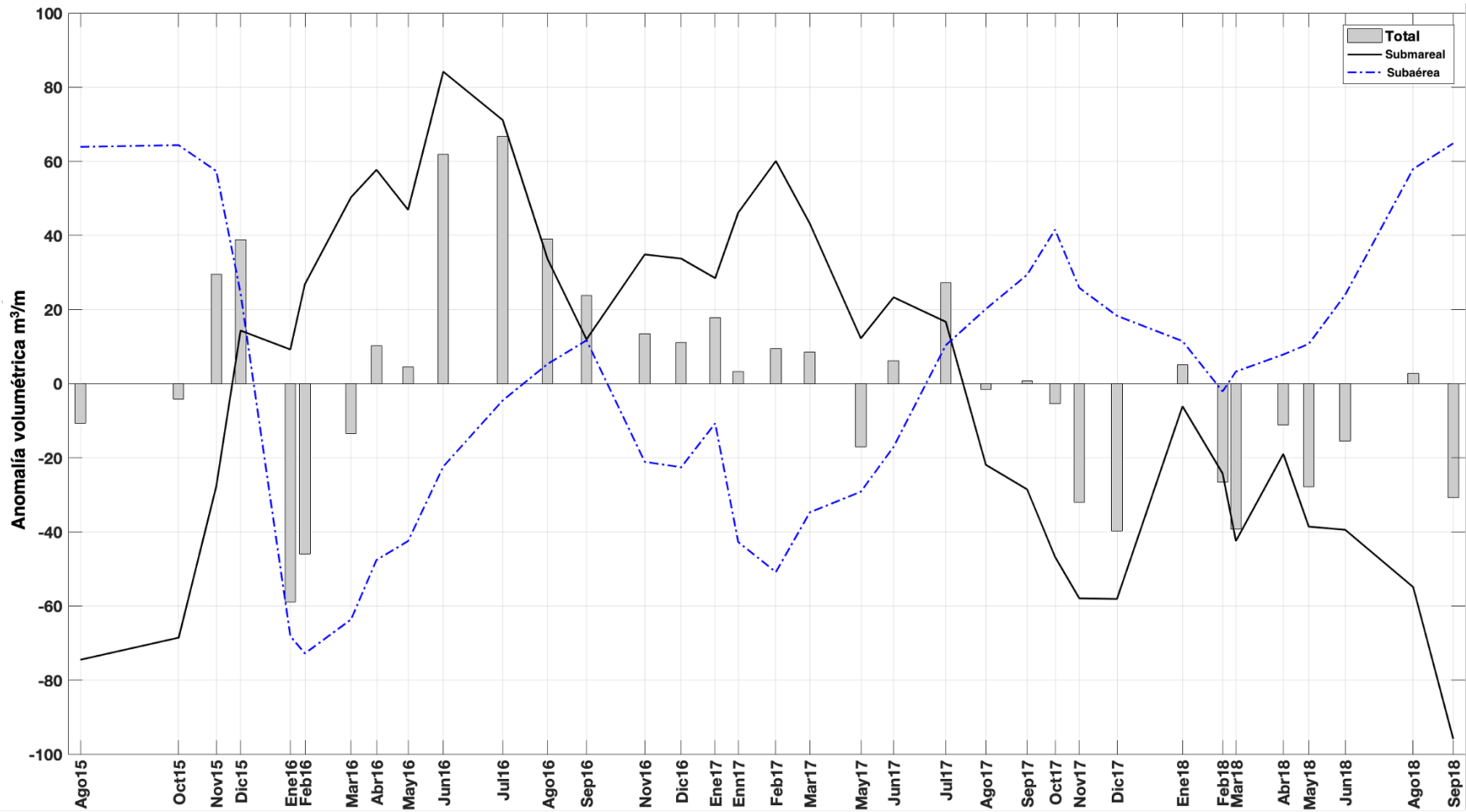


Figura 13.- Anomalia volumétrica en m^3/m desde agosto 2015 a septiembre 2018: TOT (barras grises), subárea (IS, línea azul) y submarea (SUB, línea negra).

4.3.2.- Variabilidad longitudinal

Con la finalidad de describir la variabilidad volumétrica a lo largo de la playa en el tiempo se calcularon las diferencias volumétricas acumuladas (Cum Sum) de noviembre 2015 a septiembre 2018 para IS, SUB y TOT (**Figura 14**). IS y SUB muestran comportamientos volumétricos opuestos, es decir, si IS se erosiona SUB presenta acreción, y viceversa.

IS muestra de manera más clara la señal estacional marcada, erosión durante los inviernos (diciembre-marzo) y pequeños periodos de recuperación entre ellos. También se observan diferencias interanuales entre los distintos inviernos, más duradero e intenso el 2015-16 que los otros. Durante los primeros tres meses de 2015 la playa presenta un comportamiento uniforme, después en la sección sur la erosión es mas intensa que en el norte, este comportamiento persiste hasta septiembre de 2018 aunque disminuye su intensidad con el paso del tiempo. Es importante mencionar que en esta sección del sur es donde se realizó la instalación del espigón en octubre de 2015, y que estuvo presente hasta marzo de 2018. Por tanto, se considera que su presencia puede ser la causa antropogénica que favoreció que se erosionara más la playa que de forma natural (como en la sección más al norte).

La sección SUB también muestra una señal estacional y de forma opuesta a IS. Al igual que lo observado en IS, la sección al sur del espigón muestra erosión. El invierno El Niño 2015-2016 muestra una mayor variabilidad volumétrica que en los otros inviernos. A partir del invierno 2017 la zona sur se erosionó notablemente. El TOT no muestra una señal estacional clara. A lo largo de la playa se observa una estacionalidad bien definida, sin embargo, la sección sur muestra mayor pérdida de sedimento que la sección norte y menor capacidad de recuperación, sobre todo en los inviernos 2015-16 y 2016-17.

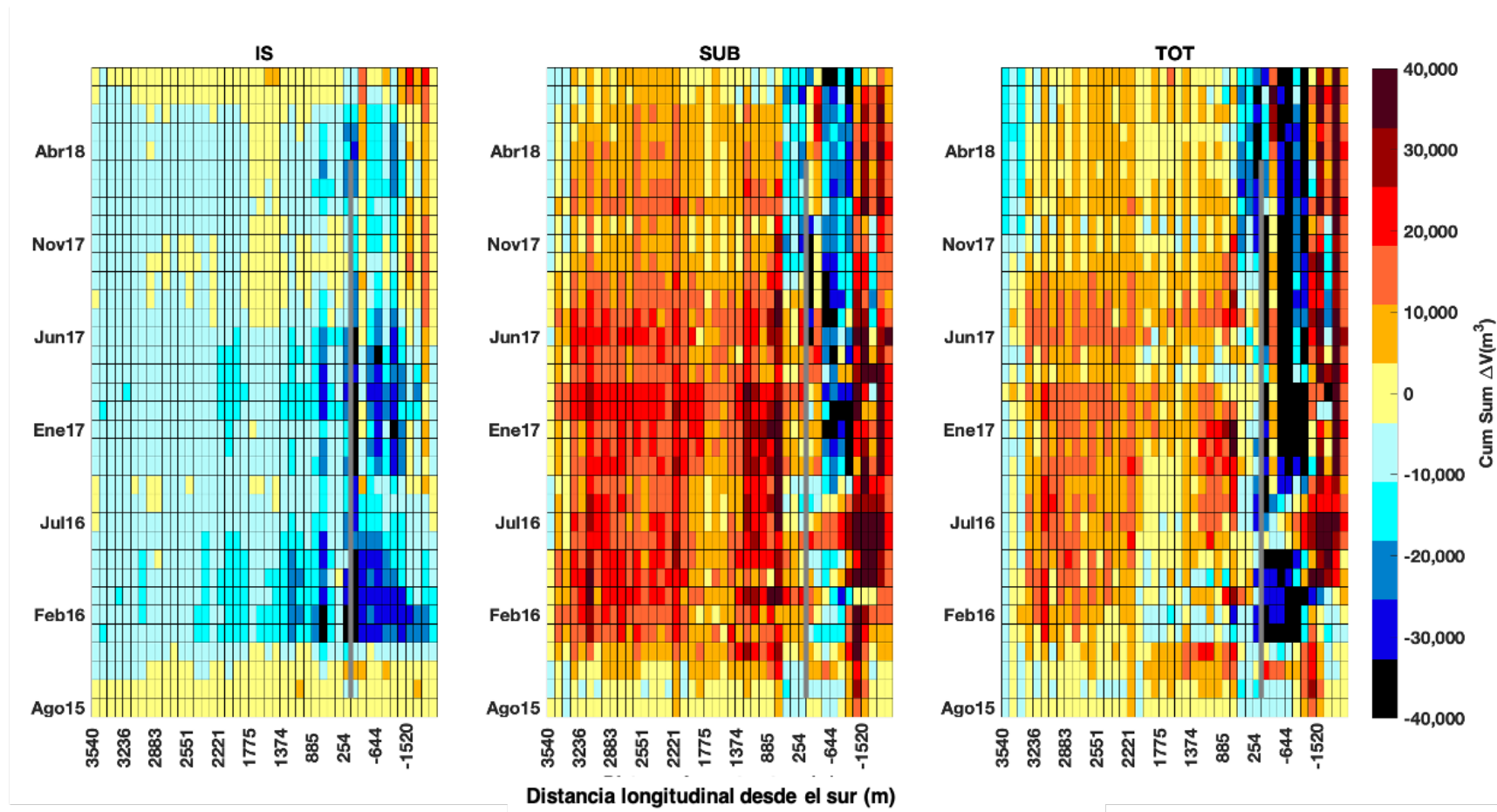


Figura 14.- Diferencias volumétricas acumuladas de la sección subaérea (IS), submareal (SUB) y total (TOT) de agosto 2015 a septiembre de 2018 a lo largo de la playa (distancia desde la posición de la estructura, valores positivo indican la sección hacia el norte y negativos hacia el sur de la estructura).

4.4. Efecto morfológico del espigón

Para analizar los efectos asociados al espigón se utilizaron los perfiles TB 28 – TB 35 que cubrieron un total de 1500 m de playa. Obteniendo los siguientes resultados.

4.4.1 Variabilidad morfológica mensual

La

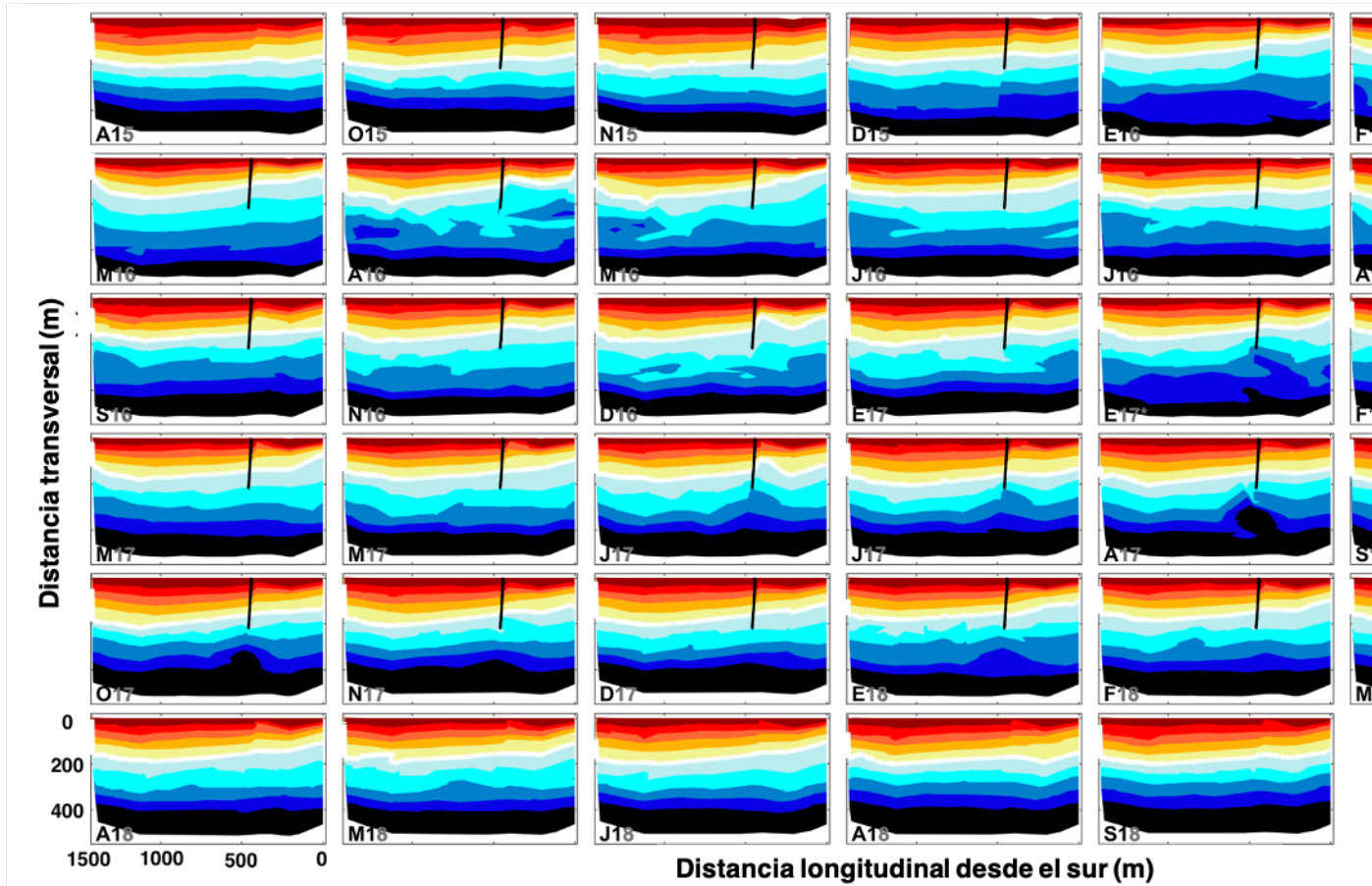


Figura 15 muestra la evolución morfológica a ambos lados del espigón durante los 3 años de estudio. La línea de costa presentó una clara estacionalidad; la anchura varió hasta 100 m. En verano la playa subaérea mostró hasta 200 m de anchura, mientras que de diciembre a marzo menos de 100 m, siendo entre abril y julio el periodo de recuperación. Se observan diferencias morfológicas notables entre las secciones al norte y sur del espigón.

