



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA Y TURISMO

TESIS DE LICENCIATURA EN OCEANOGRAFÍA

**Ondas de tormenta en la zona costera de Paso Seco,
Buenos Aires, Argentina.**

Tesista: Camila Stempels Bautista

Directora: Dra. Diana G. Cuadrado

Co-Directora: Dra. M. Cintia Piccolo

BAHÍA BLANCA, 2019

AGRADECIMIENTOS

A mi directora, Dra. Diana G. Cuadrado.

A mi co-directora, Dra. M. Cintia Piccolo.

A la Universidad Nacional del Sur y a todos los docentes de la carrera.

Al personal administrativo del Departamento de Geografía y Turismo.

A las autoridades del Instituto Argentino de Oceanografía (IADO).

A mi mamá, papa y hermana.

A mis abuelos.

A mi novio.

A mis amigos de la Universidad.

A mis amigos de toda la vida.

INDICE

RESUMEN	4
ABSTRACT.....	5
1. INTRODUCCION	6
1.1. Definición del problema.....	6
1.2. Ondas de tormenta.....	8
1.3. Área de estudio.....	10
1.4. Antecedentes	11
1.5. Hipótesis de trabajo.....	13
1.6. Objetivos	13
1.6.1. Objetivo general	13
1.6.2. Objetivos específicos.....	14
2. MATERIALES Y MÉTODOS	14
3. RESULTADOS	16
3.1. Análisis de los registros de nivel y temperatura de agua.	16
3.2. Estadísticas del análisis de los registros de nivel de agua.	18
3.3. Análisis de ondas de tormenta seleccionadas.....	24
3.3.1. Evento 1: 23 de junio de 2018.....	24
3.3.2. Evento 2: 15 de julio de 2017.....	26
3.3.3. Evento 3: 11 de junio de 2015.....	29
3.3.4. Evento 4: 10 de marzo de 2017	31
3.4. Comparación de modelos de reanálisis.	33
3.4.1. Modelos de olas.....	33
3.4.2. Modelos de mapas sinópticos.....	35
4. DISCUSION	37
5. CONCLUSIONES	40
6. REFERENCIAS.....	41
7. ANEXO I.....	48

RESUMEN

Los procesos costeros tales como las olas asociadas a ondas de tormenta, juegan un papel preponderante en la zona litoral, afectando no sólo la geomorfología costera sino también la hidrodinámica de la zona. El objetivo general de la investigación es estudiar la frecuencia e intensidad de las ondas de tormenta asociadas a eventos extremos que se observaron en la zona costera de Paso Seco, Buenos Aires ($40^{\circ}38'31''\text{S} - 62^{\circ}12'54''\text{O}$) en el período 2015-2018. Se pretende además comparar diferentes modelos numéricos de olas y del tiempo atmosférico para ser potencialmente utilizados en aquellas zonas en las cuales no se dispone de mediciones oceanográficas. El área de estudio es un canal de marea inactivo que ha sido obstruido por una espiga de arena, por lo que actualmente conforma una planicie supramareal colonizada por matas microbianas, inundada en condiciones de tormenta. Se utilizaron datos de sensores de nivel y temperatura del agua (HOBO-ONSET) en dos estaciones ubicadas a diferentes distancias del mar para identificar la llegada de las inundaciones. Empleando los días de inundación que coinciden en ambas estaciones se identificaron las situaciones de tiempo atmosférico que generaron ondas de tormenta en la zona de estudio. Esto se realizó mediante el análisis de los mapas sinópticos de diversas instituciones, que luego se correlacionaron con el modelo GFS del WindGuru Pro. Los resultados muestran que las ondas de tormenta de la zona de estudio son generadas por desplazamientos de frentes fríos en dirección SO-NE asociadas a centros de baja presión en el Océano Atlántico que producen fuertes vientos principalmente del SO de más de 40 km/h de velocidad media promedio con olas asociadas de más de 3 m de altura y aproximadamente 9 s de período correspondientes al cuadrante S. La marea en estos eventos generalmente es de sicigia pero también se observaron con mareas de cuadratura. Las ondas de tormenta permiten el ingreso del agua al antiguo canal de marea produciendo inundaciones en ambas estaciones de medición a lo largo de todo el año. Los modelos de olas y los mapas sinópticos del tiempo atmosférico son una herramienta muy útil que pueden ser utilizados en aquellas zonas en las cuales no se dispone de estaciones de monitoreo. Dado que en la zona de estudio se encuentran matas microbianas, este trabajo permitió contrarrestar la teoría que indica que las matas microbianas representan un ambiente de escasa energía en el ambiente fósil y que las tormentas son situaciones excepcionales en el ambiente costero.

Palabras claves: ondas de tormenta, espiga costera, inundaciones, matas microbianas, modelos de olas, modelos del tiempo atmosférico.

ABSTRACT

Coastal processes such as waves, created by storms, play a predominant role in the coastal zone and have an effect not only on the coastal geomorphology but also on the hydrodynamics. The main objective of this research is to study the origin of the floodings recorded in the coastal area of Paso Seco, Buenos Aires (40°38'31" S - 62°12'54" W) during the period 2015-2018 that create massive microbial deformation sedimentary structures. So, extreme events associated with storm surges were studied in frequency and intensity. Besides, different waves and weather numerical models were compared to be possible used in areas where oceanographic measurements are unavailable. The study area is an inactive tidal channel that has been evolved by the progradational process after the formation of a sand spit. Currently, it behaves as a supramareal flat colonized by microbial mats, which is flooded under storm conditions. Water level and temperature were continuously recorded by a sensor data (HOBO-ONSET) located in two stations at different distances from the sea. The weather condition that generated flooding simultaneously in both stations was studied, identifying that storm surges provoke the inundation of the coastal area. Storm surges are generated by displacements of cold fronts in SW-NE direction associated to low pressure centers in the Atlantic Ocean that produce strong winds mainly from SW characterized by mean average speed higher than 40 km/h and associated waves of more than 3-m height and approximately 9 s period, coming from the quadrant S. The events are usually occurring on spring tides but during neap tides they may also happen. Storm surges allow water to enter the elongate study area, causing floods in both stations throughout the year. Synoptic maps of various institutions were analyzed and correlated with the GFS model of the WindGuru Pro. No differences were recognized between the wave and weather models, concluding that they are a handy and relevant tool since they can be used in areas where monitoring stations are not available. This study support that microbial mats not only are formed in a low-energy environment but withdrawn high water currents generated by regular storm surges. These characteristics would be inferred in the fossil record. Otherwise, storms are not exceptional situations in the coastal environment.

Keywords: storm surges, floods, sand spit, microbial mats, wave models, weather models.

1. INTRODUCCION

1.1. Definición del problema

Las espigas costeras son geoformas litorales que protegen de la acción de las olas a otros ambientes de gran riqueza biológica, tales como planicies de marea y marismas (Kokot, 2010). Las olas asociadas a ondas de tormenta juegan un papel preponderante en la zona litoral, afectando no sólo la geomorfología costera sino también la hidrodinámica de la zona. La deriva litoral, que es uno de los procesos de formación de espigas de arena, está influida con el pasaje de los diferentes sistemas sinópticos que actúan en la generación de un clima de olas dominante (Kokot, 2010). Así, tanto la forma como la orientación de las espigas pueden modificarse.

Al sur de la provincia de Buenos Aires ($40^{\circ}38'31''\text{S} - 62^{\circ}12'54''\text{O}$), el transporte de sedimentos con dirección S-N ha generado una espiga en la inflexión hacia el continente (Punta Rubia Falsa, Fig. 1). La deriva litoral ha obstruido la desembocadura de un canal de marea que ha quedado expuesto, conformando actualmente una planicie supramareal inundada en condiciones de tormenta denominada Paso Seco. La inundación recurrente ha ocasionado la colonización del sedimento por matas microbianas en la zona de Paso Seco (Cuadrado *et al.*, 2015). Esta asociación de microorganismos es afectada por eventos erosivos de gran magnitud como consecuencia de las ondas de tormenta. Se generan, entre otras estructuras sedimentarias primarias, enrollamiento de matas similares a las que Noffke (2010) ha documentado como resultantes de fenómenos extremos de huracanes en Portsmouth (Estados Unidos). Mientras la colonización de los sedimentos requiere de un ambiente tranquilo con bajo nivel de sedimentación (Noffke, 2010), las estructuras sedimentarias microbianas de deformación se generan por efecto de fuertes corrientes de agua que ingresan a Paso Seco en forma encauzada (Maisano *et al.*, 2019). La determinación del nivel de energía en un ambiente moderno y su relación con la generación de estructuras sedimentarias es muy importante para poder referirlo al ambiente fósil y realizar una correcta reconstrucción paleoambiental.



Figura 1. Ubicación del área de estudio, entre la baliza La Ballena y Punta Rubia Falsa, al sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Fuente: Google Earth Pro, 2019.

Actualmente se desconoce la frecuencia e intensidad de los eventos extremos que generan ondas de tormenta y permiten el ingreso del agua de mar a Paso Seco a través de la espiga. La generación de los enrollamientos de matas microbianas se toma como indicador de la mayor erosión registrada en el área ya que es la estructura de deformación que necesita la mayor fuerza de corriente para formarse (Maisano, 2019). En esta investigación se estudian las ondas de tormenta asociadas a eventos extremos que superan la altura de la espiga y permiten el ingreso del agua de mar al canal. Se analizaron los sistemas sinópticos que originan las ondas de tormenta, la dirección y velocidad del viento, altura y período de las olas asociados a estos eventos y mareas de sicigia o cuadratura durante el período 2015-2018. Este análisis permitió contrarrestar la teoría que indica que la presencia de matas microbianas en los sedimentos representa un ambiente de escasa energía en el ambiente fósil, y por otro lado permitió identificar la frecuencia de ondas de tormentas que afectan la costa ya que en la reconstrucción paleoambiental éstas se consideran situaciones excepcionales (Breda y Preto, 2011).

1.2. Ondas de tormenta

Las ondas de tormenta (*storm surges*) pueden definirse como niveles anormalmente elevados del agua de mar causadas por una perturbación atmosférica de corta duración, como un huracán o tormenta (Gill, 1982; McIvor *et al.*, 2012). Esto significa que la onda de tormenta es la modificación de la altura de marea astronómica por efecto meteorológico (Servicio de Hidrografía Naval, 2019) (Fig. 2).

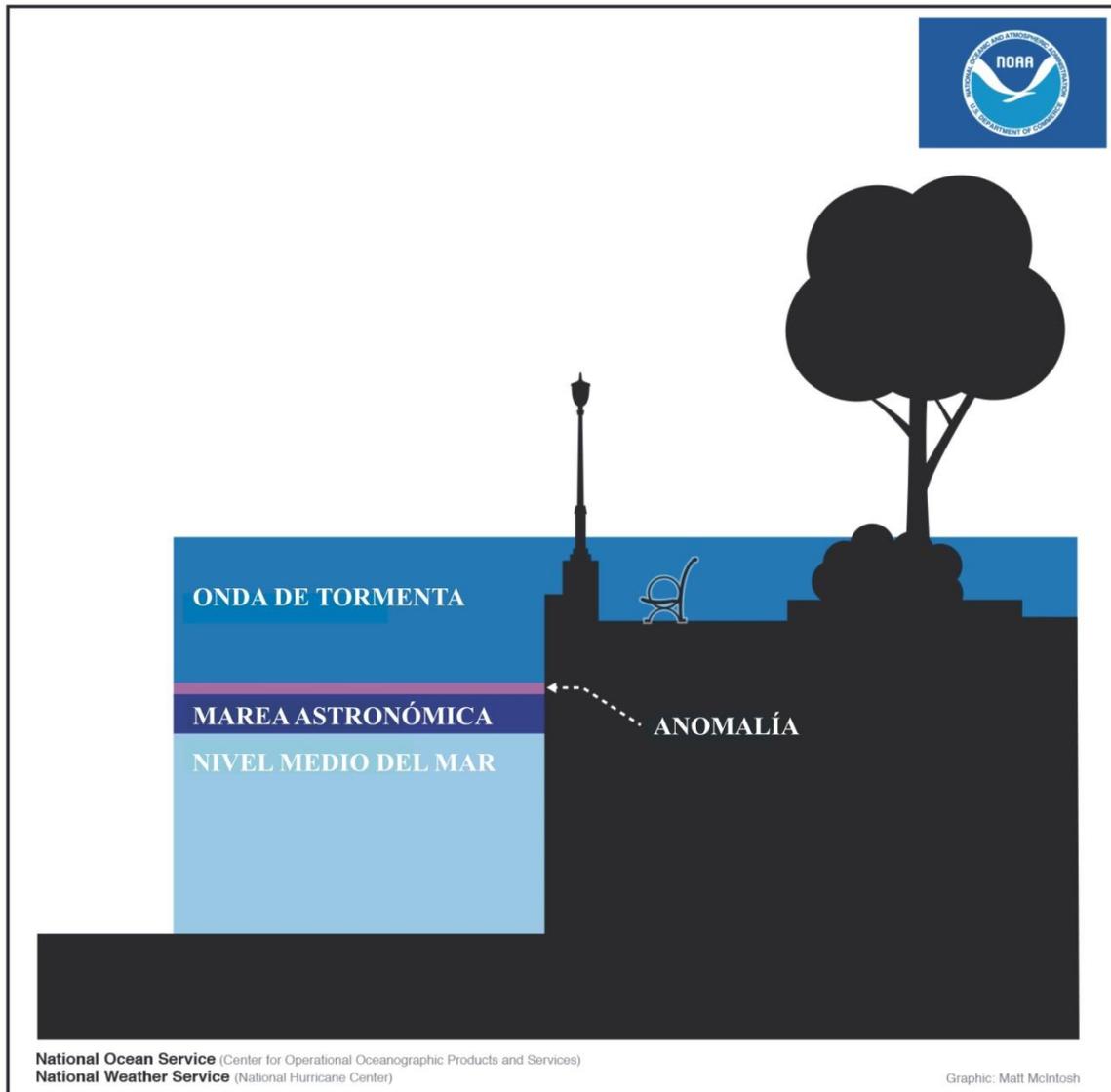


Figura 2. Definición de onda de tormenta. Fuente: modificado de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2018.