Durante los primeros cuatro meses de estudio (agosto-diciembre, 2015), la playa presenta un comportamiento uniforme, es decir la sección norte y sur se comportan de manera muy similar. A partir de enero 2016 la sección sur del espigón muestra un comportamiento distinto al norte; la línea de costa al norte es más ancha. A partir de junio 2016 la sección sur se recupera parcialmente de la erosión

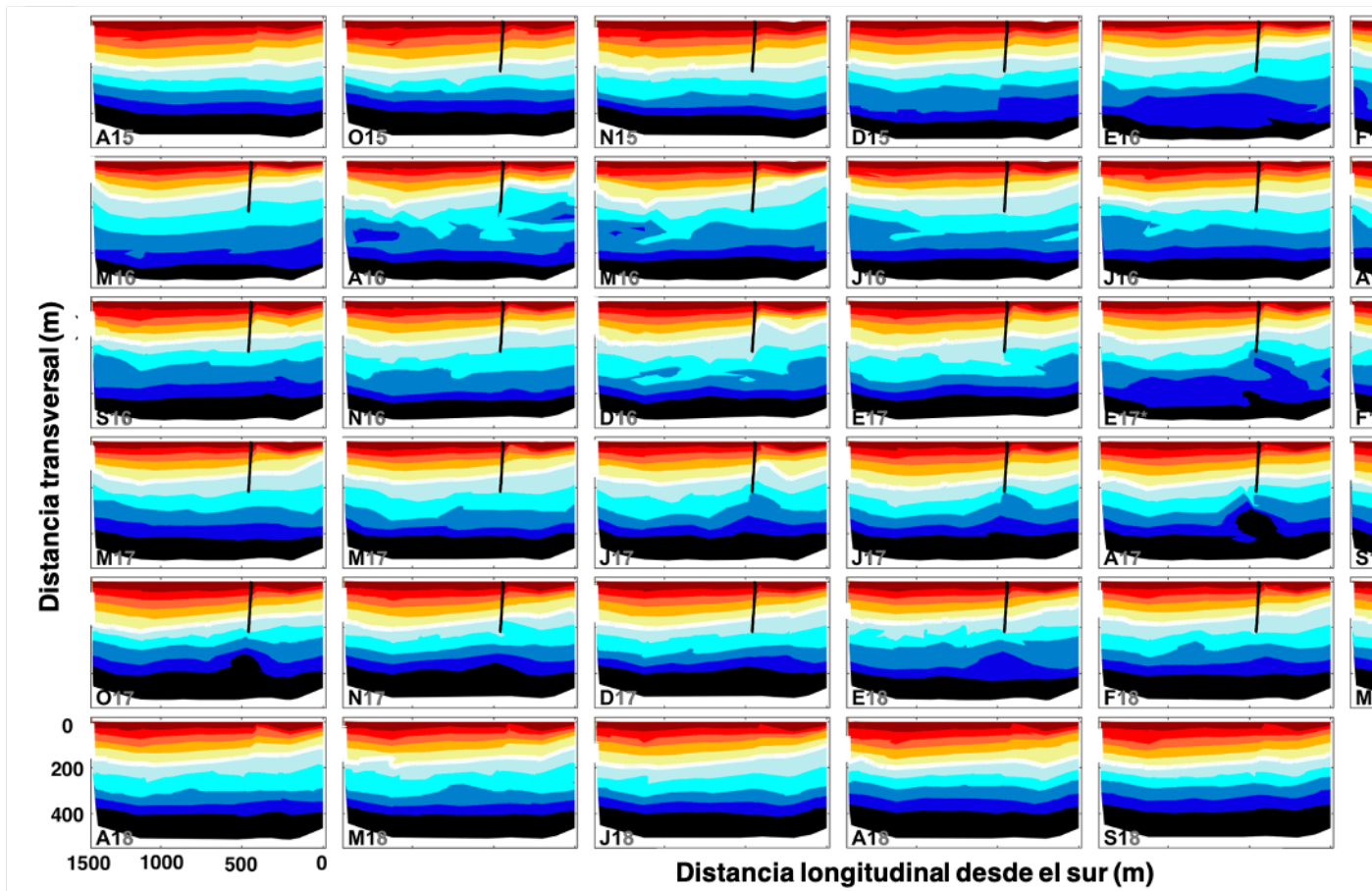


Figura 15).

Durante el verano, las secciones de playa a ambos lados del espigón se comportan de manera similar, y es hasta el inicio del siguiente periodo de alta energía de oleaje a partir de noviembre 2016 cuando se dan las diferencias longitudinales más importantes. Durante el periodo de baja energía a principios de enero 2017, las diferencias longitudinales desaparecen durante el periodo de recuperación de la playa subaérea. Después de la tormenta de finales de enero

(E17*) se empiezan a intensificar las diferencias longitudinales, siendo más notable la erosión al sur (

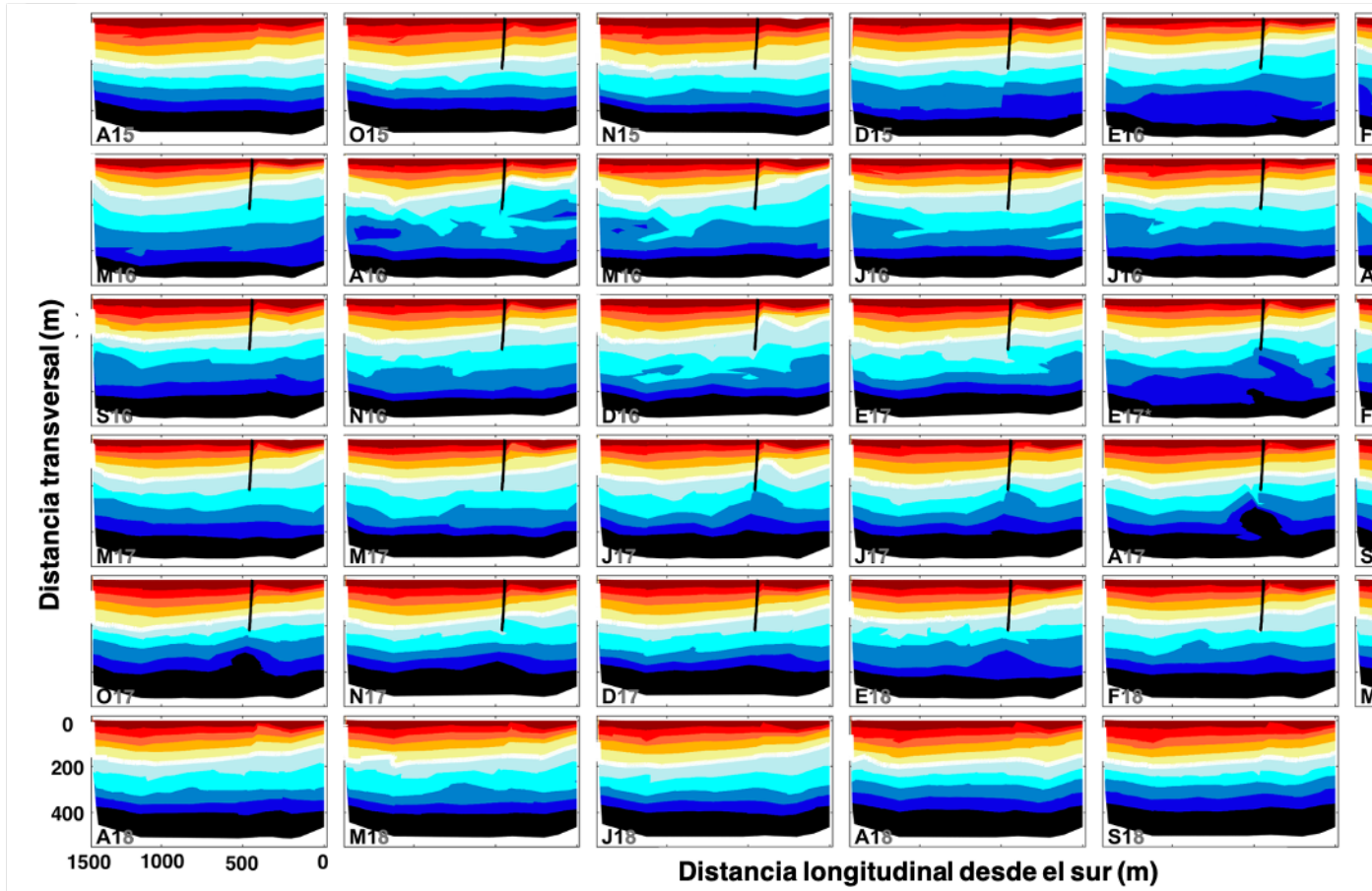


Figura 15).

Durante la primavera, las diferencias morfológicas subaéreas disminuyen a lo largo de la playa, pero ocurren notables diferencias submareales por efectos de

la

estructura

(

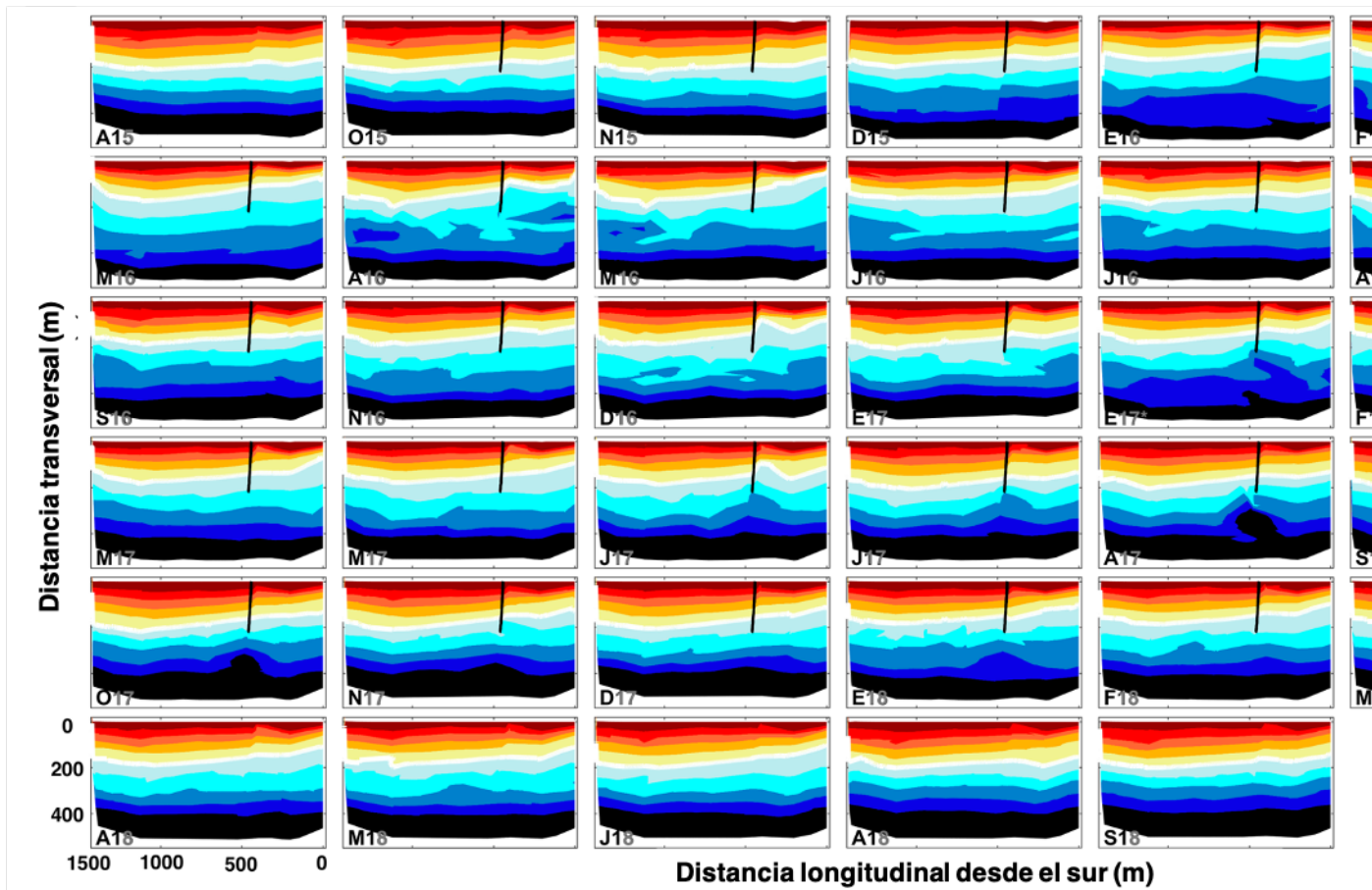


Figura 15). Los cambios morfológicos fueron mínimos durante el invierno 2017-18. Después de la retirada del espigón a finales de marzo 2018 la morfología a ambos lados del espigón se homogenizó gradualmente, tanto en la sección subaérea como en la submareal.

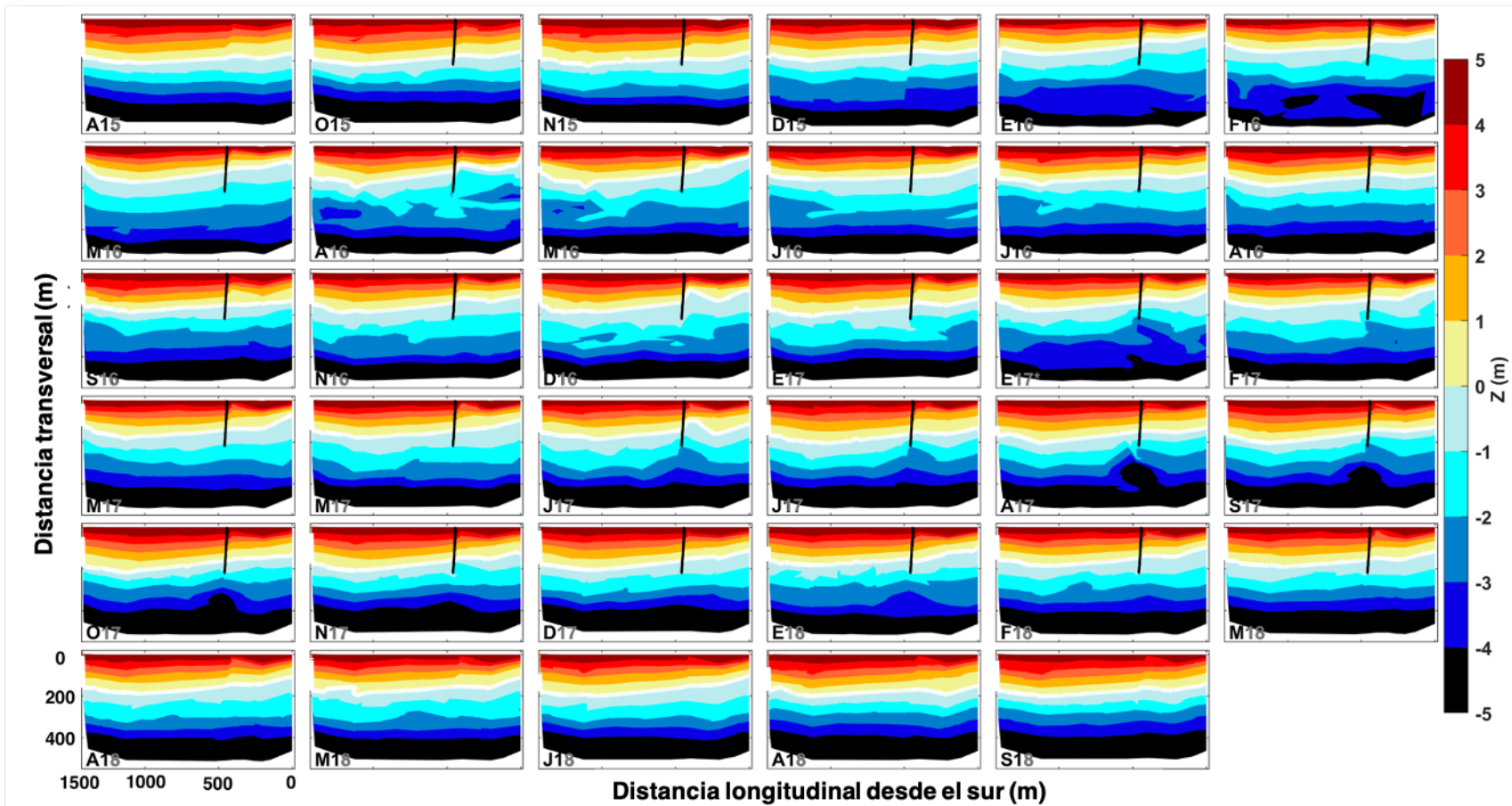


Figura 15.- Modelos de elevación digital de agosto de 2015 a septiembre de 2018. El eje X muestra la distancia longitudinal desde el sur de la playa de estudio (TB44). El eje Y muestra la distancia transversal desde la elevación de 5 m. La línea de contorno blanca representa la posición de la línea de costa de 0 m respecto al nivel de bajamar media inferior (NBMI). E17* representa la segunda medición tomada a finales de enero 2017 después del arribo de un oleaje de tormenta. Los colores fríos indican la sección submareal y los cálidos la subaérea.

4.4.2 Diferencias morfológicas mensuales

Las diferencias morfológicas mensuales permiten determinar los cambios ocurridos entre un mes y otro (**Figura 16**

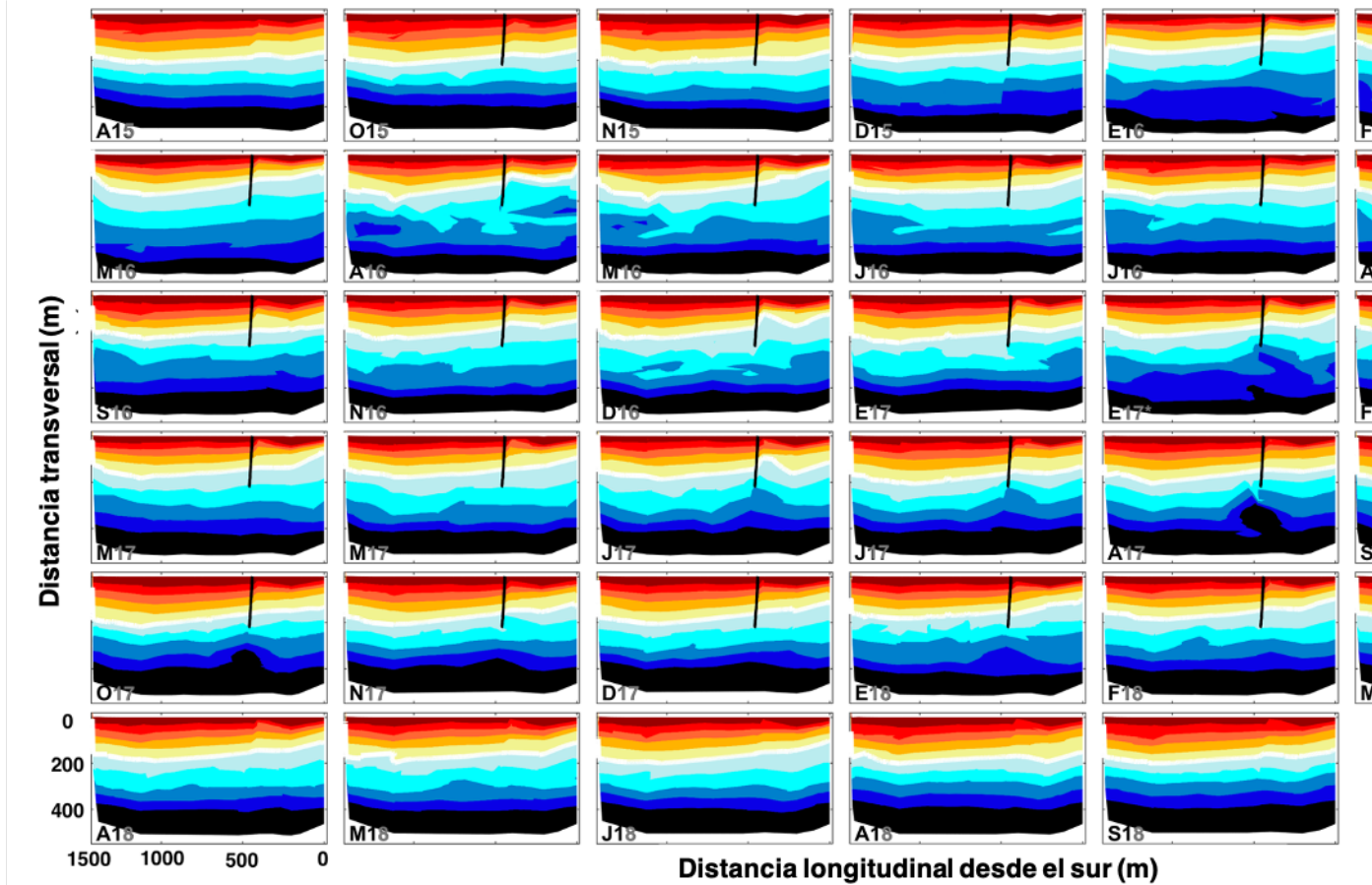


Figura 15), que responde a la estacionalidad del oleaje. La sección subaérea se erosiona durante los inviernos, que son periodos con alta energía del oleaje, mientras que la sección submareal muestra la formación y migración de la barra. Durante la primavera, la playa subaérea se recupera gradualmente de los periodos erosivos, mientras que la sección submareal muestra generalmente la barra acoplada a la cara de la playa.

La playa subaérea al sur del espigón es la zona con mayor variabilidad del área de estudio. La respuesta morfológica fue diferente entre las secciones norte y sur durante la presencia del espigón, sobre todo durante los periodos de baja energía

de oleaje. Y una vez retirado el espigón, la respuesta morfológica se normalizó entre norte y sur (**Figura 16**).

En noviembre 2015 se forma la barra submareal cerca de la orilla, y en diciembre ocurre erosión significativa en la sección subaérea que permite formar una barra submareal bien definida. En enero 2016 la playa subaérea al sur del espigón se erosionó más que al norte. La barra submareal migró mar adentro entre diciembre 2015 y febrero 2016, sin embargo, entre febrero y abril 2016 la barra se acopló a la orilla (antes en el sur que en el norte), permitiendo la recuperación parcial de la sección subaérea. Entre mayo y septiembre 2016 la arena se va acomodando en la sección subaérea permitiendo la recuperación de la playa (**Figura 16**).

Al igual que el año anterior, en noviembre 2016 se forma la barra submareal como consecuencia de la erosión subaérea, y durante el periodo de baja energía hasta principios de enero 2017 la barra se acopla en la orilla permitiendo la recuperación parcial de la playa subaérea. La tormenta de finales de enero 2017 (E17*) erosionó la sección subaérea y formó una barra longitudinalmente homogénea, que al igual que en el anterior verano, migró paulatinamente hasta acoplarse a la sección subaérea (**Figura 16**).