Las tormentas son sistemas de baja presión atmosférica, que elevan la superficie del mar (efecto de barómetro invertido) y fuertes vientos que originan olas muy altas, generando importantes *set-up* en la costa (Parise *et al.*, 2009; Talley *et al.*, 2011). Los

vientos fuertes son más importantes en la generación de las ondas de tormenta que la baja presión atmosférica que también las caracteriza (NOAA, 2018). Estas son originadas por dos tipos principales de tormentas: los ciclones tropicales (también llamados huracanes y tifones en diferentes regiones geográficas) y las tormentas extra-tropicales (aquellas que se producen en las latitudes medias) (Storch y Woth, 2008). Las diferentes características de estos tipos de tormenta se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Comparación de las características de las ondas de tormenta generadas por ciclones tropicales y por tormentas extra-tropicales. Fuente: modificado de McIvor *et al.*, 2012.

Parámetro	Ciclón Tropical	Tormenta Extra-tropical
Escala espacial de la tormenta	500 ±200 km	1000 ±500 km
Altura de la onda de tormenta	Mayor. Eventos extremos entre 5 a 12 m.	Menor. Eventos extremos entre 2 a 4 m.
Duración de la onda de tormenta	Varias horas, hasta medio día	2-5 días

Generalmente las ondas de tormenta en Argentina tienen una duración desde algunas horas hasta 2 o 3 días (Etala, 2000; D'Onofrio *et al.*, 2005). Numerosas ondas de tormenta pasan con rapidez sin ser advertidas, pero cuando coinciden con la máxima altura de marea de sicigia la erosión es extrema (Parise *et al.*, 2009; Talley *et al.*, 2011). La magnitud de la onda de tormenta depende de la fuerza de la tormenta, de la batimetría (pendiente del fondo) y de la geomorfología de la costa (Talley *et al.*, 2011; McIvor *et al.*, 2012). En la práctica, la onda de tormenta, también denominada marea meteorológica, está determinada por la diferencia de nivel entre la marea observada (real) y la marea astronómica (prevista) (Etala, 2000; Parise *et al.*, 2009).

El impacto de los eventos extremos de ondas de tormenta son catastróficos, amenazando las comunidades vulnerables y la infraestructura a escala mundial (McIvor *et al.*, 2012; Spencer *et al.*, 2015; Li y Nie, 2017). La evidencia científica indica que el cambio climático tiene el potencial de aumentar las inundaciones producidas por las ondas

de tormenta debido a la intensificación de éstas (extra-tropicales y ciclones tropicales) y al aumento del nivel del mar (Dasgupta *et al.*, 2009; Mousavi *et al.*, 2011). A medida que aumentan las tormentas, crearán condiciones de inundación más dañinas en las zonas costeras y áreas adyacentes bajas (Dasgupta *et al.*, 2009).

1.3. Área de estudio

La zona costera de Paso Seco se encuentra ubicada al sur de la provincia de Buenos Aires (40°38'31''S – 62°12'54''O), al norte de la Patagonia Argentina (Fig. 1). El área de estudio es un canal de marea inactivo que ha sido obstruido por una espiga de arena (Maisano *et al.*, 2019). En la formación de la espiga se pueden identificar dos etapas. La primera corresponde a una espiga inicial que se generó durante un descenso del nivel del mar, con lapsos de estabilidad temporal (Ambrosini, 1984; Fig. 3b). Trebino (1987) sostiene que dicha espiga inicial es resultado de fenómenos hidrodinámicos que produjeron acreción, registrándose localmente una regresión marina. La etapa siguiente comprende la formación de la espiga actual entre Punta Rubia Falsa y baliza La Ballena (Fig. 1), que repite las mismas condiciones que la espiga inicial, aunque no se evidencia un descenso del nivel del mar actual (Trebino, 1987).

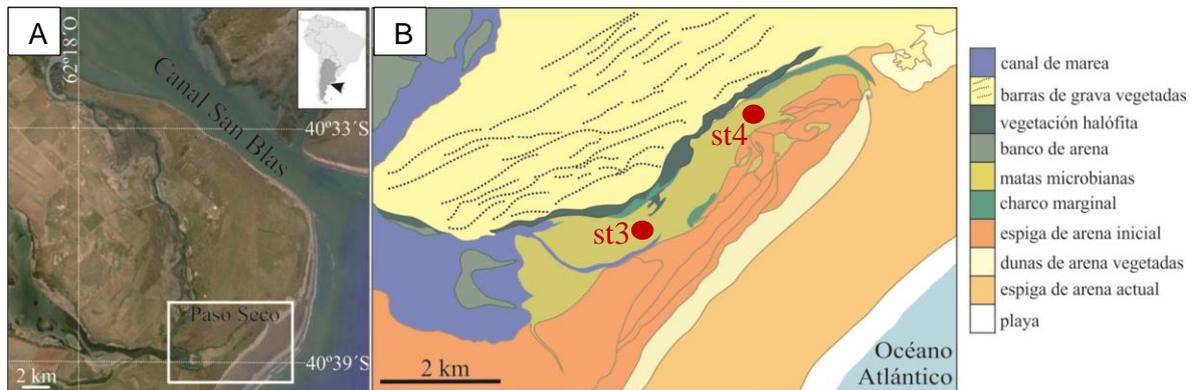


Figura 3. a) Área de estudio al sur de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. El rectángulo muestra la ubicación del mapa geomorfológico b) mapa geomorfológico en el cual se observa la planicie costera separada del mar por una espiga de arena y conectada a un canal de marea al E de la misma. Sobre la planicie costera están ubicadas las estaciones (st3 y st4) donde se encuentran los sensores HOBO-ONSET, que miden el nivel de agua. Fuente: modificado de Cuadrado *et al.* (2015).

Climáticamente, el área de estudio está localizada en la subdivisión llamada “semiárido templado de la Meseta” según la clasificación climática de Argentina propuesta por Iglesias (1981). Este clima se distingue por una precipitación anual promedio < 300

mm y donde la evaporación potencial normalmente supera la precipitación (Ferrelli *et al.*, 2012). Las diferencias entre el verano y el invierno son relativamente moderadas debido a la proximidad del Océano Atlántico SO (Cuadrado *et al.*, 2015). La temperatura del agua presenta una variación anual media en superficie de 12,2 °C, observándose los mínimos medios mensuales en junio/julio/agosto y los máximos en diciembre/enero/febrero (Alvarez y Ríos, 1988).

Según el Servicio de Hidrografía Naval (2019) la zona de Bahía San Blas presenta un régimen de marea mixto preponderantemente semidiurno, con una amplitud media de 1,68 m y una amplitud máxima de 2,48 m. Este ambiente correspondería a la frontera del régimen micromareal con mesomareal (Hayes, 1979). Los vientos fuertes predominantes del cuadrante NE, con un promedio de 35-38 km/h con ráfagas frecuentes de hasta 100 km/h (Beigt *et al.*, 2011), modifican las alturas y horarios de las mareas (Beigt *et al.*, 2009).

Morfológicamente Paso Seco presenta una forma elongada con una orientación SO-NE (226°), que comprende una superficie extendida de 3,5 x 0,4 km colonizada por matas microbianas, que es inundada eventualmente alcanzando una columna de agua de 90 cm como máximo. En algunas ocasiones, el ingreso del agua de mar se desarrolla con fuertes corrientes que producen una severa erosión en la superficie sedimentaria colonizada. Como resultado se forman estructuras sedimentarias de gran envergadura como los enrollamientos de mata de 25 cm de alto, formados por desgarros que alcanzan los 2 m de longitud (Maisano *et al.*, 2019).

1.4. Antecedentes

Son numerosos los estudios de las ondas de tormenta en las costas mundiales y argentinas (Perillo y Piccolo, 1991; Etala, 2000; Escobar *et al.*, 2004; D'Onofrio *et al.*, 2005; Re y Menéndez, 2006;). La mayoría de los mismos se focalizan en la generación y utilización de modelos para simular y predecir estos eventos (Flather, 1994; Westerink *et al.*, 2008; Bunya *et al.*, 2010; Deb y Ferreira, 2016; Fairley *et al.*, 2016; Xie *et al.*, 2016; Li y Nie, 2017; Wu *et al.*, 2017), y en la relación de los huracanes (tifones, ciclones) con los eventos extremos de ondas de tormenta y su impacto en la zona costera (Irish *et al.*, 2008; Lin *et al.*, 2010; Dietrich *et al.*, 2011; Hope *et al.*, 2013; Mori *et al.*, 2014; Mori y Takemi, 2016). Por otro lado, algunas investigaciones relativamente recientes, se enfocan

en el cambio climático y su potencial efecto en las ondas de tormenta (Debernard *et al.*, 2002; Dasgupta *et al.*, 2009; Sterl *et al.*, 2009; Hallegatte *et al.*, 2011; Mousavi *et al.*, 2011).

Recientemente, Deb y Ferreira (2016) realizaron un análisis detallado de la generación de ondas de tormenta en Bangladesh y los sistemas ciclónicos que las generan utilizando modelos numéricos. Cabe destacar que actualmente se está relacionando la ocurrencia de ondas de tormenta con procesos morfológicos y ecológicos. Parise *et al.* (2009) analizaron los eventos extremos de ondas de tormenta en el Sur de Brasil producidos por ciclones extra-tropicales y tormentas asociadas a sistemas de frentes, relacionando las condiciones atmosféricas que dieron lugar a su formación con la erosión costera ocasionada. McIvor *et al.* (2012) exploraron la capacidad de los manglares para reducir las inundaciones producidas por las ondas de tormenta, y por lo tanto para atenuar el impacto de las mismas en las poblaciones costeras e infraestructura. Análogamente en Argentina, Escobar *et al.* (2004) tipificaron las sudestadas a partir de sus efectos en el nivel del Río de la Plata y presentaron un análisis estadístico de las variables que caracterizan este evento meteorológico.

Millward *et al.* (2018) estudiaron la importancia de la ocurrencia de las ondas de tormenta en los registros fósiles. Sin embargo, la expresión de los eventos de tormenta en el registro geológico no está muy bien comprendida (Swindles *et al.*, 2018) y en los últimos años mucha de la investigación se ha enfocado en este tema. En tal sentido, Swindles *et al.* (2018) analizaron una zona costera del Mar del Norte y determinaron la respuesta de una marisma a los eventos de ondas de tormenta desde el año 1953 al presente.

Los estudios realizados en la espiga de arena de la zona costera de Paso Seco son escasos. Según Espinosa e Isla (2011), la espiga de arena formada en la boca (Fig. 3b) habría obturado definitivamente la conexión del canal de marea con el mar hace más de 100 años. No obstante, se poseen registros continuos del nivel del agua de los últimos cinco años del sector expuesto detrás de la espiga, donde se han verificado inundaciones frecuentes (más de 3 o 4 en algunos meses). Paso Seco actúa como una planicie de marea supramareal que experimenta inundaciones irregulares que superan la barrera topográfica que forma la espiga costera.

Los ambientes que se encuentran por detrás de las geoformas acumulativas como las espigas están protegidos de la acción de olas y estas planicies de marea pueden presentar gran complejidad biológica (Kokot, 2010). La baja energía, en adición a la frecuente inundación y exposición aérea con radiación solar, ofrece las necesidades básicas que requieren los microorganismos para colonizar los sedimentos y generar espesas matas microbianas. En el antiguo canal de marea de Paso Seco se descubrieron grandes extensiones de matas microbianas que ocupan alrededor de 1 km² y donde se han identificado varias estructuras sedimentarias microbianas de deformación (Cuadrado *et al.*, 2015). No es frecuente la formación de estas estructuras sedimentarias, ni tampoco la colonización de una superficie tan extensa por matas microbianas. En este sentido, Paso Seco constituye un laboratorio natural para el estudio de los procesos que generan estas estructuras.

En el SE de Túnez, Bouougri y Porada (2012) documentaron estructuras de deformación similares, aunque de menor magnitud, a las observadas en Paso Seco. No obstante, los autores indican como factor predominante a la energía del viento. La costa SE del Mar Mediterráneo se caracteriza por la formación de sabkhas costeros protegidos por espigas holocenas actuales que son inundados en determinadas condiciones hidrometeorológicas durante el verano. En esa estación del año, los vientos hacia la costa propagan la marea hacia los sectores supramareales durante varios días.

1.5. Hipótesis de trabajo

Las ondas de tormenta son las responsables de las inundaciones del agua de mar en Paso Seco, superando la espiga de arena costera.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

El objetivo general de la investigación es estudiar la frecuencia e intensidad de las ondas de tormenta asociadas a eventos extremos que se observaron en Paso Seco en el período 2015-2018. Se pretende además comparar diferentes modelos numéricos de olas y del tiempo atmosférico para ser potencialmente utilizados en aquellas zonas en las cuales no se dispone de mediciones oceanográficas.

1.6.2. Objetivos específicos

Para cumplir el objetivo de la investigación se llevaron a cabo los siguientes objetivos específicos.

- 1) Determinación de la frecuencia de inundaciones anuales que se observaron en el período de estudio utilizando sensores del nivel de agua instalados en la zona del canal. Comparación de los datos de las dos estaciones de medición del nivel del agua localizadas a diferentes distancias del mar.
- 2) Análisis de las mareas, olas y pasaje de los sistemas sinópticos del tiempo atmosférico en todas las situaciones que se observaron inundaciones en Paso Seco.
- 3) Determinación de las variaciones estacionales de las ondas de tormenta, su frecuencia e intensidad y sistemas sinópticos que la generan.
- 4) Comparación de modelos numéricos de olas y del tiempo atmosférico para futuras aplicaciones en sitios sin estaciones de monitoreo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron datos de sensores de nivel de agua (HOBO-ONSET modelo U20, de 2,5 cm de diámetro y 15 cm de longitud) en dos estaciones ubicadas en la zona de Paso Seco a diferentes distancias del mar: la más cercana al mar (st4) a 1,5 km y la más lejana (st3) a 2,5 km (Fig. 3b). Estos sensores están dispuestos a 40 cm de profundidad desde la planicie, dentro de tubos de PVC ranurados para permitir el ingreso del agua (Fig. 4). Los sensores miden el nivel y la temperatura del agua y la presión cada 10 minutos. Los datos del nivel del agua fueron corregidos por un tercer sensor ubicado en la zona alta del área de estudio (la cual no sufre inundaciones) que mide la presión atmosférica. El período de estudio fue desde marzo 2015 a junio 2018, por lo que se analizaron 40 meses de datos. Cabe destacar que el período de medición comenzó en marzo y mayo de 2015 para st3 y st4 respectivamente, y culminó en julio 2018, por lo tanto el total de los meses que coinciden en ambas estaciones son 31 (8 en 2015, 19 en 2016-2017 y 4 en 2018) debido a la falta de datos en st4. Por otro lado, en el único período de verano en que se poseen mediciones en ambas estaciones es el período 2016-2017 por fallas en el sensor.



Figura 4. Sensor de nivel del agua HOBO-ONSET, modelo U20 y tubo de PVC ranurado donde se coloca el mismo.

En el procesamiento de los datos se utilizó el programa HOBOWare para visualizar y analizar los registros del ingreso del agua en la planicie y temperatura del agua. Utilizando dichos registros se identificaron los días y la altura de inundación en ambas estaciones (st3 y st4). Se eligieron las inundaciones que superaron los 10 cm altura de la columna de agua sobre la planicie.

Uno de los temas importantes fue determinar el estado de la marea (sicigia o cuadratura) en los días de inundación. Para esto se graficaron las mareas astronómicas de San Blas obtenidas del Servicio de Hidrografía Naval (SHN) de manera mensual, y observando la serie se definió la marea correspondiente (Fig. 1; Anexo I).

En primer lugar se identificaron los días de inundación (de nivel de agua mayor-igual a 10 cm) que coinciden en las dos estaciones (st3 y st4) y se examinaron las situaciones de tiempo atmosférico correspondientes a los mismos días reconociendo las ondas de tormenta en la zona de estudio. Esto se realizó mediante el análisis de los mapas sinópticos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), del sitio Intellicast

(<http://www.intellicast.com/Global/Surface.aspx?location=ARRN0080>) y del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, <http://tempo.cptec.inpe.br/>). Estos datos se correlacionaron con los de velocidad y dirección de viento obtenidos del modelo Global Forecast System (GFS) del WindGuru Pro.

Para la caracterización de la intensidad de las diferentes ondas de tormenta que se generaron en el período de estudio se utilizó la información de olas (altura significativa, período y dirección) mediante la utilización de diferentes modelos numéricos. Estos fueron: NWW3 (NOAA wave watch III) obtenido del servicio de WindGuru Pro y el modelo de Olas AUSTRAL WAVEWATCHIII (Austral-WWIII), según la implementación realizada por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para el Océano Atlántico Sur del modelo de olas de tercera generación WAVEWATCH III ® 3.14 (Tolman, 2009), desarrollado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y por el National Center for Environmental Prediction (NCEP). Cabe aclarar que estos modelos son de mar abierto, pero se consideran como aproximación de los datos costeros al carecer de estaciones oceanográficas costeras.

Las condiciones oceanográficas (modelo NWW3 (NOAA wave watch III)) y meteorológicas (Global Forecast System (GFS)) de los días de inundación obtenidas del WindGuru Pro se organizaron en tablas comparativas de las dos estaciones (st3 y st4) (Tablas 1 a 4; Anexo I). Para el análisis se utilizaron técnicas estadísticas standard con los diferentes parámetros. Para realizar las figuras se utilizó el programa CoreIDRW y Excel.

3. RESULTADOS

3.1. Análisis de los registros de nivel y temperatura de agua.

Se estudió un registro de más de 3 años de datos, desde marzo del 2015 a junio del 2018 (Fig. 5) correspondiente a la estación más alejada del mar (st3). Se observa la variación del nivel del agua, por encima (inundación/elevación) y por debajo (profundidad) de la planicie (línea roja). A su vez, la variación de la temperatura del agua permite identificar las estaciones del año.

En invierno (junio-septiembre) se observa que el agua se mantiene varios días (o meses) por encima o muy cerca de la planicie. Adicionalmente se identifican varias inundaciones de alta energía, con un máximo de 70 cm en junio de 2018. En contraste, en verano (diciembre-marzo) se observa que el agua está varios días por debajo de la planicie,

alcanzando un máximo de 50 cm de profundidad, dejándola expuesta a la radiación solar durante varios días.

Las inundaciones se registraron durante todo el año. En el período de verano de 2016 se observaron varias inundaciones donde la columna de agua superó los 50 cm en marzo de 2015, mientras que en junio de 2018, como se mencionó anteriormente, la columna de agua alcanzó los 70 cm (Fig. 5).

La temperatura del agua tiene una tendencia estacional, similar a la temperatura del aire, donde los valores en verano superan los 25 °C, con una máxima de 29 °C en enero 2018; en cambio en invierno se mantiene aproximadamente en los 10 °C, alcanzando un mínimo de 5°C en junio 2018. En verano se observa mayor variabilidad en la temperatura del agua, mientras que en invierno permanece casi constante.

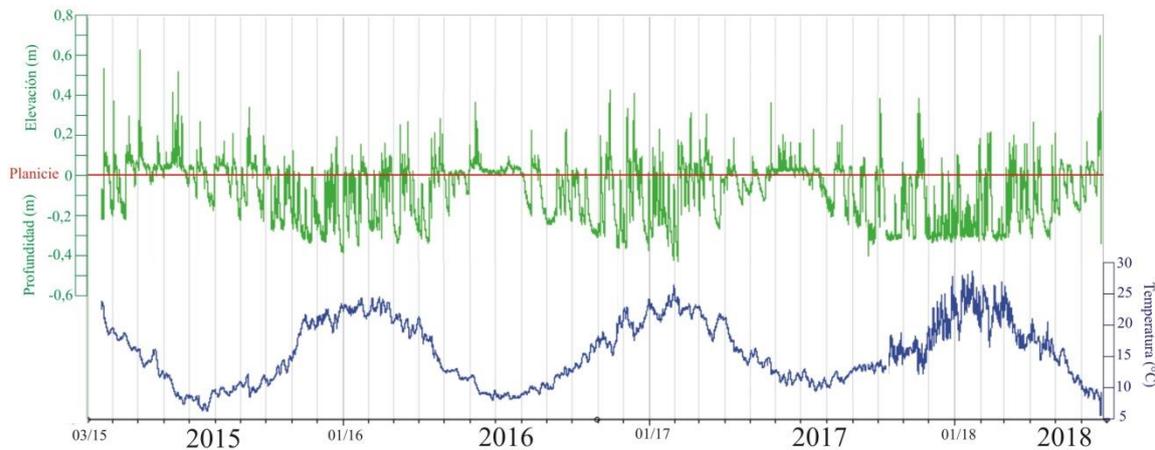


Figura 5. Variación del nivel del agua (serie verde) con respecto a la planicie (línea roja) y variación de la temperatura del agua (serie azul) en la estación más alejada del mar (st3) en un período de 40 meses de datos (marzo 2015 a julio 2018).

El registro de la st4, estación más cercana al mar, es discontinuo en dos períodos estivales a lo largo de todo el período de estudio. Específicamente se carece de la información estival correspondiente a 2015-2016 (desde el 11 de diciembre 2015 hasta el 23 de marzo 2016) y del verano 2017-2018 (desde el 9 de octubre 2017 hasta el 5 de marzo 2018). En la Figura 6 se muestra la variación del nivel del agua, por encima (inundación/elevación) y por debajo (profundidad) de la planicie (línea roja) y a su vez la variación de la temperatura del agua.

De manera similar a st3, en invierno (junio-septiembre) el agua se mantiene varios días (o meses) por encima o muy cerca de la planicie y se registraron varias inundaciones de alta energía, con un máximo de 90 cm en junio de 2018. En contraste, en verano

(diciembre-marzo) se observa que el agua puede estar varios días por debajo de la planicie, superando los 50 cm de profundidad. En este período se registraron 3 inundaciones, el 4 y 8 de febrero de 2017 (20 y 10 cm), y el 10 de marzo de 2017 (15 cm) (Tabla 3; Anexo I).

La temperatura del agua tiene una tendencia estacional similar a la estación interna. En verano supera los 25 °C, con una máxima de 27°C en enero de 2017; y en invierno se mantiene aproximadamente en los 10°C, alcanzando un mínimo de 3°C en julio de 2015.

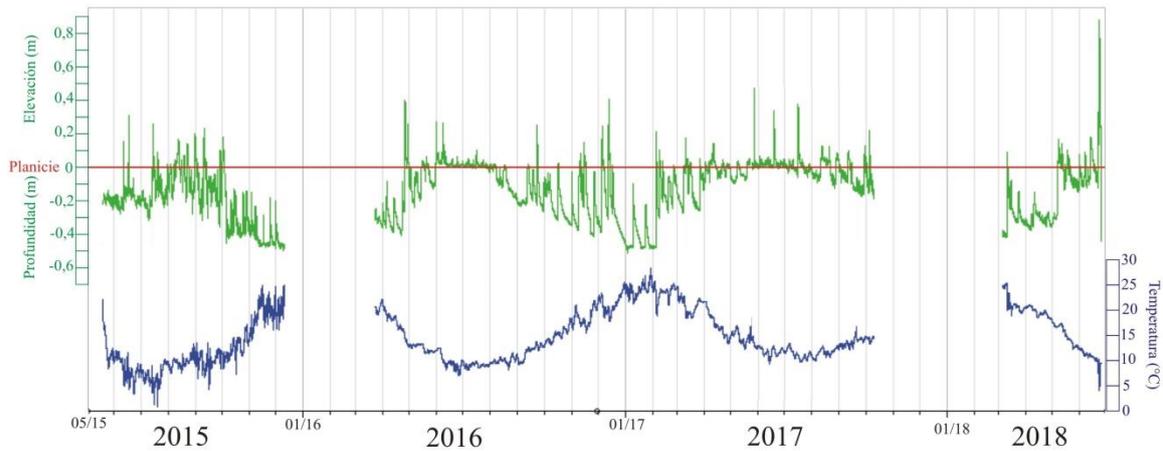


Figura 6. Variación del nivel del agua (serie verde) con respecto a la planicie (línea roja) y variación de la temperatura del agua (serie azul) en la estación más cercana al mar (st4) en un período de 31 meses de datos (Mayo 2015 a Julio 2018).

3.2. Estadísticas del análisis de los registros de nivel de agua.

Las inundaciones que coinciden en ambas estaciones, (st3) y (st4), son las representativas de los eventos de ondas de tormenta, dado que presentan la energía suficiente para inundar ambas estaciones. Teniendo en cuenta estas consideraciones, se puede apreciar en la Fig. 7 la cantidad de inundaciones anuales en las cuales coinciden ambas estaciones, con un total de 36 eventos de ingreso de agua a Paso Seco a lo largo del período de estudio. Se observa que la mayor cantidad de inundaciones ocurrieron en el año 2016 con 13 eventos, mientras que en el año 2018 se registra el mínimo con 6 eventos (sólo 4 meses de mediciones). Los años 2015 y 2017 presentan valores medios con 7 y 10 inundaciones, respectivamente. Analizando el estado de marea de sicigia o cuadratura, se identificó que de los 36 eventos de inundación en ambas estaciones a lo largo del período de investigación, 28 ocurrieron en marea de sicigia (78 %) y 8 en marea de cuadratura (22 %) (Fig. 8 y 9).

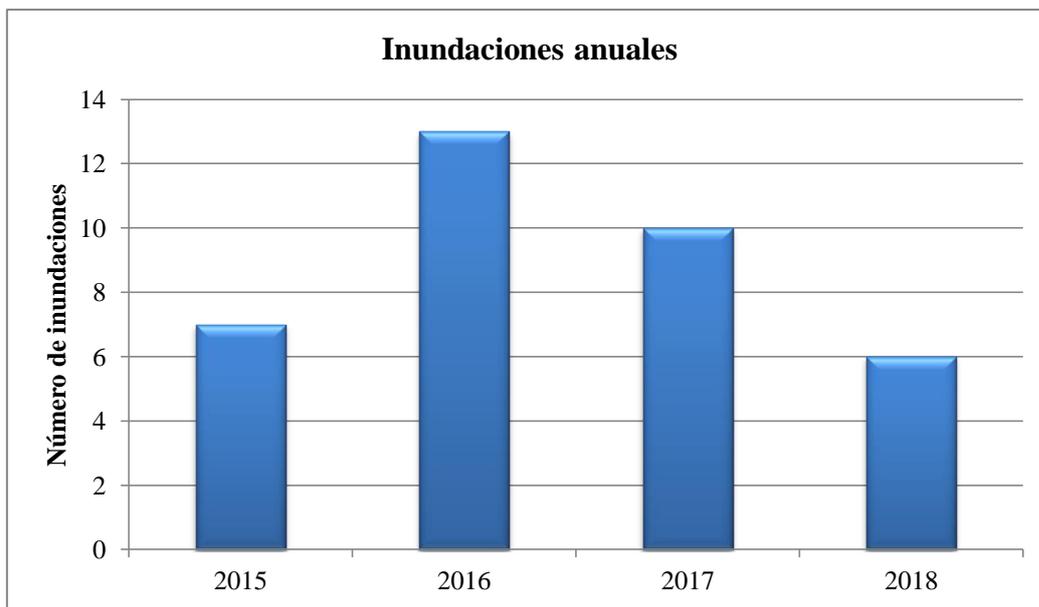


Figura 7. Inundaciones anuales en las cuales coincide simultáneamente lo registrado en las estaciones st3 y st4 en el período de estudio. Los datos se presentan en la Tabla 5 del Anexo I.

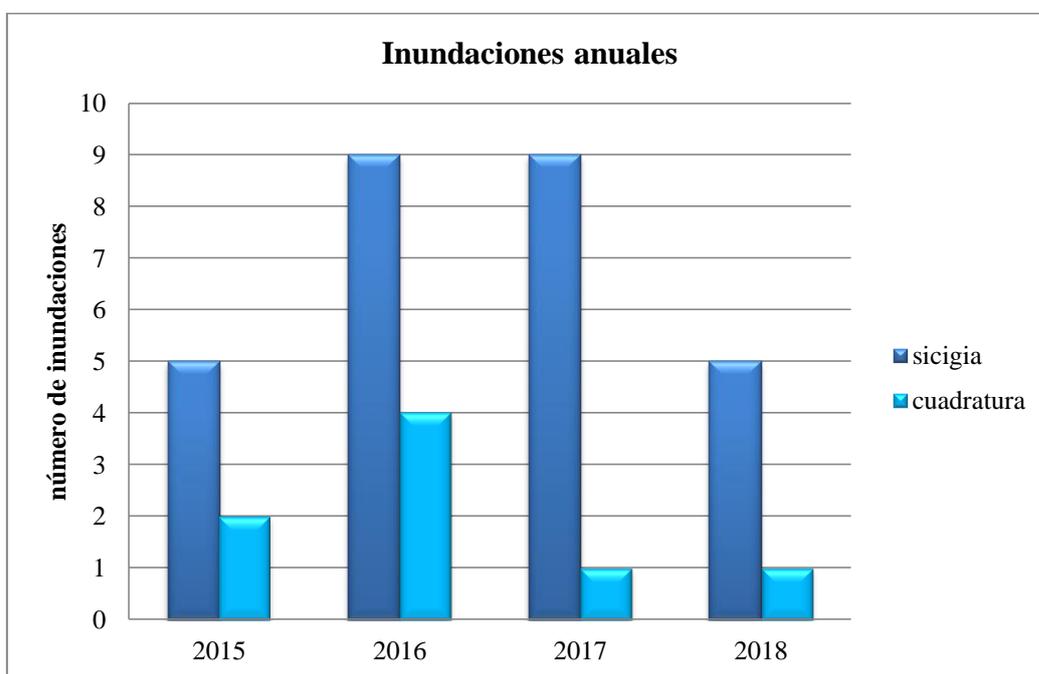


Figura 8. Inundaciones anuales en las cuales coinciden simultáneamente lo registrado en las estaciones st3 y st4, diferenciadas por marea de sicigia o marea de cuadratura a lo largo del período de estudio. Los datos se presentan en la Tabla 5 del Anexo I.