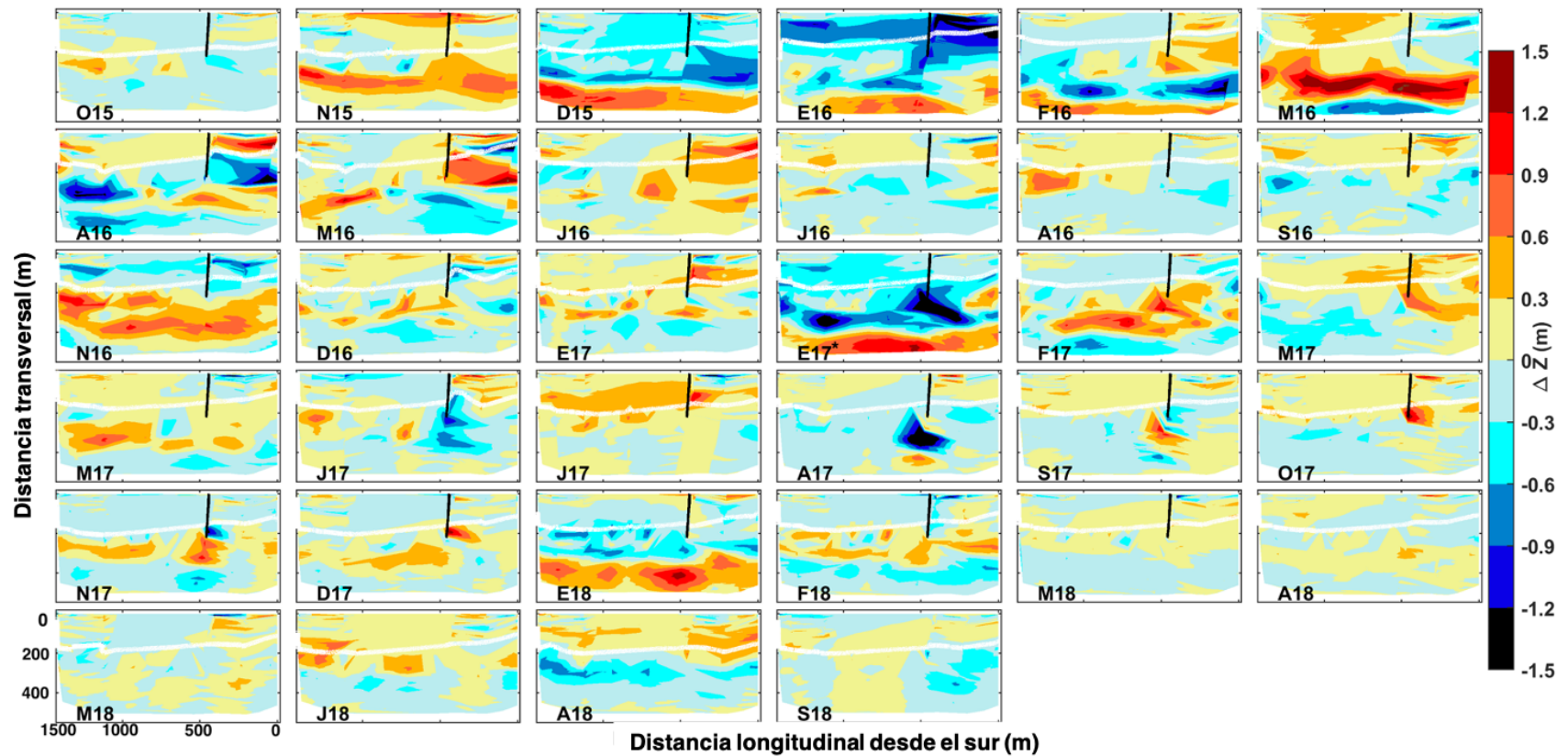


Figura 16.- Diferencias morfológicas entre campañas topo-batimétricas desde septiembre 2015 a septiembre 2018. En el año 2017 se cuenta con dos mediciones de enero con la finalidad de captar el efecto de una tormenta (*). El ΔZ muestra la diferencia en elevación con respecto al mes anterior.

4.4.3 Diferencias morfológicas acumuladas

Una forma de mostrar la evolución morfológica de la playa durante el periodo de estudio es determinar el cambio morfológico acumulado desde el mes de inicio (agosto 2015) (**Figura 17**). Se aprecia claramente la estacionalidad de la playa, caracterizada por erosión subaérea y formación de una barra submareal en los meses de invierno, mientras que durante la primavera la playa subaérea se recupera de forma gradual.

Tres meses después de la instalación del espigón la variabilidad morfológica subaérea fue diferente al sur y al norte. La sección sur se observa más susceptible a presentar erosión. Aunque ambas secciones subaéreas se erosionaron durante el invierno 2015-16, el sur se erosionó más, pero tardó menos tiempo en recuperarse durante el verano. La recuperación es gradual durante el periodo de baja energía de oleaje, sin embargo, la sección subaérea no logra recuperarse completamente hasta finales del verano de 2018 una vez retirado el espigón (**Figura 17**).

La eliminación del espigón permite que la variabilidad morfológica se homogeneice a lo largo de la playa. Los meses de octubre 2015 y septiembre 2018 muestran una respuesta morfológica similar, por tanto, a pesar de grandes eventos erosivos ocurridos durante el invierno El Niño 2015-16 y la alta variabilidad longitudinal de la playa por la presencia del espigón, la playa logra recuperar su estado inicial en el transcurso de los tres años. A pesar de la alta variabilidad morfológica de la sección sur (alta erosión), logró recuperarse casi por completo para septiembre 2018 (**Figura 17**).

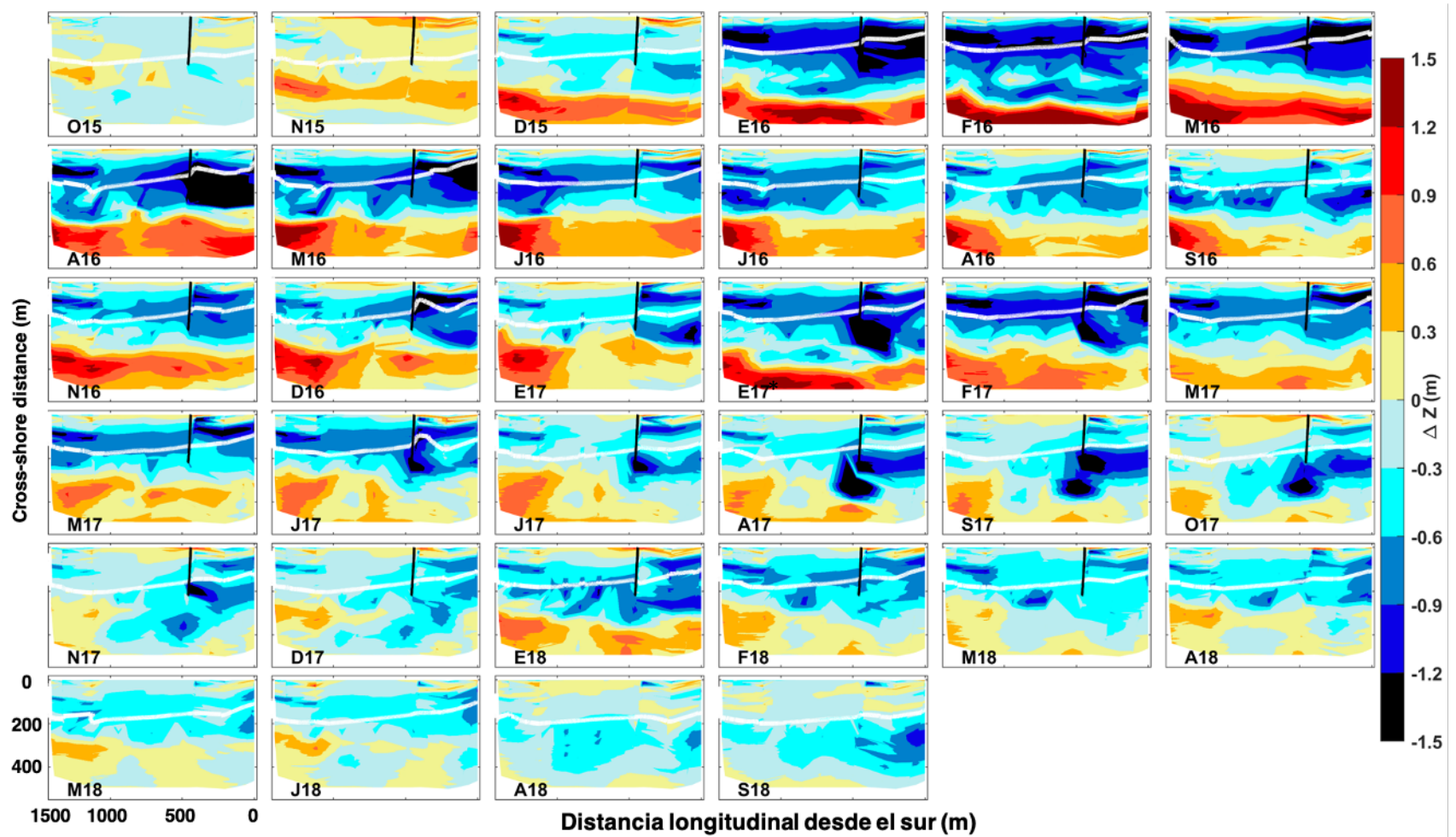


Figura 17.- Diferencias morfológicas acumuladas desde agosto 2015. E17* representa una medición realizada después de una tormenta. El ΔZ muestra la diferencia en elevación con respecto a agosto 2015.

4.4.4 Variabilidad volumétrica a ambos lados del espigón

Con el fin de entender las diferencias en la variabilidad volumétrica a ambos lados del espigón, se obtuvieron los volúmenes despromediados (DEM-Vol) de TB33 al norte y TB35 al sur del espigón entre los -2m y 2 m de elevación (**Figura 18**). Durante periodos de alta energía del oleaje, ambas secciones muestran erosión, sin embargo, ésta es mayor al sur donde alcanza pérdidas mensuales de $-71 \text{ m}^3/\text{m}$ y ganancias de hasta $47 \text{ m}^3/\text{m}$. Por su parte, sección al norte del espigón es más estable, presenta pérdidas y ganancias mensuales máximas de $-55 \text{ m}^3/\text{m}$ y $53 \text{ m}^3/\text{m}$ respectivamente

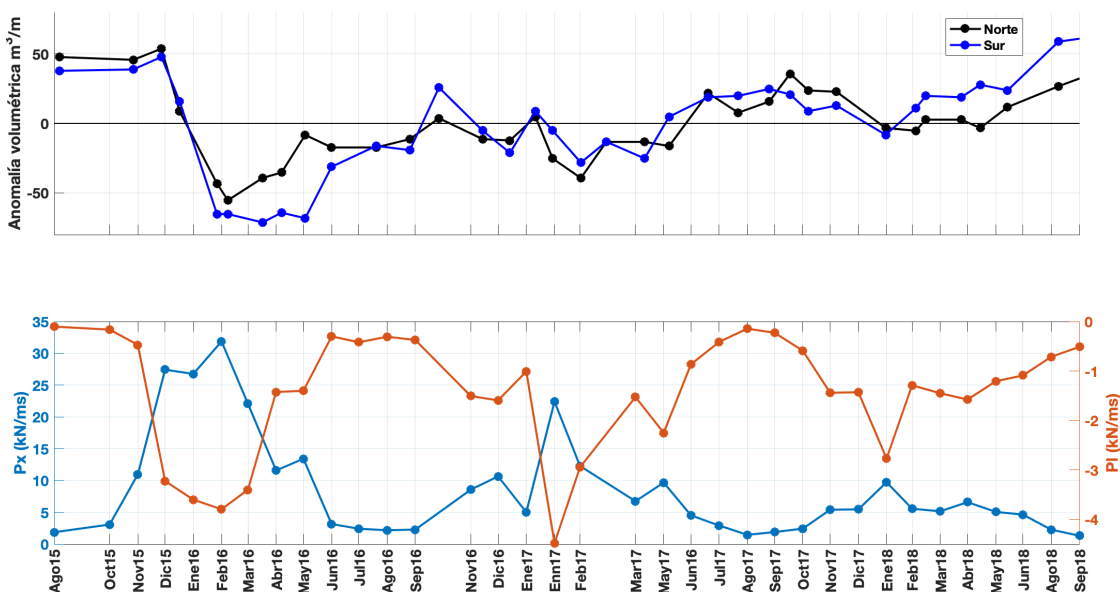


Figura 18.- En el panel superior volúmenes despromediados de la sección submareal cercana, entre elevaciones de -2 a 2 m al sur (azul) y norte (negro) del espigón. En el panel inferior, energía longitudinal (PI) de color naranja y energía transversal (Px) en color azul. Valores de energía negativos indican flujos hacia el sur para PI, valores positivos para Px indican flujos hacia fuera de la costa.

Durante periodos de menor energía (entre abril y octubre) ambas secciones muestran una recuperación volumétrica, sin embargo, la recuperación es más rápida al norte que al sur (**Figura 19**).

Con el fin de cuantificar las diferencias morfológicas subaéreas a ambos lados del espigón, se calcularon los volúmenes para los perfiles ubicados hasta a ~800 m al sur y al norte del espigón (**Figura 19**). En general, ambas secciones muestran patrones similares en el tiempo, pero difieren en la magnitud y distancia de afectación. En presencia del espigón, la sección sur muestra mayor erosión que la del norte durante los periodos de alta energía en invierno, y los primeros 700 m al sur parecen tener más dificultades de recuperarse durante los periodos de baja energía entre primavera y verano. En ausencia de espigón ambas secciones muestran homogeneidad longitudinal (**Figura 19**).