Figura 9. Porcentaje de inundaciones en marea de sicigia y marea de cuadratura a lo largo del período de estudio. Los datos se presentan en la Tabla 5 del Anexo I.

La dirección de viento predominante en el total de los 36 eventos de inundación que coincidieron en ambas estaciones (st3 y st4) es del SO (Fig. 10). Esta dirección preponderante corresponde al 72% de las inundaciones, mientras que el 28% restante es asociado a otras direcciones de viento (Fig. 11). De este restante se observa que un 14% corresponde a direcciones con componente S (8% dirección SE y 6% dirección S) y luego un 8% con dirección O y un 6% con dirección NO (Fig. 11).

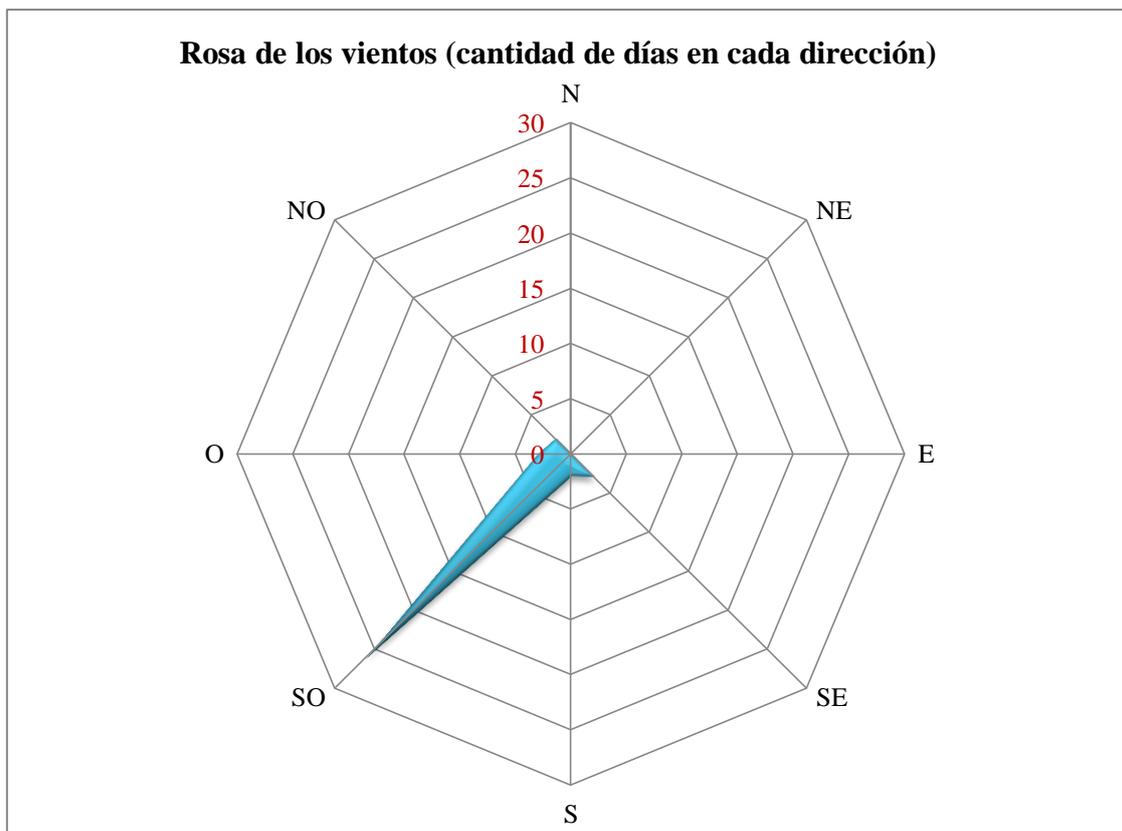


Figura 10. Rosa de los vientos con la cantidad de días de viento en cada dirección en el total de inundaciones que coinciden en ambas estaciones. Los datos se presentan en la Tabla 6 del Anexo I.



Figura 11. Porcentaje de días en cada dirección del viento en el total de las inundaciones que coinciden en ambas estaciones. Los datos se presentan en la Tabla 6 del Anexo I.

Por otro lado, de todas las direcciones de viento que ocasionaron las inundaciones, la velocidad media promedio supera los 30 km/h (Fig. 12). En el caso del viento SO, la velocidad media promedio es mayor a los 40 km/h, al igual que para las direcciones S y O; mientras que para la dirección SE la velocidad media promedio supera los 50 km/h. La dirección NO por su parte presenta una media de 35 km/h (Fig. 12).

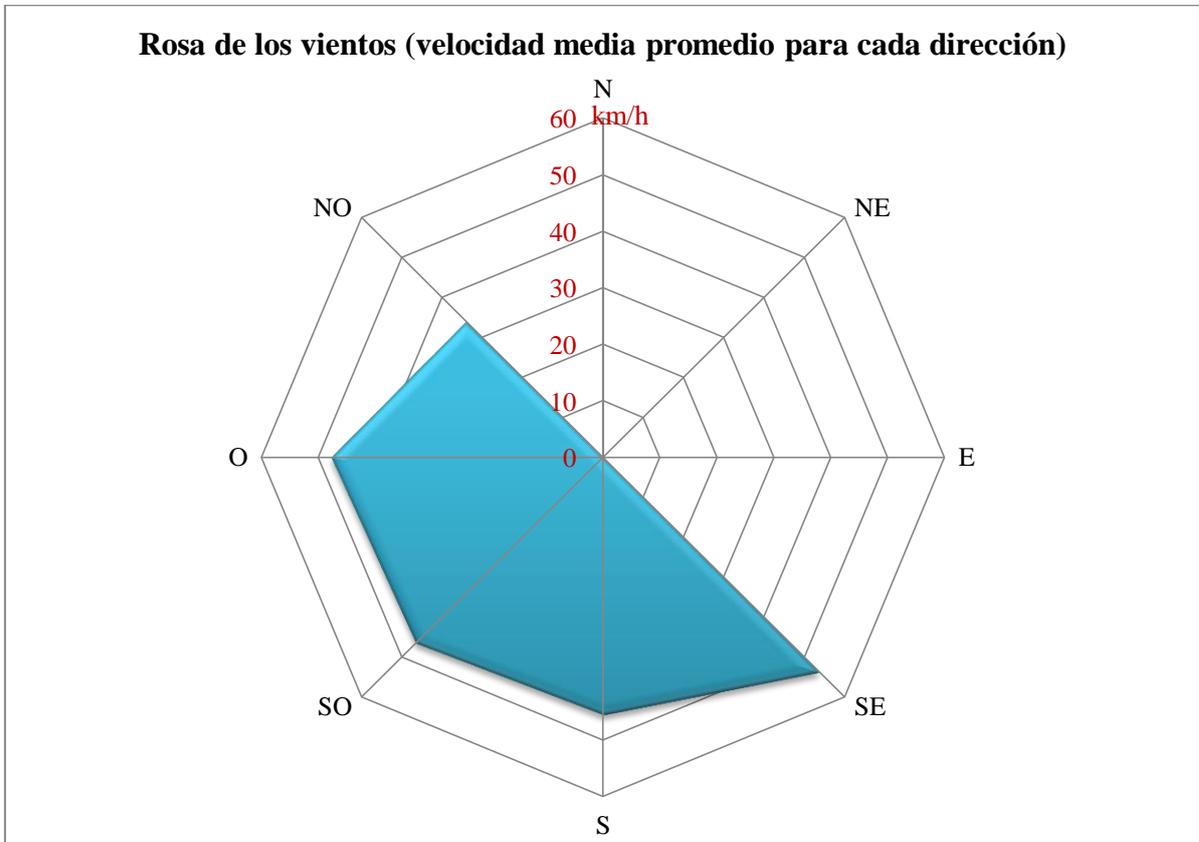


Figura 12. Rosa de los vientos con la velocidad media promedio (km/h) para cada dirección de viento en el total de inundaciones que coinciden en ambas estaciones. Los datos se presentan en la Tabla 6 del Anexo I.

Por otra parte, la dirección de las olas en los eventos de inundación presenta una tendencia del cuadrante de dirección S (Fig. 13), con un 86% del total (Fig. 14), principalmente SO y S (33 y 31% respectivamente; Fig. 14). Mientras que el 14 % remanente corresponde a otras direcciones de olas (6 % dirección O, 5 % dirección NE y 3 % dirección NO). En los 36 eventos de inundación, la altura promedio de ola fue de 3,1 m y el período medio fue de 9,3 s (Tabla 8; Anexo I).

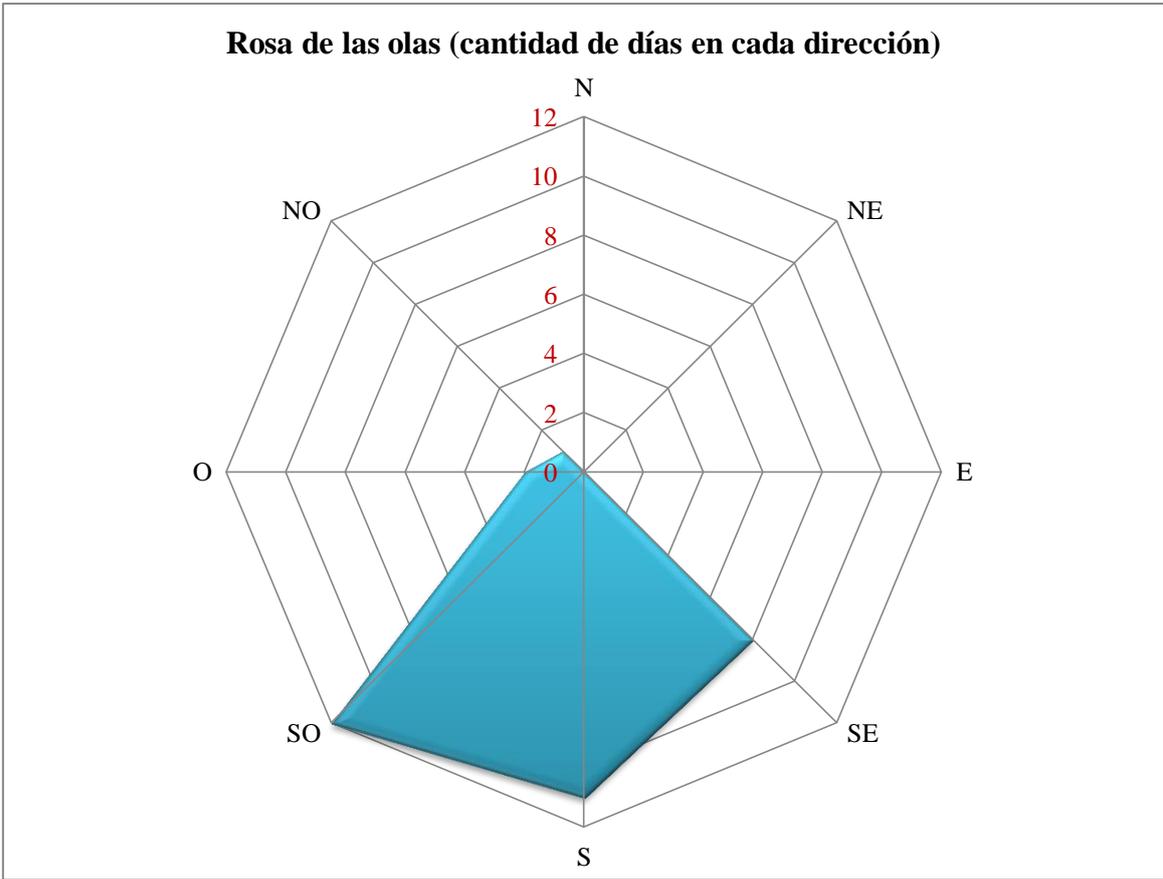


Figura 13. Rosa de las olas con el número de días en cada dirección en el total de inundaciones. Los datos se presentan en la Tabla 7 del Anexo I.

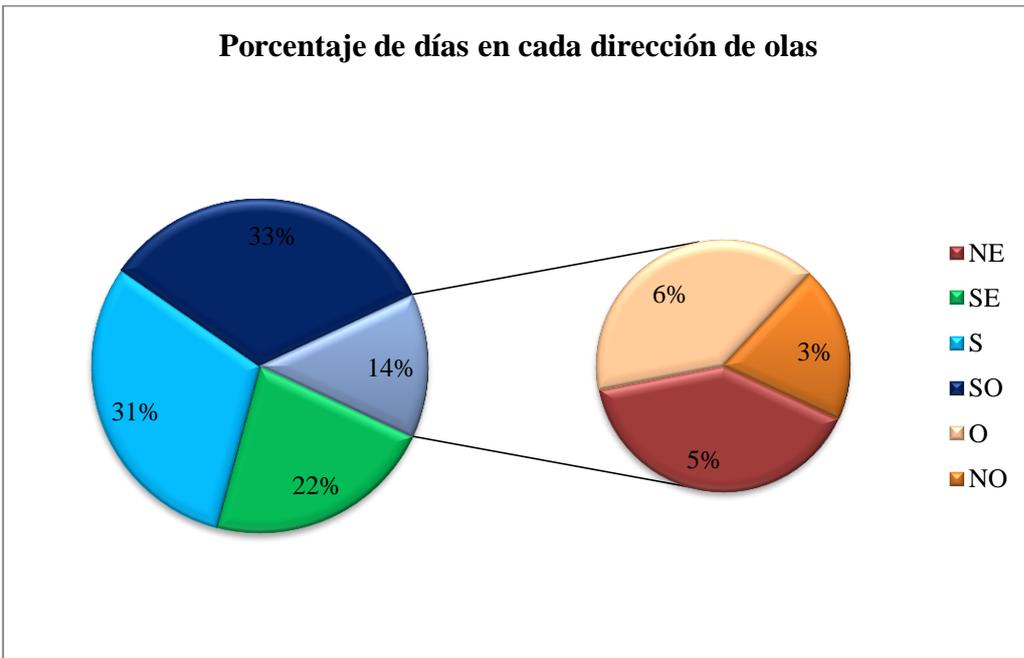


Figura 14. Porcentaje de días de la dirección de las olas en el total de las inundaciones. Los datos se presentan en la Tabla 7 del Anexo I.