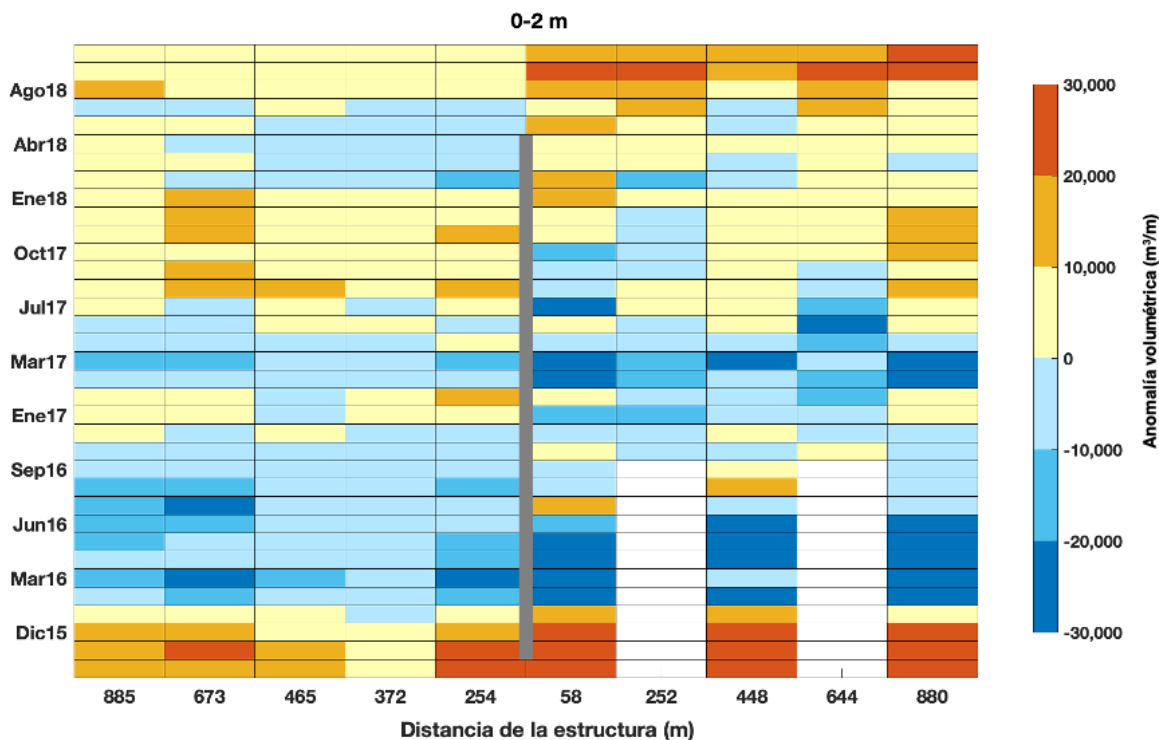


Figura 19.- Anomalías volumétricas subaéreas ($z=[0, 2]$ m) de septiembre 2015 a septiembre 2018. Los colores cálidos representan acreción y los fríos erosión. La distancia transversal está referida a la posición del espigón. Los cuadros en blanco muestran falta de datos.

Capítulo 5. Discusión

La playa de estudio presenta cambios morfológicos típicos reportados asociados a la estacionalidad del oleaje, erosión subaérea y formación de una barra submareal en invierno y transporte de sedimentos hacia la orilla a partir de primavera, permitiendo la recuperación de la playa para finales del verano (Wright y Short, 1984; Ruiz de Alegría-Arzaburu et al., 2018, Vidal-Ruiz y Ruiz de Alegría-Arzaburu, 2019). Las secciones subaérea y submareal presentan un comportamiento similar, pero opuesto. La playa submareal alcanza valores máximos a finales del invierno ($80\text{m}^3/\text{m}$) mientras que la subaérea muestra volúmenes mínimos ($-60\text{m}^3/\text{m}$). En periodos de calma durante la primavera y verano ocurre lo contrario, la sección submareal se erosiona mientras que la subaérea se recupera hasta alcanzar sus valores máximos.

El oleaje presenta alta energía entre diciembre y febrero (H_s promedio mensual de hasta 2 m con T_p de 14 s) y baja energía de mayo a octubre (H_s mensual promedio de 0.6 m con T_p de 8 s), esto coincide con lo reportado por Ruiz de Alegría-Arzaburu et al. (2018). A pesar de que esta playa presenta variabilidad morfológica de dominancia transversal (Vidal-Ruiz y Ruiz de Alegría-Arzaburu, 2019; 2020) ligeros cambios en la dirección del oleaje sugieren ser de importancia en la definición de patrones de erosión y acreción a lo largo de la playa.

La Figura 20 representa el modelo conceptual sobre el efecto que tuvo la presencia del espigón en la playa de estudio cuya variabilidad morfodinámica es de dominancia transversal. A diferencia de otros estudios (Lira-Patoja et al., 2014; Medellín y Torres-Freyermuth, 2019) la playa de estudio no presenta el típico patrón morfológico de acreción intensa corriente arriba y erosión intensa corriente abajo. Sin embargo, durante los periodos de alta energía de oleaje el transporte de sedimentos es de dominancia transversal (Harley et al. 2011; Harley et al. 2015), y se erosionan ambos lados del espigón, aunque la erosión al sur (corriente abajo) es mayor que en el norte. Esto nos muestra que a pesar de que P_x domina, con valores un orden de magnitud mayor que la componente longitudinal, podría ser que P_l

influya ligeramente en el comportamiento de la playa. Durante los periodos de mediana-baja energía entre primavera y verano ocurre la recuperación de la playa subaérea, sin embargo, [Lira-Patoja et al. \(2012\)](#) sugieren que la presencia del espigón dificultó la recuperación de la playa en la sección sur, cuando PI cobra importancia ya que presenta valores del mismo orden de magnitud que P_x . Una vez retirada la estructura, la playa logra recuperar su homogeneidad longitudinal, al igual que lo reportado por [Medellín et al. \(2018\)](#) en un estudio similar.

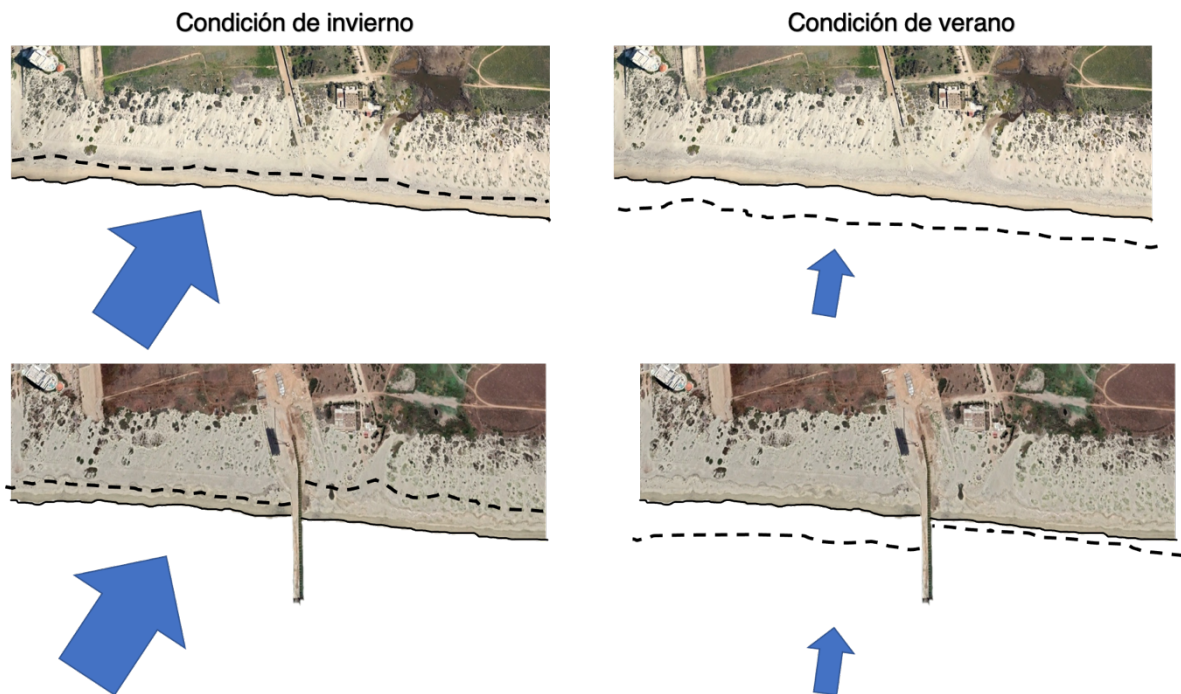


Figura 20.- Modelo conceptual de la variabilidad morfológica longitudinal en ausencia (arriba) y presencia del espigón (abajo) para diferentes escenarios de oleaje incidente, representado por la flecha azul.

Capítulo 6. Conclusiones

Este estudio determinó el efecto de un espigón temporal de 250 m de longitud en la variabilidad morfológica de 5.5 km de playa dominada por el transporte de sedimentos transversal mediante el uso de mediciones morfológicas y de oleaje. Se analizaron las variaciones morfológicas estacionales a lo largo de tres años a través del cálculo volumétrico de tanto la sección subaérea como la submareal, y se relacionaron con las características del oleaje incidente.

La playa muestra una estacionalidad morfológica marcada y definida por las características del oleaje incidente, alta energía en invierno ($H_s=2$ m y $T_p=14$ s) y periodos de baja energía entre primavera y verano ($H_s=0.6$ m y $T_p=8$ s). Consecuentemente, la playa subaérea es más ancha en verano y más angosta en invierno, con diferencias de alrededor de 100 m.

La variabilidad morfológica más importante en la playa es transversal debido a que los cambios en la dirección del oleaje son pequeños. Sin embargo, en presencia del espigón se observaron diferencias morfológicas importantes a ambos lados de la estructura durante el año. La playa al sur del espigón muestra la mayor variabilidad volumétrica, con pérdidas mensuales de hasta 71 m³/m y ganancias de hasta 47 m³/m. Por el contrario, la playa al norte del espigón es más estable, y presenta pérdidas y ganancias mensuales máximas de 55 m³/m y 53 m³/m respectivamente. Los patrones de erosión/acreción en ambos lados de la estructura están controlados por las características del oleaje incidente. Durante periodos de alta energía, ambas secciones de playa se erosionan de forma similar. Sin embargo, durante condiciones de energía medio-baja típica de primavera y verano las pequeñas variaciones de dirección del oleaje dicta la respuesta morfológica de cada sección de playa.

La sección de hasta 500 m al sur del espigón mostró mayor variabilidad volumétrica que la del norte de la estructura; se erosionó más que la sección norte en condiciones de alta energía y no logró recuperarse por completo durante los periodos de baja energía de oleaje. Una vez retirado el espigón, la playa mostró muy buena capacidad de recuperación, y mostró morfología homogénea a lo largo de la playa.

Referencias

Alvarez, E.; Rubio, R., and Ricalde, H., 2007. Beach restoration with geotextile tubes as submerged breakwaters in Yucatan, Mexico.

Appendini, C. M., Salles, P., Mendoza, E. T., López, J., & Torres-Freyermuth, A. (2012). Longshore Sediment Transport on the Northern Coast of the Yucatan Peninsula. *Journal of Coastal Research*, 285(May 2014), 1404–1417. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00162.1>

Aubrey, D.G., 1979. Seasonal patterns of onshore/offshore sediment movement. *J. Geophys. Res.* 84 (C10), 6347–6354.

Bodge, K.R. and R.G. Dean, 1987. Short-term impoundment of longshore transport. *Proceedings, Coastal Sediments '87*, ASCE, pp. 468-483.

Burvingt, O., Masselink, G., Russell, P., & Scott, T. (2017). Classification of beach response to extreme storms. *Geomorphology*. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.07.022>

Castelle, B., & Coco, G. (2013). Surf zone flushing on embayed beaches. *Geophysical Research Letters*, 40(10), 2206–2210. <https://doi.org/10.1002/grl.50485>

Fabbri, K. P. (1998). A methodology for supporting decision making in integrated coastal zone management. *Ocean and Coastal Management*, 39, 51–62.

Fowler, J.E. and E.R. Smith, 1987. Evaluation of laboratory and scale effects on a three-dimensional movable-bed sand model. *Proceedings, Coastal Sediments, '87*, ASCE, pp. 166-174

French, P. W. (2001). *Coastal Defences*. <http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf>

Garau, C. (1981). Condicionantes de la estabilidad de playas. Analisis de la funcion polar de los salientes. *Revista de Obras Publicas*, 29 a 48.

Geotextiles and Geomembranes, 25(4–5), 233–241.

González, C., Álvarez, Ó., Reyes, J., & Acevedo, A. (2010). Two-dimensional modeling of hydrodynamics and sediment transport in the San Pedro tidal creek

(Cadiz Bay): Morphodynamical implications Modelado bidimensional de la hidrodinámica y transporte de sedimento en el caño de marea San Pedro (Bahía de Cádiz): *Im. Ciencias Marinas*, 36(4), 393–412.

González Avilés, R. (2013). *Estudio De Obras De Protección Costera. Caso México*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Guimarães, A., Lima, M., Coelho, C., Silva, R., & Veloso-Gomes, F. (2016). Groin impacts on updrift morphology: Physical and numerical study. *Coastal Engineering*, 109, 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.12.003>

Harley, M.D., Turner, I.L., Short, A.D., Ranasinghe, R., 2011. A reevaluation of coastal embayment rotation: the dominance of cross-shore versus alongshore sediment transport processes, Collaroy-Narrabeen Beach, southeast Australia. *J. Geophys. Res.* 116

Harley, M.D., Turner, I.L., Short, A.D., 2015. New insights into embayed beach rotation: the importance of wave exposure and cross-shore processes. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 120, 1470–1484.

Hayes, M.O., Boothroyd, J.C., 1969. Storms as modifying agents in the coastal environment. In: Hayes, M.O. (Ed.), *Coastal Environments: NE Massachusetts*. Department of Geology, University of Massachusetts, Amherst, pp. 290–315.

Hill, H. W., Kelley, J. T., Belknap, D. F., & Dickson, S. M. (2004). The effects of storms and storm-generated currents on sand beaches in Southern Maine, USA. *210*, 149–168. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.05.008>

Jackson, N. L., Harley, M. D., Armaroli, C., & Nordstrom, K. F. (2015). Beach morphologies induced by breakwaters with different orientations. *Geomorphology*, 239, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.010>

Jiménez, J.A., Gracia, V., Valdemoro, H.I., Mendoza, E.T., Sanchez-Arcilla, A., 2011. Managing erosion induced problems in NW Mediterranean urban beaches. *Ocean Coast. Manag.* 54, 907–918.

Kantardgi, Izmail, 1996. Groin area water exchange, *Journal of Hydraulic Research*, 34:2, 161-172, DOI: 10.1080/00221689609498494

Lira-Pantoja, M. A., Torres-Freyermuth, A., Appendini, C. M., Fernández, D. C., Salles, P., Mendoza, E. T., López, J., & Pedrozo-Acuña, A. (2012). Chronic Beach

Erosion Induced By Coastal Structures in Chelem, Yucatán. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(33), 125. <https://doi.org/10.9753/icce.v33.sediment.125>

Masselink, G., Austin, M. J., Tinker, J., Office, M., & Hare, T. J. O. (2008). Cross-shore sediment transport and morphological response on a macrotidal beach with intertidal bar morphology, Truc Vert, France. (June). <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.01.010>

Medellín, G., Torres-Freyermuth, A., Tomasicchio, G. R., Francone, A., Tereszkieicz, P. A., Lusito, L., ... López, J. (2018). Field and numerical study of resistance and resilience on a sea breeze dominated beach in Yucatan (Mexico). *Water (Switzerland)*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/w10121806>

Medellín, G., & Torres-Freyermuth, A. (2019). Morphodynamics along a micro-tidal sea breeze dominated beach in the vicinity of coastal structures. *Marine Geology*, 417(August), 106013. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.106013>

Mohanty, P. K., Barik, S. K., Kar, P. K., Behera, B., & Mishra, P. (2015). Impacts of ports on shoreline change along Odisha coast. *Procedia Engineering*, 116(1), 647–654. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.339>

Odériz, I. , Mendoza, E. , Leo, C. , Santoyo, G. , Silva, R. , Martínez, R., et al. (2014), An Alternative Solution to Erosion Problems at Punta Bete-Punta Maroma, Quintana Roo, Mexico: Conciliating Tourism and Nature, *Journal of Coastal Research*, 71(SI), 75-85.

Ozolcer, I.H., Komurcu, M, I., Birben, A. R., Yusek, O., Karasu, S., (2006). Effects of T-shape groin parameters on beach accretion. *Ocean Engineering*, 33, 382-403.

Perlin, M. and Dean R.G., 1978. Prediction of beach planforms with littoral controls. *Proceedings, 16th Coastal Engineering Conference, AseE*, pp. 1818-1838.

Pranzini, E., Rossi, L., Lami, G., Jackson, N., Nordstorm, K., (2018). Reshaping beach morphology by modifying offshore breakwaters. *Ocean and Coastal management*, 154 (168-177).

Price, W.A., Tomlinson, K.W., 1968. The effect of groins on stable beaches. *Coastal Engineering* 1, 518–526.

Rea, C.C. and P.D. Komar, 1975. Computer simulation models of a hooked beach shoreline configuration. *Journal of Sedimentary Petrology*, 45, 866- 872.

Ruiz de Alegria-Arzaburu, A., García-Nava, H., Gil-Silva, E., Desplán- Salinas, G. 2015. A morphodynamic comparison of walled and non- walled beach sections, Ensenada beach, Mexico. World Scientific. The Proceedings of the Coastal Sediments ISBN:978-981-4355-52-0

Ruiz de Alegría-Arzaburu, A., Vidal-Ruiz, J. A., García-Nava, H., & Romero-Arteaga, A. (2017). Seasonal morphodynamics of the subaerial and subtidal sections of an intermediate and mesotidal beach. *Geomorphology*, 295(July), 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.07.021>

Ruiz de Alegría-Arzaburu, A., & Vidal-Ruiz, J. A. (2018). Beach recovery capabilities after El Niño 2015–2016 at Ensenada Beach, Northern Baja California. *Ocean Dynamics*, 68(6), 749–759. <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1164-6>

Scott, T., Austin, M., Masselink, G., & Russell, P. (2016). Dynamics of rip currents associated with groynes field measurements, modelling and implications for beach safety. *Coastal Engineering*, 107, 53–69. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.09.013>

Senechal, N., Coco, G., Castelle, B., & Marieu, V. (2015). Storm impact on the seasonal shoreline dynamics of a meso- to macrotidal open sandy beach (Biscarrosse, France). *Geomorphology*, 228, 448–461. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.09.025>

Serkan, S. (2017). A One-Line Numerical Model For Shoreline Evolution Under The Interaction Of Wind Waves And Offshore Breakwaters (Issue July 2006). Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University.

Shepard, F.P., 1950. Beach cycles in Southern California. In: Beach Erosion Board Technical Memo No. 20. U.S. Army Corps of Eningeers.

Sherman, D. J., Bauer, B. O., Nordstrom, K. F., & Allene, J. R. (1990). A Tracer Study of Sediment Transport in the Vicinity of a Groin: New York, U.S.A. *Journal of Coastal Research*, 6(2), 427–438.

Short, A. D. (1980). BEACH RESPONSE TO VARIATIONS IN BREAKER HEIGHT. In *Coastal Engineering*.

Short A.D. (Ed.), 1999. *Beach and Shoreface Morphodynamics*. Wiley, Chichester, 379 pp.

Splinter, K. D., Gonzalez, M. V. G., Oltman-Shay, J., Rutten, J., & Holman, R. (2018). Observations and modelling of shoreline and multiple sandbar behaviour on a high-energy meso-tidal beach. *Continental Shelf Research*, 159(February), 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.03.010>

Thia-Eng, C. (1993). Essential Elements of Integrated Coastal Zone Management. *Ocean and Coastal Management*, 21, 81–108.

Vaidya, A. M., Kori, S. K., Kudale, M. D. (2015) Shoreline Response to Coastal Structures. *Aquatic Procedia*, 4, 333-340.

Vidal-Ruiz, J. A., & Ruiz de Alegría-Arzaburu, A. (2020). Modes of onshore sandbar migration at a single-barred and swell-dominated beach. *Marine Geology*, 426(April), 106222. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106222>

Vousdoukas, M. I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L., Plomaritis, T. A., Athanasiou, P., Luijendijk, A., & Feyen, L. (2020). Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature Climate Change*, 10(March). <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0>

Wright, L.D., Thom, B.G., 1977. Coastal depositional landforms: a morphodynamic approach. *Prog. Phys. Geogr.* 1, 412–459.

Wright, L.D., Short, A.D., Green, M.O., 1985. Short term changes in the morphodynamic states of beaches and surf- zones: An empirical predictive model. *Mar. Geol* 62, 339– 364.

Wright, L.D., Short, A.D., 1985. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine Geology* 56.

Anexos

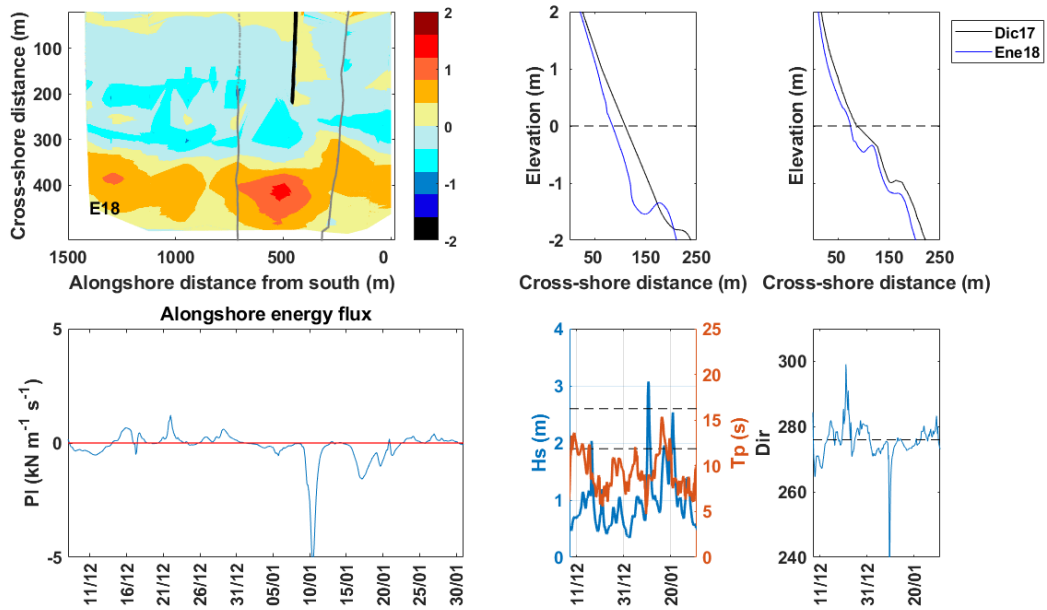


Figura 21.-Modelo de elevación digital en el panel izquierdo, perfil al norte en el panel superior central y perfil al sur del espigón, en negro el mes anterior y en azul el mes actual. En el panel inferior izquierdo el flujo longitudinal seguido por los parámetros de oleaje.

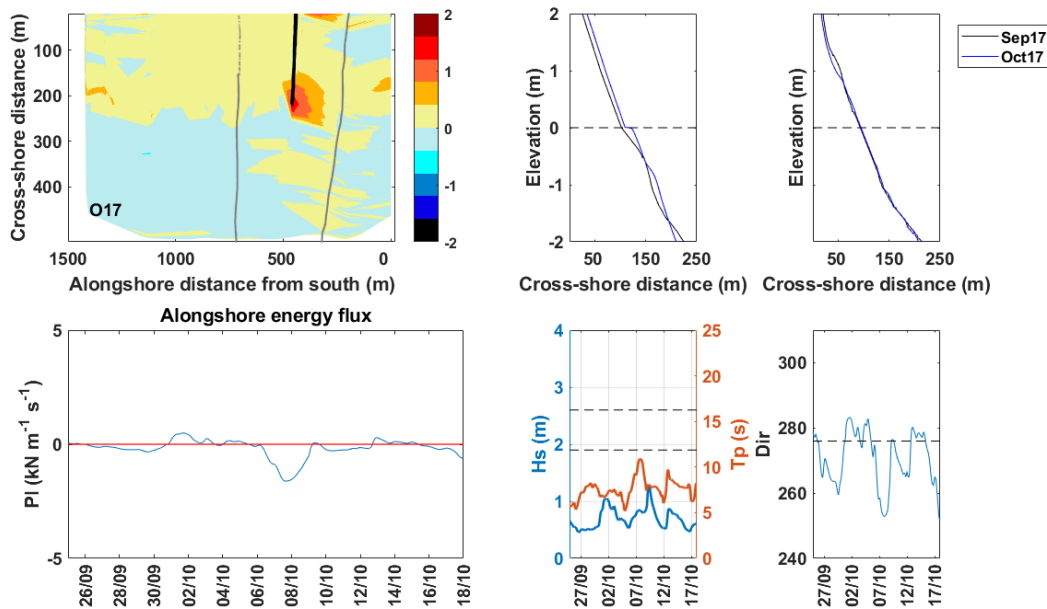


Figura 22.-Modelo de elevación digital en el panel izquierdo, perfil al norte en el panel superior central y perfil al sur del espigón, en negro el mes anterior y en azul el mes actual. En el panel inferior izquierdo el flujo longitudinal seguido por los parámetros de oleaje.