3.3. Análisis de ondas de tormenta seleccionadas.

En general todas las inundaciones que se registraron en Paso Seco responden a un evento de onda de tormenta que afectó la zona costera. Se seleccionaron 4 ejemplos que representan la variedad de situaciones que se reconocieron en el análisis de los datos de la estación más cercana al mar (st4). Se las ordenó por inundación decreciente: el evento 1 representa la máxima inundación que sucedió con viento SO y con marea de sicigia; el evento 2 representa una inundación menor con viento predominante del SE y marea de sicigia; el evento 3 sucedió con viento SO y marea de cuadratura; y el evento 4 expone una inundación estival.

3.3.1. Evento 1: 23 de junio de 2018

La inundación del 23 de junio de 2018 fue ocasionada por el desplazamiento de un frente frío asociado a un centro de baja presión en el Océano Atlántico con dirección SO-NE (Fig. 15). El mismo estuvo caracterizado por fuertes vientos de dirección SO que alcanzaron una máxima velocidad media de 47 km/h y una altura significativa de ola asociada de 4,1 m con 11 s de período con dirección SO. Es importante destacar que durante estos días el estado de marea corresponde a sicigia, por lo tanto actuó como un componente adicional a la sobreelevación del nivel del mar (Tabla 4; Anexo I).

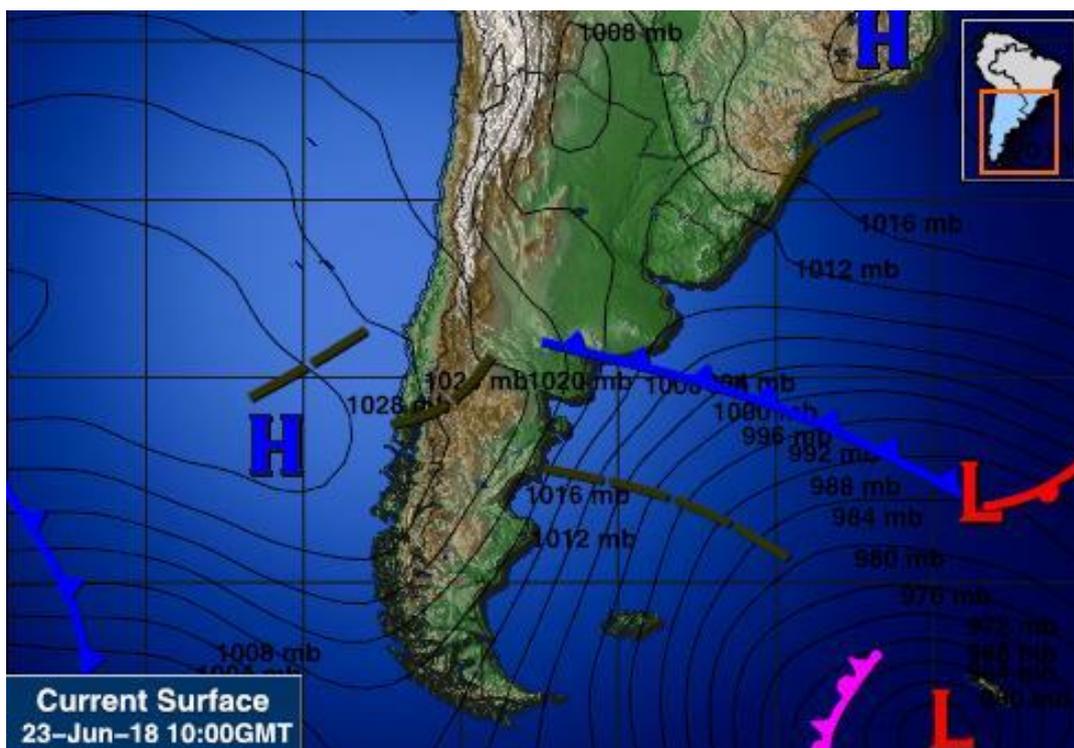


Figura 15. Mapa sinóptico del 23 de junio de 2018. Fuente: <http://www.intellicast.com/Global/>.

Esta situación meteorológica provocó una inundación de 70 cm en st3 y 90 cm en st4 (Tabla 4; Anexo I), la máxima observada en todo el período de estudio. En la Figura 16 se muestra el nivel del agua sobre la planicie (Fig. 16a), la altura de olas (Fig. 16b), la velocidad media y dirección promedio del viento en st4 (Fig. 16c). Cabe destacar que el dato medido *in situ* es el de la inundación de la planicie y que la intensidad del viento y la altura de olas se obtuvieron de datos modelados en la plataforma continental interna, por lo que en la zona de estudio, podrían ser valores menores.

La máxima velocidad media de viento se observa el día 21 de junio y tiene una magnitud de 50 km/h también con dirección SO, lo que produjo la primera inundación de 35 cm de altura. El agua se mantiene en la planicie a pesar de que la intensidad del viento disminuyó y luego rotó hacia el O. Al cambiar nuevamente la dirección del viento a la dirección SO, la velocidad aumentó a 47 km/h (día 23, Fig. 16) y se produjo la mayor inundación de 90 cm sobre la planicie saturada en agua. Esto significa que la duración del evento es un factor importante, ya que luego de la primera inundación, si el viento continúa o aumenta puede mantener el agua por encima de la planicie o producir una inundación aún mayor. Las condiciones meteorológicas del día 23 de junio además hicieron mantener la columna de agua durante 6 hs a 80 cm de altura. La inundación de la planicie sucedió con vientos mayores a 45 km/h del SO que generaron olas de más de 3 m de altura.

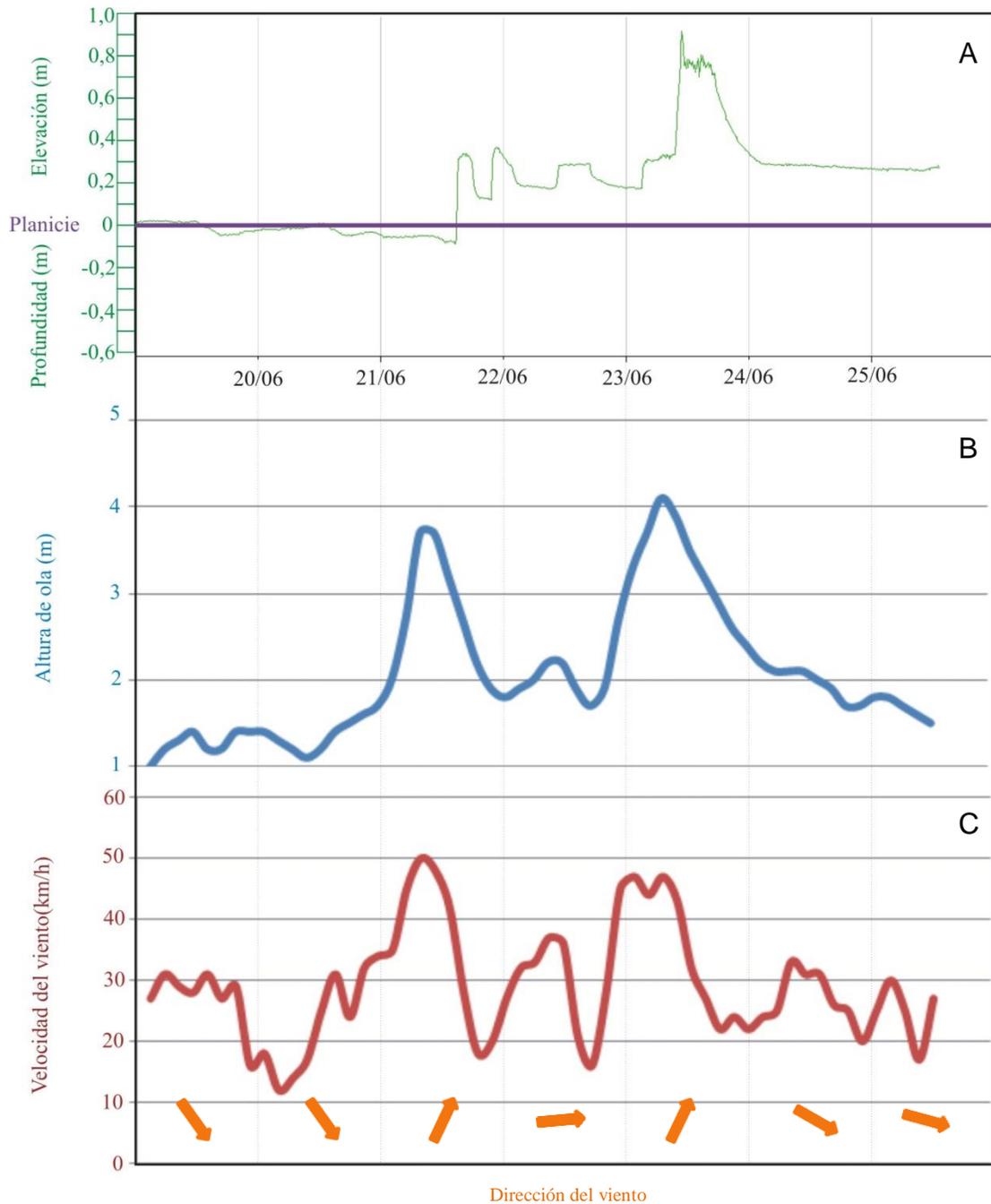


Figura 16. Parámetros que explican la inundación registrada desde el 19 de junio al 26 de junio de 2018. Altura del nivel del agua en la planicie en st4 (A), alturas de ola (B), velocidad y dirección media del viento (C). Los datos se presentan en las Tablas 9 y 10 del Anexo I.

3.3.2. Evento 2: 15 de julio de 2017

La inundación, ocurrida el 15 de julio de 2017, fue ocasionada por el desplazamiento de un frente frío asociado a un centro de baja presión en el Océano Atlántico con dirección SO-NE, muy cercano a la zona de estudio (Fig. 17). Este generó fuertes vientos con dirección SE que alcanzaron una máxima de 56 km/h de velocidad

media y una altura significativa de ola asociada de 3,4 m con 8 s de período y dirección SE. Se tiene que considerar que la marea correspondiente al período de los días anteriores y posteriores a la inundación corresponde a marea de sicigia (Tabla 3; Anexo I).

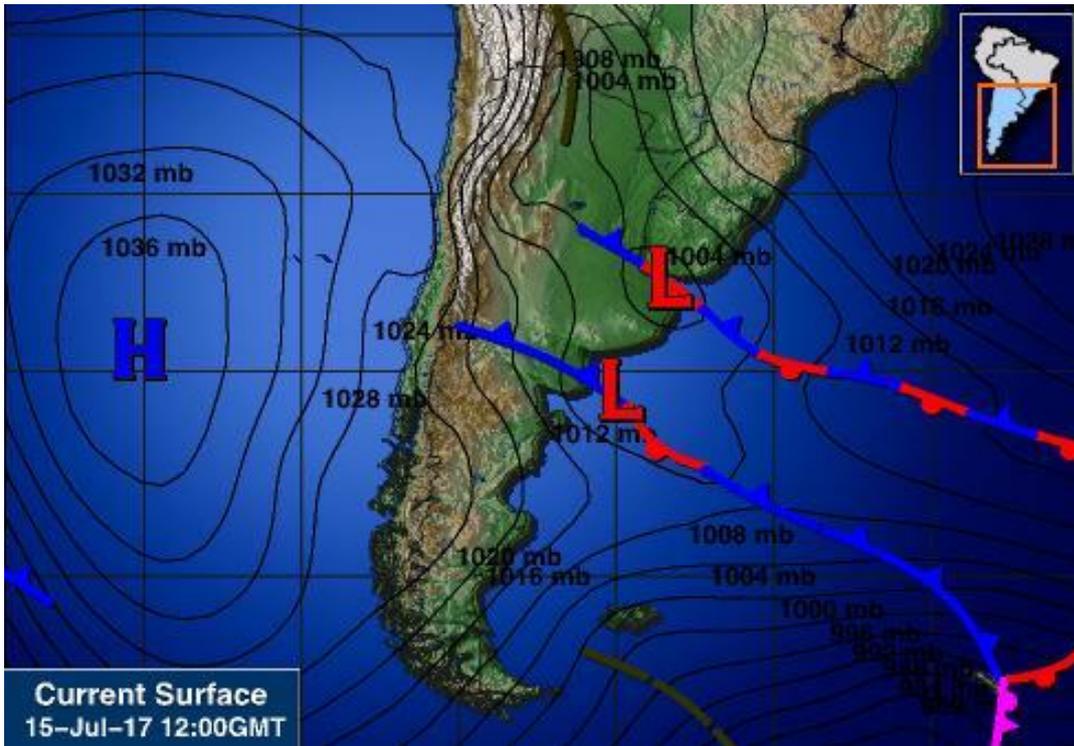


Figura 17. Mapa sinóptico del 15 de julio de 2017. Fuente: Intellicast (<http://www.intellicast.com/Global/Surface.aspx?location=ARRN0080>).

La inundación registrada a causa de esta tormenta fue de 35 cm. En la Figura 18 se muestra la relación entre la altura de la inundación (Fig. 18a) y la altura de la ola (> 3 m; Fig. 18b), la velocidad media del viento (> 50 km/h) y dirección promedio (SE-SO) (Fig. 18c) en la estación st4. En esta oportunidad se observa que los días anteriores a la inundación, la dirección del viento es del NO, de intensidad < 40 km/h y que al rotar al SE y aumentar la velocidad se produce la inundación. El comienzo del evento de inundación coincide con la máxima velocidad del viento que genera la máxima altura de ola y luego al disminuir la intensidad del viento y consecuentemente la altura de las olas, disminuye la altura del agua en la planicie.