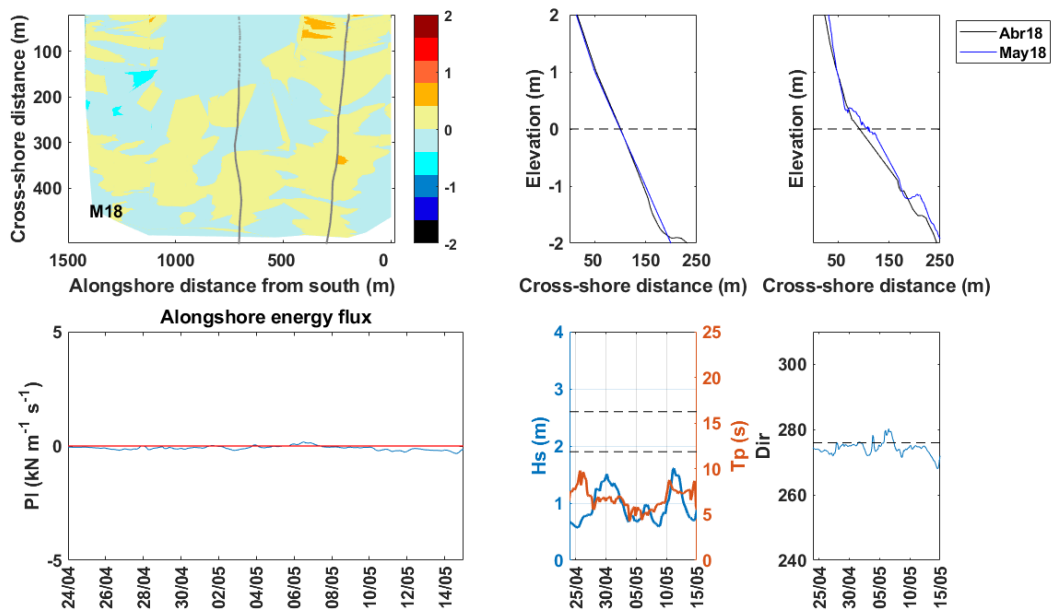


Figura 22. Modelo de elevación digital en el panel izquierdo, perfil al norte en el panel superior central y perfil al sur del espigón, en negro el mes anterior y en azul el mes actual. En el panel inferior izquierdo el flujo longitudinal seguido por los parámetros de oleaje.

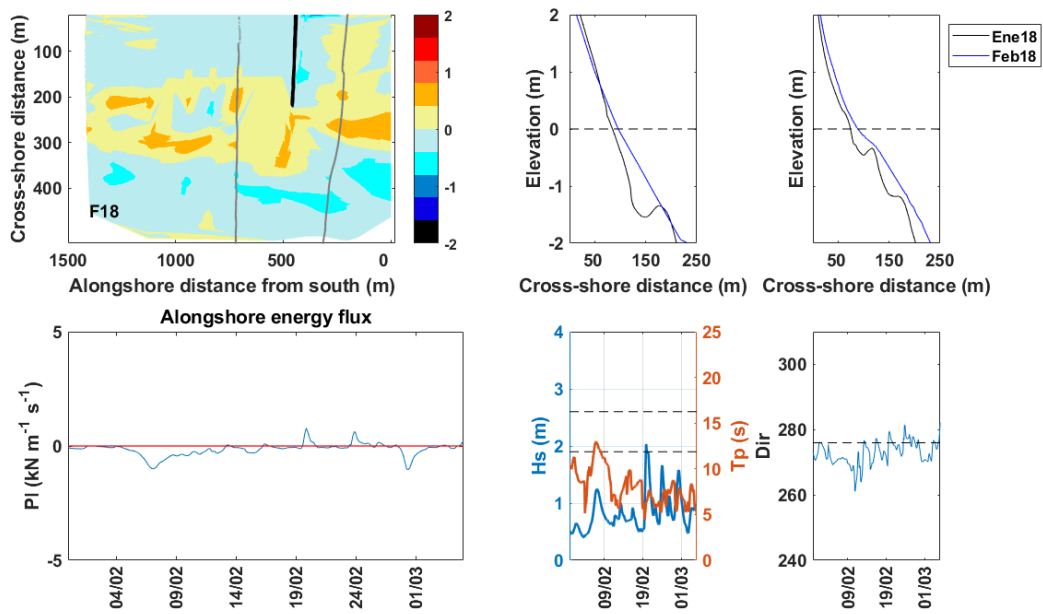


Figura 23. Modelo de elevación digital en el panel izquierdo, perfil al norte en el panel superior central y perfil al sur del espigón, en negro el mes anterior y en azul el mes actual. En el panel inferior izquierdo el flujo longitudinal seguido por los parámetros de oleaje.

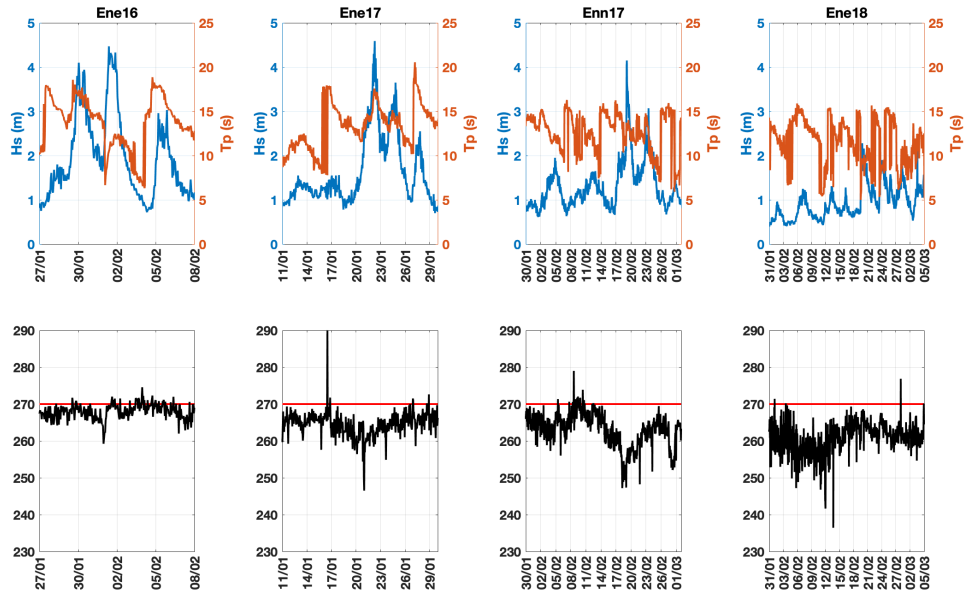


Figura 24. Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.

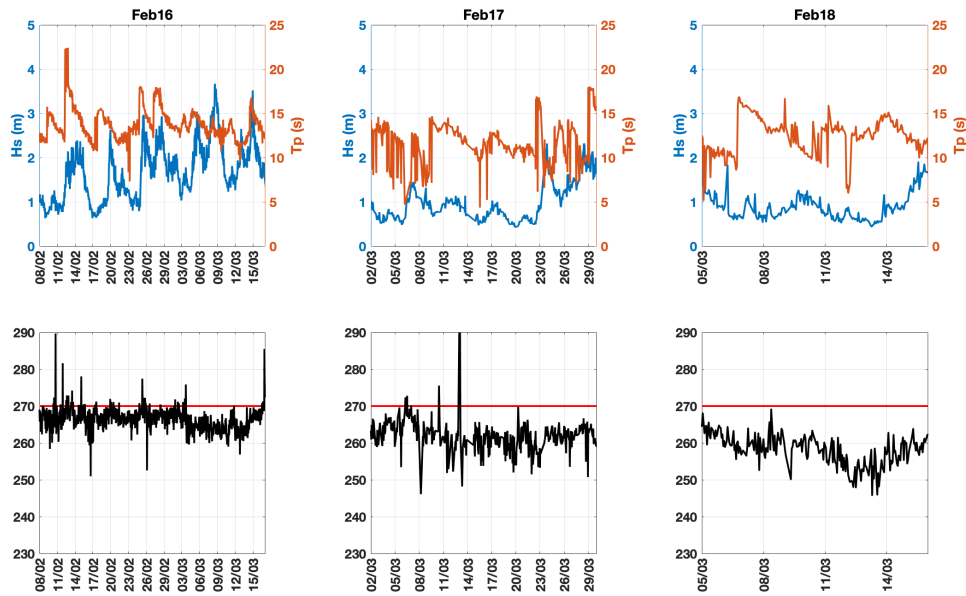


Figura 25. - Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.

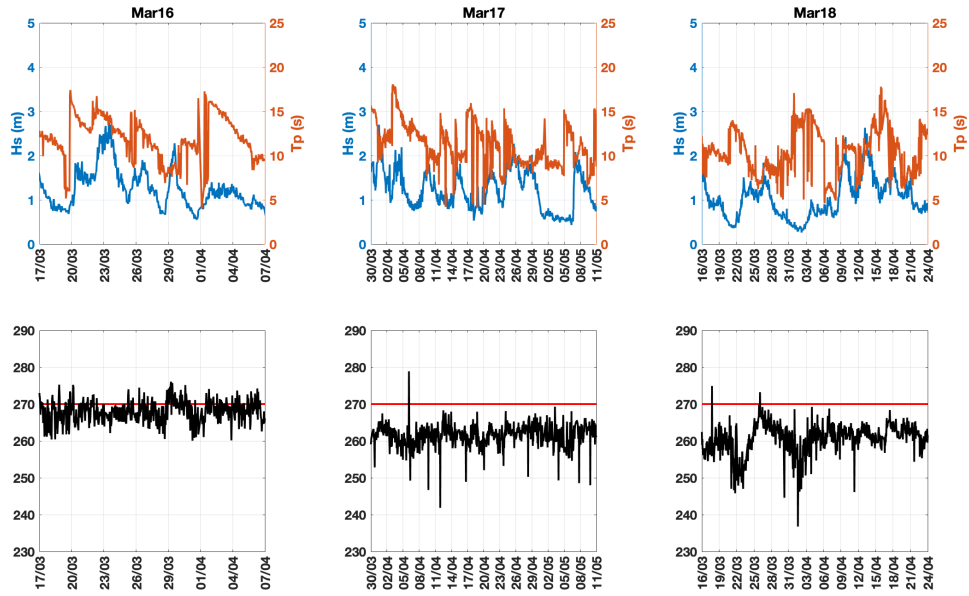


Figura 26.- Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.

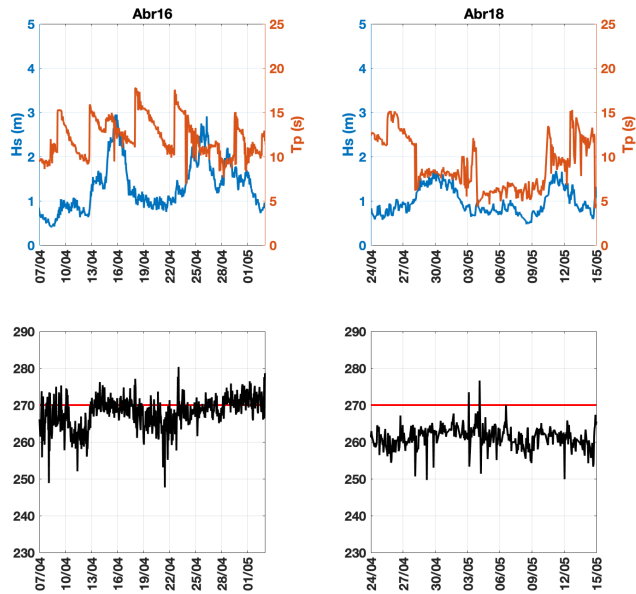


Figura 27.- Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.

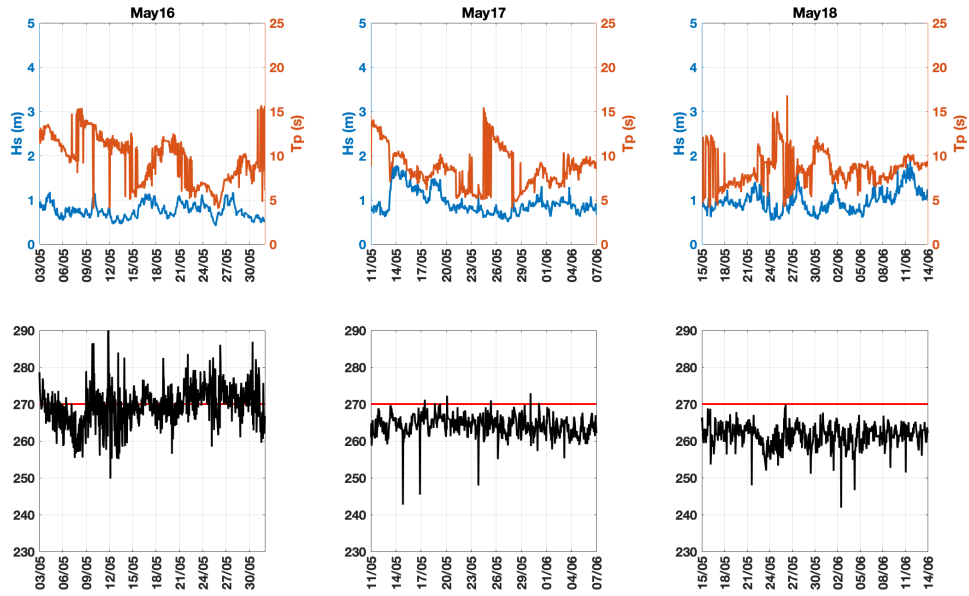


Figura 28.- Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.

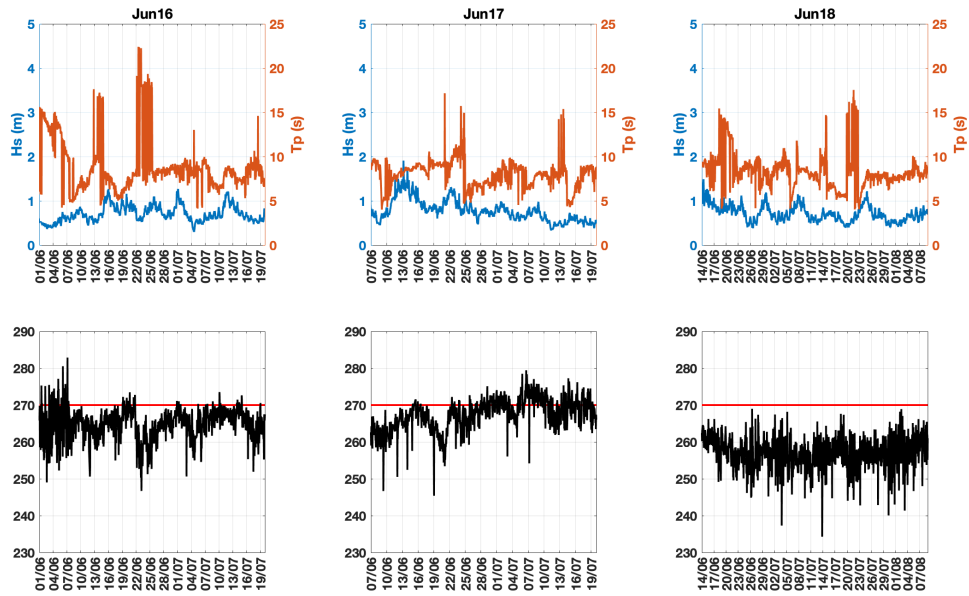


Figura 29.- Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.

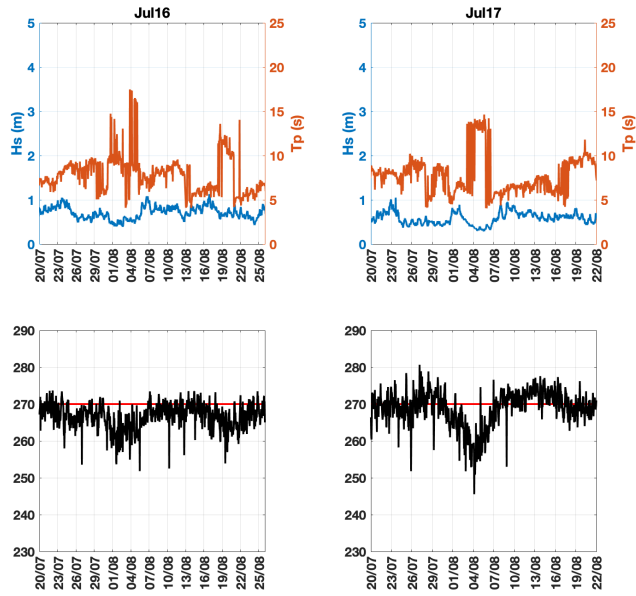


Figura 30.- Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.

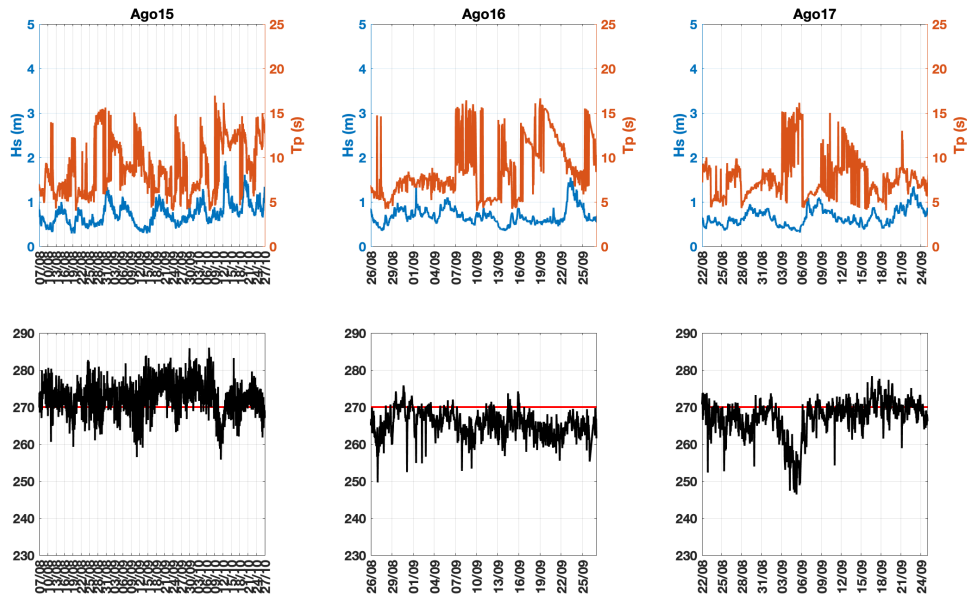


Figura 31.- Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.

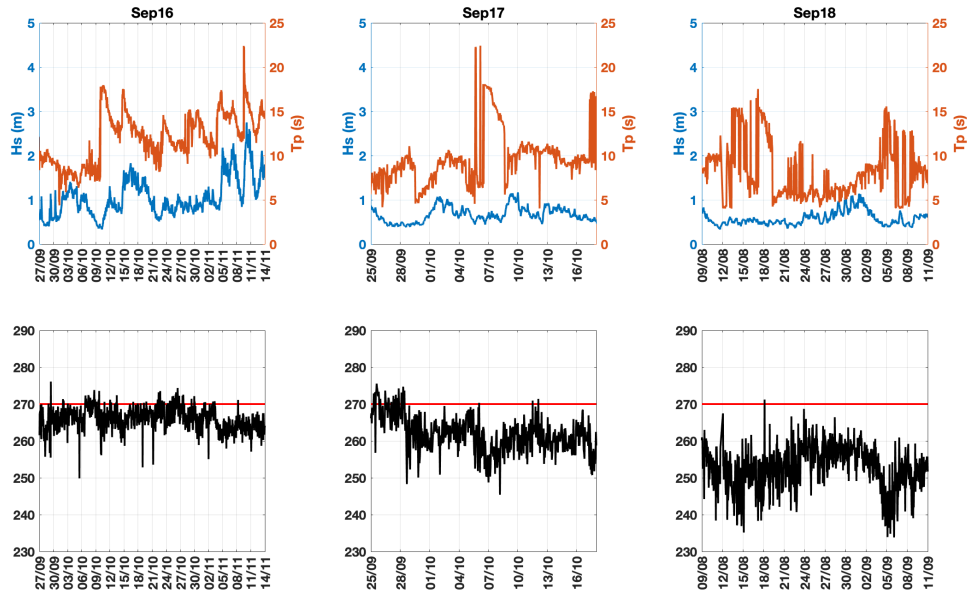


Figura 32.- Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.

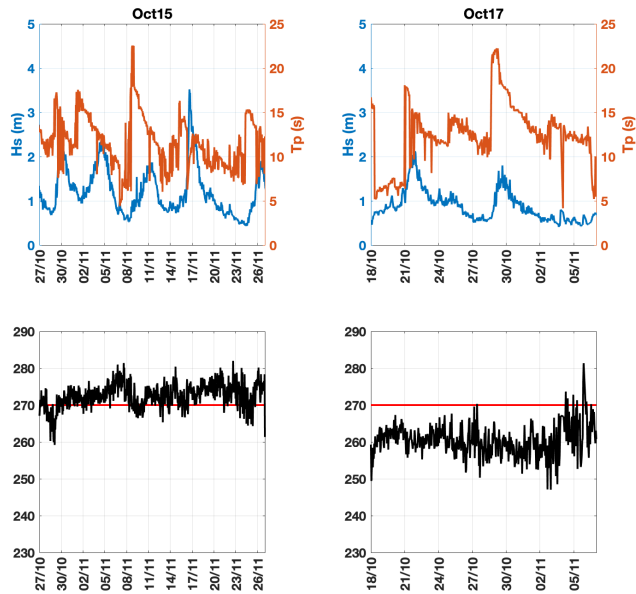


Figura 33.- Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.

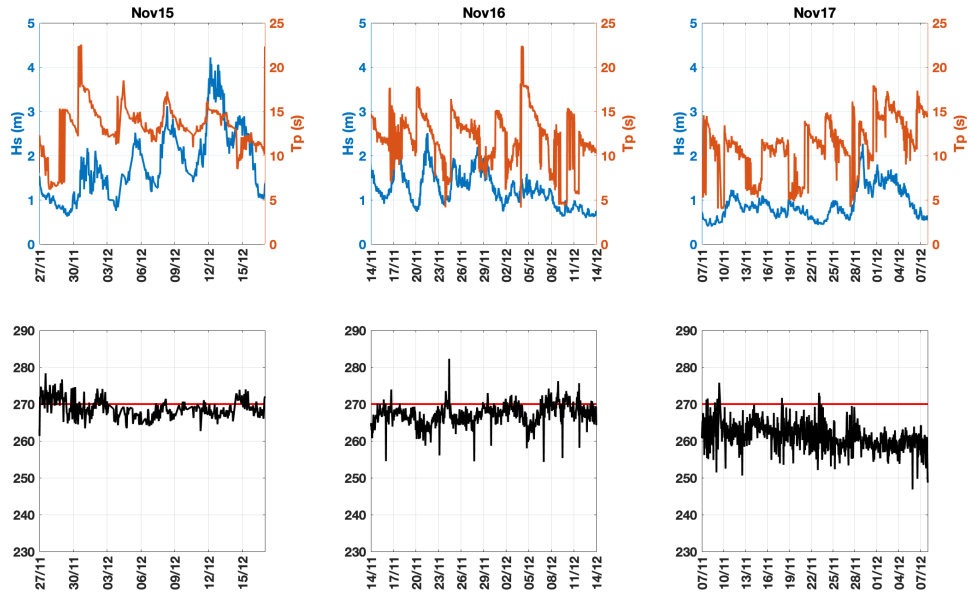


Figura 34.- Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.

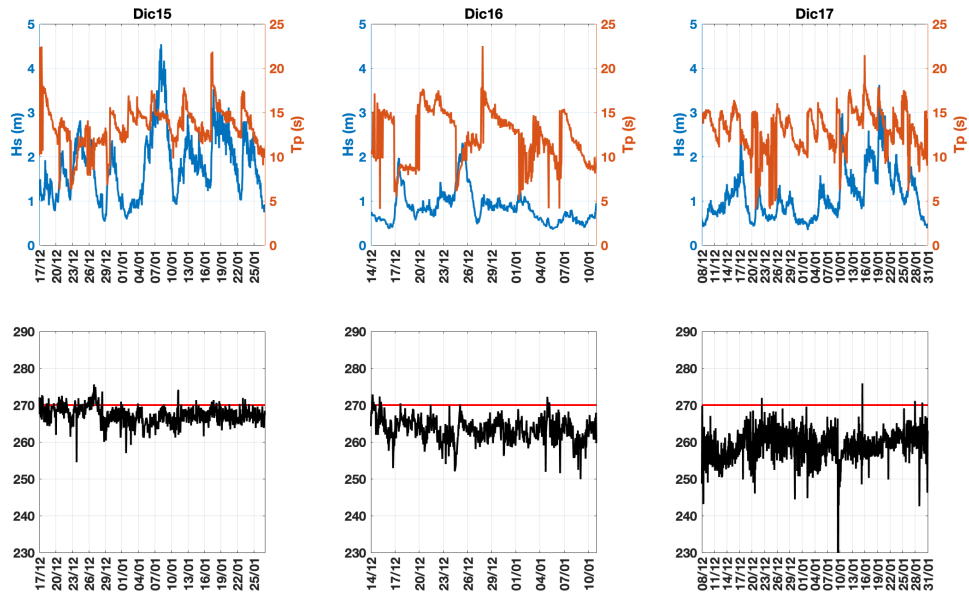


Figura 35.- Altura del oleaje (H_s , m), periodo del pico espectral (T_p , s) y dirección del ángulo de aproximación del oleaje (Dir), en cada año del periodo de estudio.