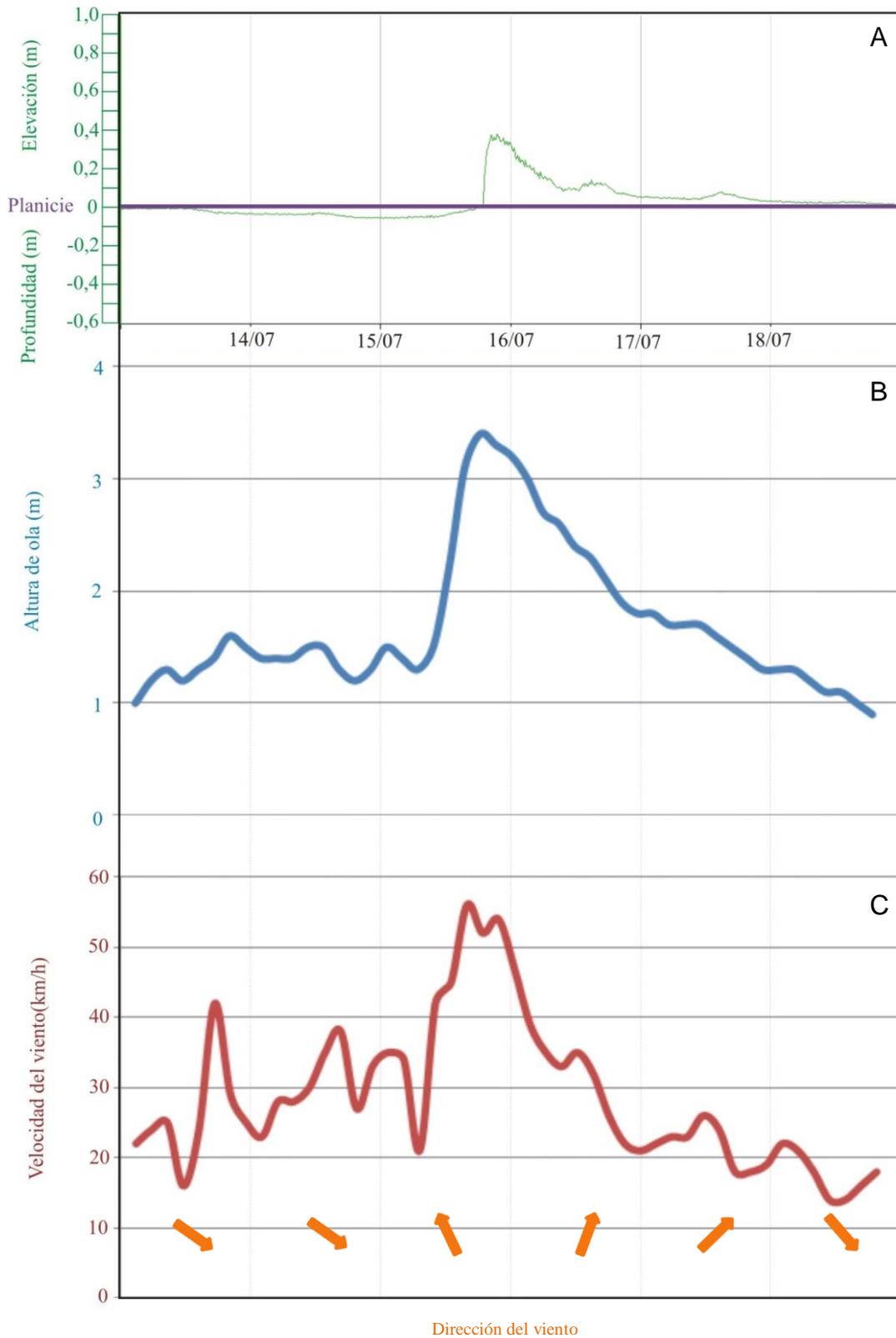


Figura 18. Parámetros que explican la inundación registrada desde el 13 al 19 de julio de 2017. Altura del nivel del agua en la planicie en st4 (A), alturas de ola (B), velocidad y dirección media del viento (C).

3.3.3. Evento 3: 11 de junio de 2015

El evento de inundación ocurrido en la zona costera de Paso Seco el 11 de junio de 2015, fue ocasionado por el desplazamiento desde el SO al NE de un frente frío asociado a una vaguada en el Océano Atlántico (Fig. 19). Este originó fuertes vientos con dirección SO que alcanzaron una máxima velocidad media de 53 km/h y una altura de ola significativa asociada de 3,4 m con 10 s de período y dirección S (Tabla 1; Anexo I).

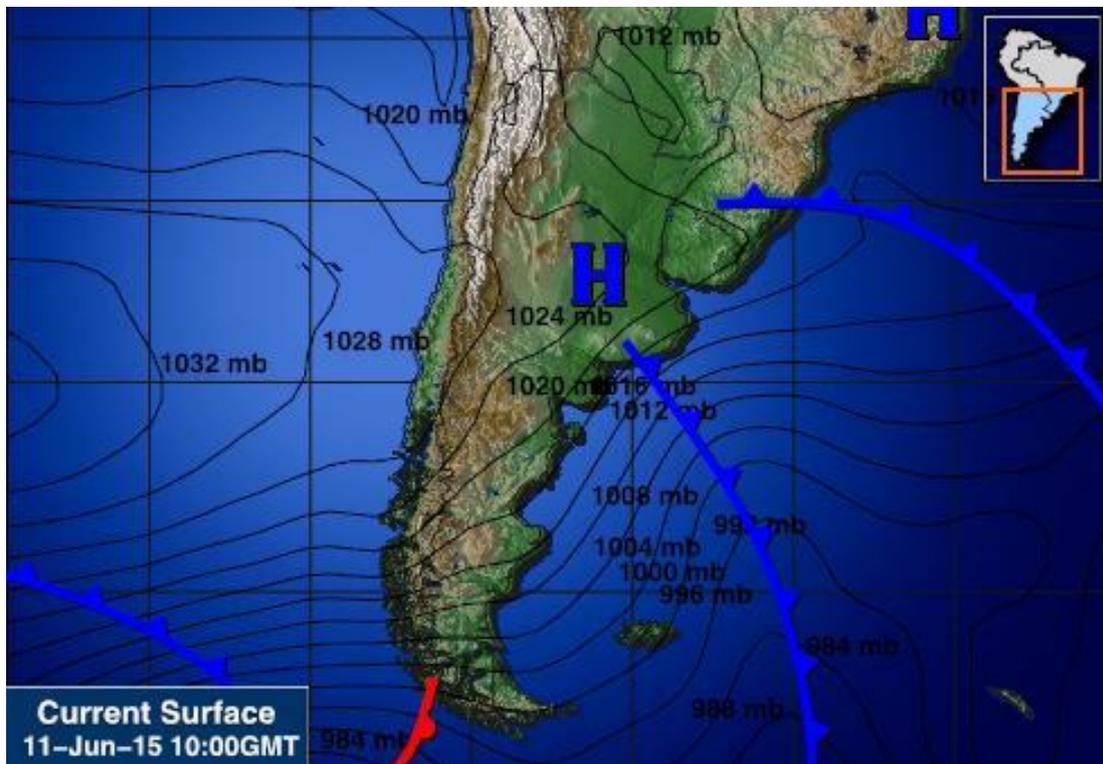


Figura 19. Mapa sinóptico del 11 de junio de 2015. Fuente: Intellicast (<http://www.intellicast.com/Global/Surface.aspx?location=ARRN0080>).

La altura de la columna de agua sobre la planicie fue 15 cm (Fig. 20), la velocidad media fue > 40 km/h y dirección media del viento fue del SO. Nuevamente, el comienzo de la inundación coincide con la máxima velocidad del viento y la máxima altura de olas. A diferencia de los dos eventos anteriores, la marea correspondiente al 11 de junio de 2015 fue de cuadratura, lo que puede explicar la inundación de menor magnitud (Tabla 1; Anexo D).

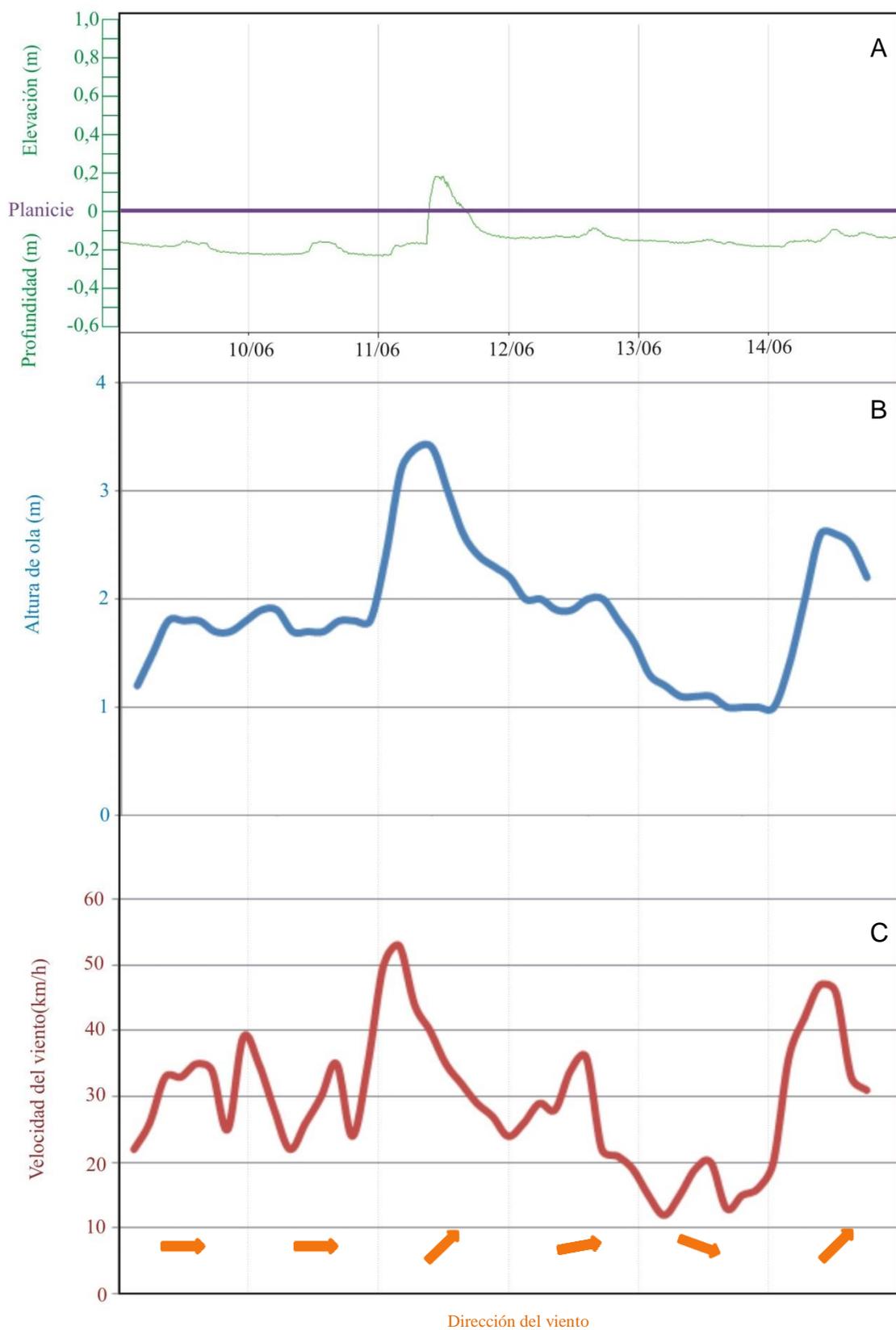


Figura 20. Parámetros que explican la inundación registrada desde el 9 de junio al 15 de Junio de 2015. Altura del nivel del agua en la planicie en st4(A), alturas de ola (B), velocidad y dirección media del viento (C).

3.3.4. Evento 4: 10 de marzo de 2017

El evento ocurrido el día 10 de marzo de 2017 es uno de las tres inundaciones generadas en verano. El mismo fue ocasionado por el movimiento de un centro de baja presión sobre el Océano Atlántico (Fig. 21) que originó fuertes vientos del SO de hasta 55 km/h de velocidad media y una altura de ola significativa de 3,3 m con 9 s de período y dirección SO. Así como los eventos 1 y 2, la marea correspondiente a ese día fue de sicigia, la cual actúa como un componente de la sobreelevación del mar (Tabla 3; Anexo D).

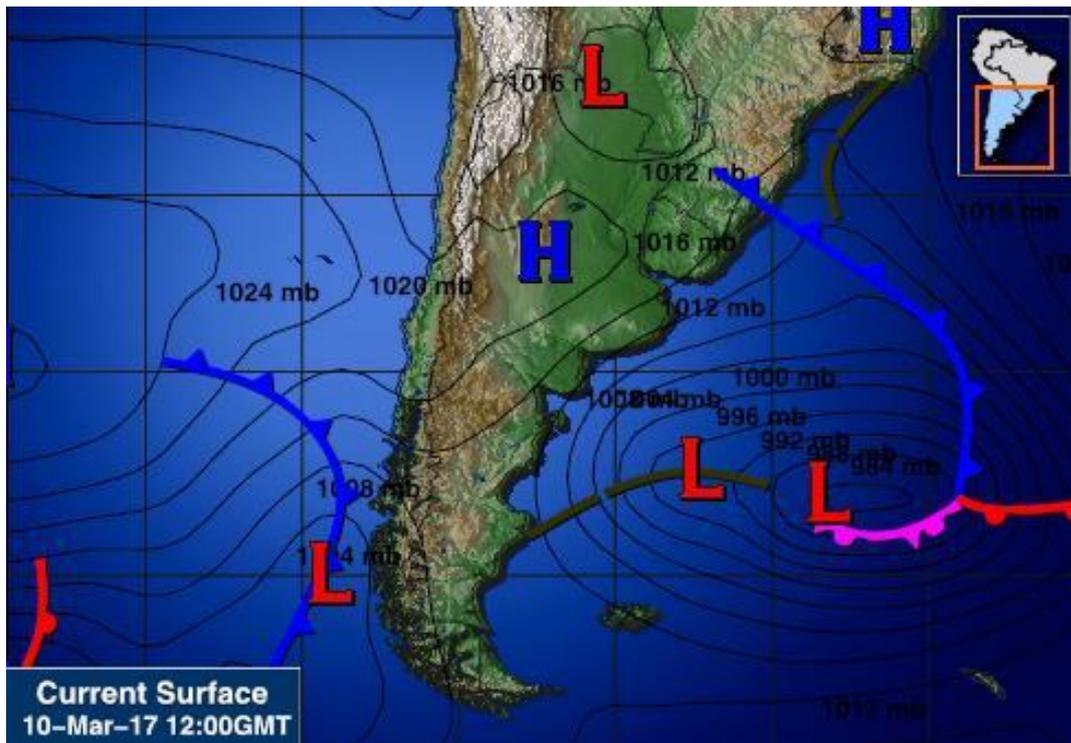


Figura 21. Mapa sinóptico del 10 de marzo de 2017. Fuente: Intellicast (<http://www.intellicast.com/Global/Surface.aspx?location=ARRN0080>).

La altura de la columna de agua fue 15 cm (Fig. 22a), coincidiendo con el aumento de la altura de la ola (> 3 m; Fig 22b), y de la velocidad media del viento (superior a 50 km/h) y dirección promedio del O y SO (Fig 22c). El viento presentó dirección N superior a 30 km/h los dos días anteriores y generó un aumento del nivel de agua hasta la planicie (aproximadamente 20 cm). El leve aumento en velocidad de viento con cambio de dirección al SO favoreció un aumento del nivel del agua sobre la superficie de la planicie.

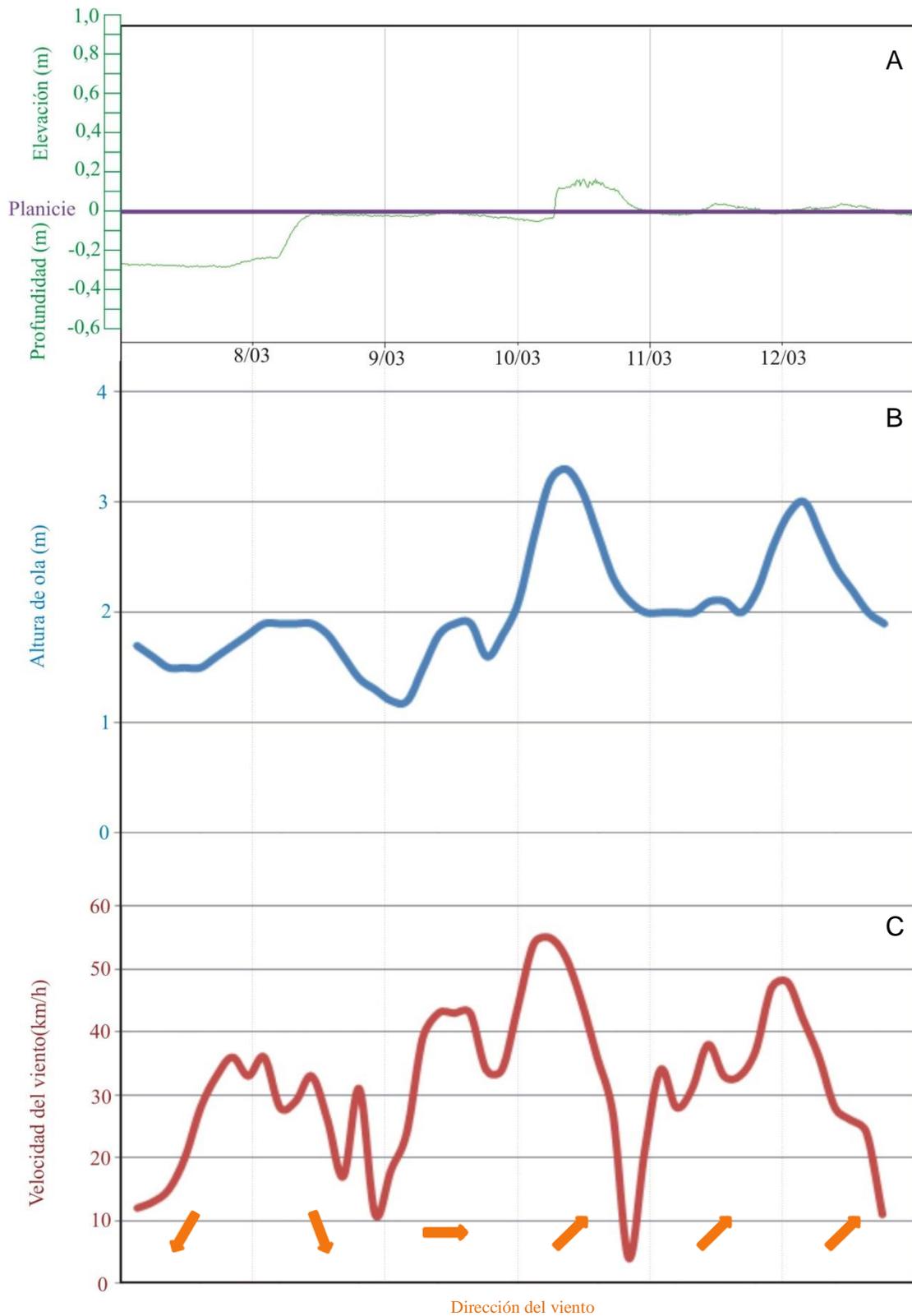


Figura 22. Parámetros que explican la inundación registrada desde el 7 de marzo al 13 de marzo de 2017. Altura del nivel del agua en la planicie en st4 (A), alturas de ola (B), velocidad y dirección media del viento (C).

3.4. Comparación de modelos de reanálisis.

3.4.1. Modelos de olas.

En el presente trabajo se utilizaron los datos de olas del modelo numérico NWW3 (NOAA wave watch III) obtenido del servicio de WindGuru Pro (Fig. 23). Para verificar que los datos presentados en el respectivo modelo sean válidos, se eligió un día aleatorio (14 de abril de 2019; Fig. 24) y se comparó con el modelo numérico de Olas AUSTRAL WAVEWATCHIII (Austral-WWIII), según la implementación realizada por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para el Océano Atlántico Sur del modelo de olas de tercera generación WAVEWATCH III ® 3.14 (Tolman, 2009), desarrollado por National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y por National Centers for Environmental Prediction (NCEP).

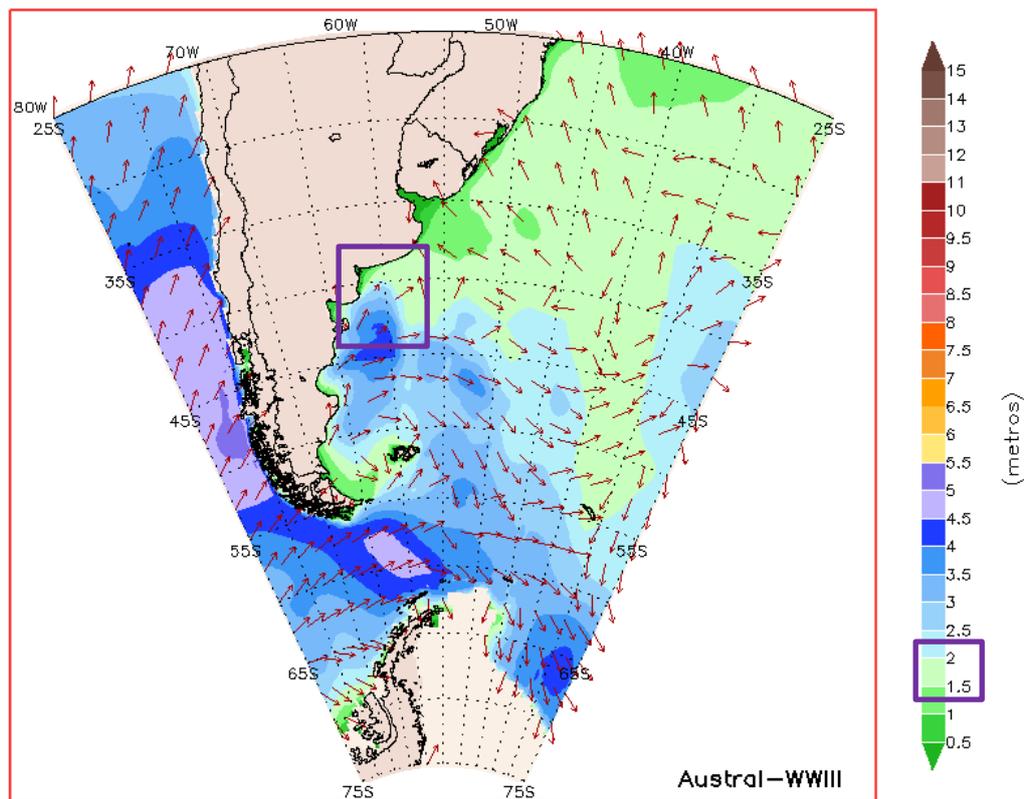
Las características de las olas del día elegido según los datos del modelo de olas obtenido del servicio de WindGuru Pro, se estimó una altura de ola significativa de 1,8 m, un período de 8 s y dirección SO, a las 18 hs en la zona de estudio (Fig. 23). El mismo día a la misma hora, según el modelo de Olas AUSTRAL WAVEWATCHIII (Austral-WWIII), presenta una dirección de ola del SO y una altura significativa aproximada de 2 m (Fig. 24). Cabe destacar que en este último caso la determinación de la altura de ola es de manera cualitativa en función de un rango de colores.

Se concluye entonces, que ambos modelos presentan datos similares pero de manera diferente. El modelo de Olas AUSTRAL WAVEWATCHIII (Austral-WWIII) es cualitativo, mientras que el modelo NWW3 del WindGuru Pro es cuantitativo ya que los presenta numéricamente. Hay que tener en consideración, como ya se mencionó previamente, que estos modelos son de mar abierto, por lo que se utilizan como una aproximación en cercanía de la costa.

Init:	D	D	D	D	D	D	D
14.04.2019	14.	14.	14.	14.	14.	14.	14.
06 UTC	03h	06h	09h	12h	15h	18h	21h
Velocidad viento (km/h)	32	23	33	36	34	25	12
Ráfagas (km/h)	60	46	43	45	42	38	17
Dirección viento	→	→	↗	↗	↗	↗	↗
Ola (m)	-	-	1.6	1.9	2	1.8	1.5
Período olas (seg.)	-	-	7	7	7	8	9
Dirección olas	-	-	↗	↗	↗	↗	↗
*Temperatura (°C)	18	17	17	17	17	16	14

Figura 23. Datos de altura, período y dirección de olas del modelo numérico NWW3 (NOAA wave watch III) obtenido del servicio de WindGuru Pro para el día 14 de abril de 2019. Fuente: <https://www.windguru.cz/119155>.

ALTURA DE LA OLA SIGNIFICATIVA Y DIRECCIÓN DEL MÁXIMO



Basado en: 14-04-2019 06z

14-04-2019 18z

Figura 24. Altura de Ola significativa y dirección del máximo para el día 14 de abril de 2019 según el modelo numérico de Olas AUSTRAL WAVEWATCHIII (Austral-WWIII), según la implementación realizada por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para el Océano Atlántico Sur del modelo de olas de tercera generación WAVEWATCH III ® 3.14 (Tolman, 2009), desarrollado por National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y por National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Fuente: <http://www3.smn.gov.ar/?mod=archolas&id=16>.

3.4.2. Modelos de mapas sinópticos.

Se compararon los mapas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Intellicast e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para el 19 de agosto de 2017. El mapa sinóptico del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), dibujado con un intervalo de isobaras de 3 hPa, muestra un centro de baja presión en el Océano Atlántico. El centro de baja presión está ubicado a la altura de la Provincia de Santa Cruz generando fuertes vientos de dirección SO en la zona de estudio (Fig. 25).

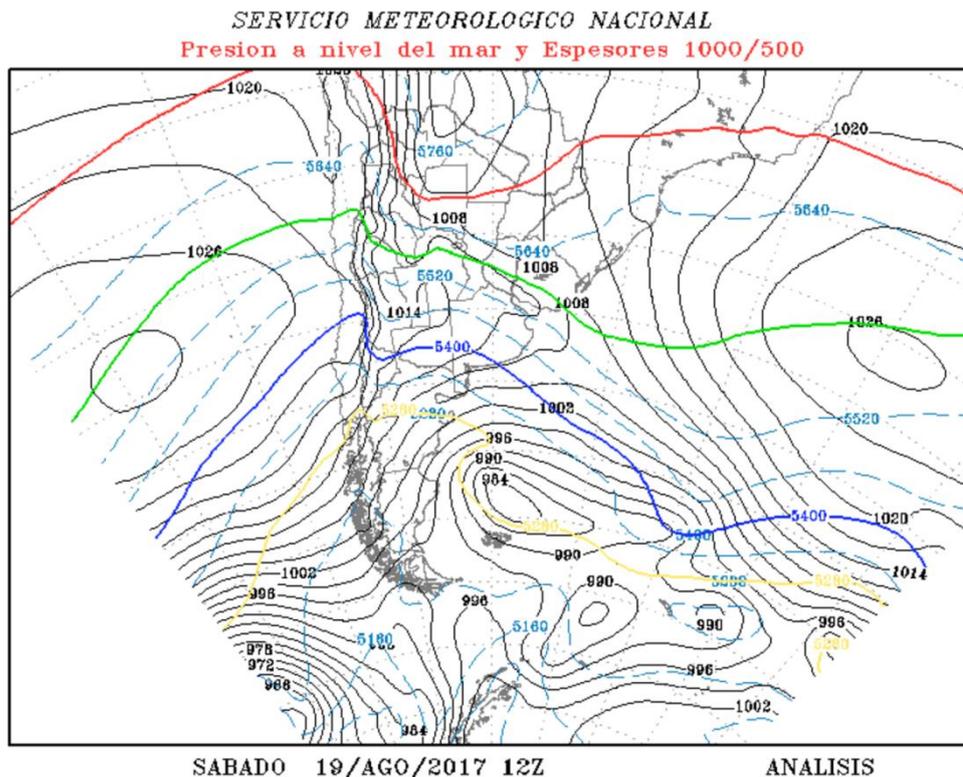


Figura 25. Mapa sinóptico del 19 de agosto de 2017. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (SMN, <https://www.smn.gob.ar/>).

En el modelo de Intellicast (Fig. 26) también se observan fuertes vientos del SO en el área de estudio, generados por el paso de un frente frío asociado a un centro de baja presión (L) en el Océano Atlántico. En estos mapas también se identifican los centros de baja y alta presión. Las isobaras tienen una separación de 4 hPa, a diferencia del mapa del Servicio Meteorológico Nacional donde la equidistancia es de 3 hPa. A su vez en el mapa sinóptico del INPE (Fig. 27) también se observa una equidistancia de isobaras de 4 hPa y presenta las mismas características observadas en las figuras 25 y 26. Ello significa que los tres modelos otorgan la misma información por lo tanto, es indistinta la utilización de alguno de los tres modelos.

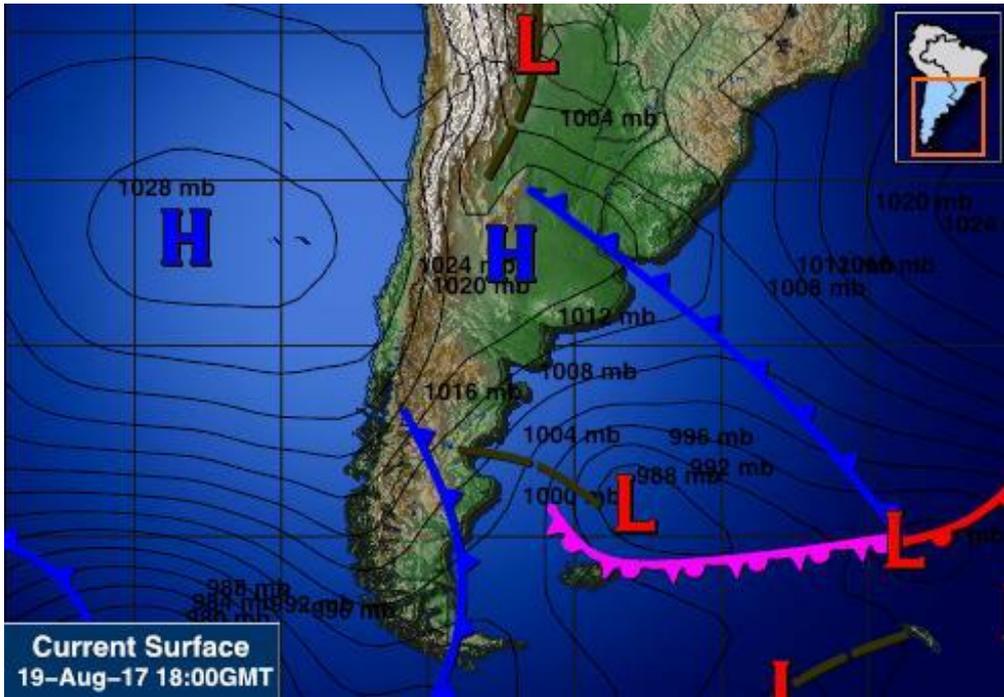


Figura 26. Mapa sinóptico del 19 de agosto de 2017. Fuente: Intellicast (<http://www.intellicast.com/Global/Surface.aspx?location=ARRN0080>).

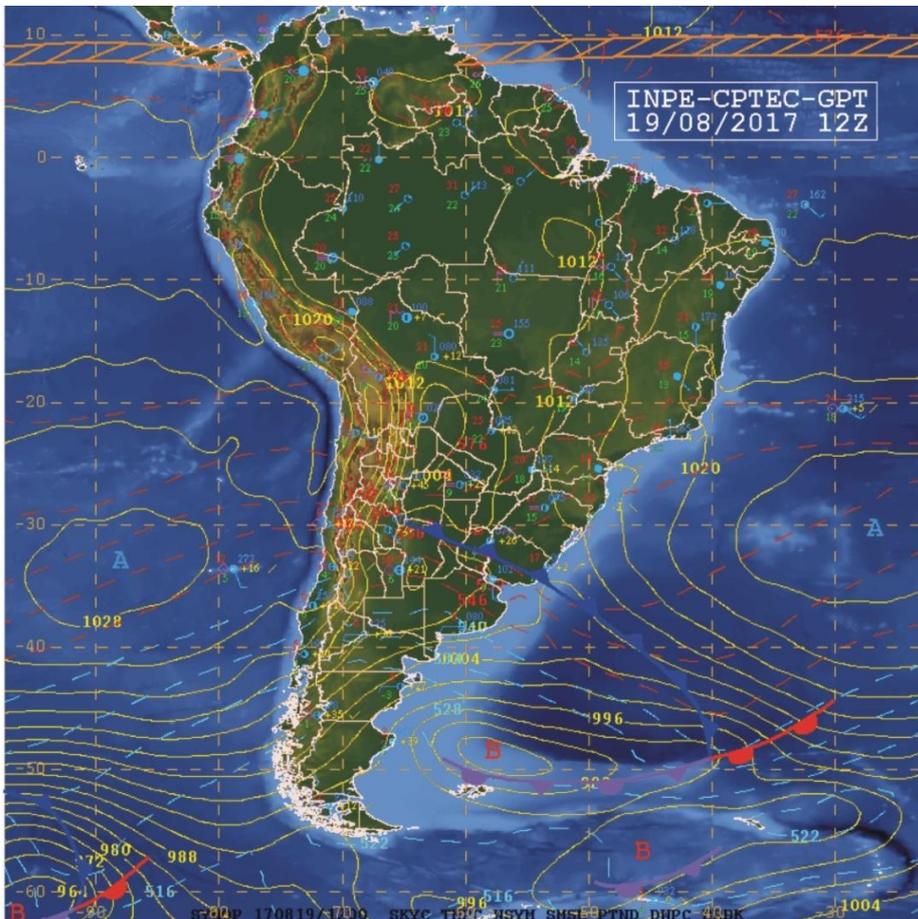


Figura 27. Mapa sinóptico del 19 de agosto de 2017. Fuente: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, <http://tempo.cptec.inpe.br/>).

4. DISCUSION

Según Espinosa e Isla (2011), la espiga de arena formada en la boca de Paso Seco (Fig. 3b) habría obturado definitivamente la conexión del canal de marea con el mar hace más de 100 años. No obstante, los registros de mediciones del nivel de agua verifican las inundaciones frecuentes sobre el antiguo canal de marea. Éste actúa como una planicie de marea supramareal que experimenta inundaciones reiteradas e irregulares producidas por las ondas de tormenta que hacen elevar el nivel del mar y superar la barrera topográfica que forma la espiga costera.

Las estadísticas fueron realizadas con 36 inundaciones que coincidieron en ambas estaciones (st3 y st4), siendo las más representativas de los eventos de ondas de tormenta ya que tienen la energía suficiente para inundar la planicie con más de 10 cm de altura. De acuerdo al período de medición estudiado las inundaciones son frecuentes durante todo el año, entre 10 y 13 inundaciones en 9 meses (Fig. 7).

Luego de analizar los registros de la variación del nivel del agua en ambas estaciones (Fig. 5 y 6) se concluye que las dos estaciones tienen un comportamiento similar. En invierno (junio-septiembre) se observa que el agua permanece varios días (o meses) por encima o muy cerca de la planicie. En verano (diciembre-marzo), en contraste, se observa mayor variabilidad: el agua puede permanecer varios días por debajo de la planicie varios cm de profundidad (< 50 cm), dejándola expuesta a la radiación solar. Como se ha demostrado, tanto en invierno como en verano se registran inundaciones de alta energía. Estos resultados coinciden con los de Maisano (2019). La variación de la temperatura del agua en las dos estaciones muestra una variación estacional, en invierno se mantiene en aproximadamente 10 °C, pudiendo alcanzar mínimos de 3 °C y en verano supera los 25 °C alcanzando máximos de 29 °C. En verano se observa una mayor variabilidad en la temperatura debido a la mezcla del agua retenida bajo la planicie con el agua que ingresa del mar, mientras que en invierno permanece casi constante.

La dirección de viento SO fue la predominante en los eventos de inundación, como se aprecia en la rosa de los vientos (Fig. 10). Esta dirección corresponde al 72 % de las inundaciones (Fig. 11), donde la velocidad media promedio para la dirección SO es mayor a los 40 km/h. Los eventos de ondas de tormenta se caracterizan por los días de vientos fuertes de dirección SO. Ello se corrobora con los mapas sinópticos que muestran las situaciones meteorológicas que se registran en el área de estudio. La mayoría de los

eventos de ondas de tormenta analizados tienen en común que fueron ocasionados por el desplazamiento SO-NE de un frente frío asociado a un centro de baja presión en el Océano Atlántico generando fuertes vientos de dirección SO en tres de los cuatro casos ejemplificados (Fig. 15, 19 y 21) y de dirección SE en uno de ellos (Fig. 17). Este último ejemplo ocurrió el día 15 de julio de 2017, en el cual, a diferencia del resto de los casos estudiados, el centro de baja presión se encuentra localizado en la zona de estudio. Ello podría indicar que el efecto de barómetro inverso que eleva el nivel del agua (Talley *et al.*, 2011; Parise *et al.*, 2009) podría estar afectando también la zona de estudio, aunque se sabe que este efecto es muy pequeño (NOAA, 2018).

Las inundaciones ocurren indistintamente en mareas de sicigia o cuadratura. Las mareas de sicigia fueron predominantes en los eventos de ondas de tormenta representando el 78 % del total, mientras que sólo el 22 % de las ocasiones ocurrió en mareas de cuadratura (Fig. 9). Esto indica que, aunque el porcentaje predominante es en estado de sicigia, las inundaciones suceden también con mareas de cuadratura. Sin embargo, las mareas de cuadratura estarían relacionadas con inundaciones de menor altura (15 cm, Fig. 20). En contraste, las mayores inundaciones están relacionadas con el estado de la marea de sicigia, como la ocurrida el 23 de junio de 2018 (Fig. 16) donde se registró una altura máxima de 90 cm, mientras que todas las demás características fueron similares.

Otra característica semejante en todos los ejemplos, es el comportamiento de la inundación con respecto a la velocidad del viento y la altura de ola significativa. El evento, en rasgos generales, comienza cuando la velocidad media del viento es máxima generando máximas alturas de ola. Las olas superaron en todos los casos los 3 m de altura, el período de las mismas osciló entre los 8 y 11 s y la dirección corresponde al cuadrante de dirección S (2 SO, 1 SE y 1 S). La duración del evento es un factor importante, ya que luego de la primera inundación, si el viento continúa o aumenta puede mantener el agua sobre la planicie o producir una inundación aún mayor (Fig. 16).

La altura de ola presenta un promedio de 3,1 m, y 9,3 s de período. La dirección de las olas en los eventos de inundación, presenta una tendencia del cuadrante de dirección S correspondiente al 86 % de los eventos de inundación, del cual el 33% compete a la dirección SO, luego el 31% a la dirección S y por último el restante 22 % a la dirección SE (Fig. 13 y 14) lo que indica que a pesar que el viento sea SO, la dirección de la ola varía entre dirección SO y SE.

En este trabajo se demuestra que las inundaciones observadas en la planicie son ocasionadas por las ondas de tormenta. Las mismas se generan por el desplazamiento SO-NE de un centro de baja presión en el Océano Atlántico, cuya característica principal son los fuertes vientos de dirección SO cercanos a la costa. Aunque la dirección del viento es opuesta a la dirección NE de ingreso del agua (Maisano *et al.*, 2019), es la sobreelevación del nivel del mar ocasionada por la onda de tormenta lo que hace ingresar el agua. Estas inundaciones tienen la fuerza suficiente para producir estructuras microbianas de deformación, como enrollamientos (Fig. 28a) y pliegues (Fig. 28b) como explica Maisano (2019).

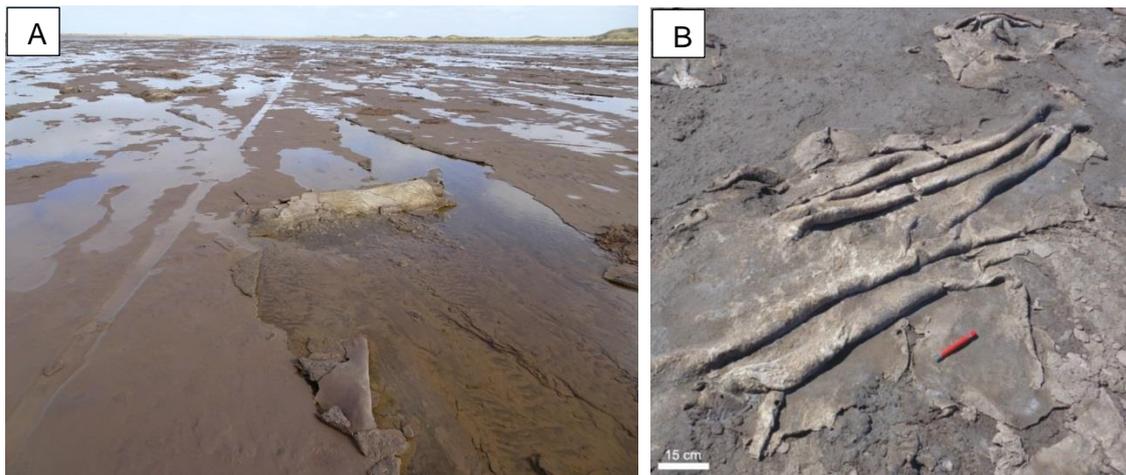


Figura 28. Ejemplo estructuras microbianas de deformación características de Paso Seco. A) Enrollamiento de mata. B) Sucesión de pliegues microbianos. Fuente: modificado de Cuadrado y Blasi, 2018.

Aunque el objetivo principal del trabajo de investigación fue estudiar las inundaciones en la planicie de Paso Seco, sitio de relativamente difícil acceso y sin estaciones de monitoreo continuo, un objetivo secundario y necesario fue comprobar la utilidad de datos obtenidos de modelos numéricos para completar este tipo de análisis. Para ello se compararon datos del modelo numérico de olas NWW3 (NOAA wave watch III) obtenido del servicio de WindGuru Pro (Fig. 23) y del modelo numérico de Olas AUSTRAL WAVEWATCHIII (Austral-WWIII), según la implementación realizada por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para el Océano Atlántico Sur del modelo de olas de tercera generación WAVEWATCH III ® 3.14 (Tolman, 2009), desarrollado por National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y por National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (Fig. 24). Si bien la información es presentada con diferente formato (tabla o mapa respectivamente), ambos modelos brindan contenido similar que explicaron las mediciones *in situ* del nivel del agua.

Sin embargo se recomienda el modelo numérico de olas NWW3 (NOAA wave watch III) dado que el modelo AUSTRAL WAVEWATCHIII (Austral-WWIII) no proporciona el período de las olas que es un dato relevante para entender la climatología de las olas.

Se debe tener en consideración que estos modelos corresponden a datos de la plataforma continental y, por lo tanto son una aproximación de los datos costeros. Se deben tomar como un recurso al no disponer con datos *in situ* de una estación de monitoreo. Se concluye entonces que ambos modelos son igualmente utilizables, sólo depende del objetivo del trabajo y de la elección del usuario.

Por otra parte, los modelos de situaciones sinópticas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), del Intellicast y del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (sección 3.4.) brindan la misma información, con diferencias en la equidistancia de las isobaras. Por lo tanto los modelos son igualmente válidos, lo que permite la libertad del usuario en la elección del modelo a utilizar para su estudio.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo permitió identificar que aunque las ondas de tormenta son situaciones comunes y frecuentes en el ambiente costero, cuando se adicionan la acción de las mareas de sicigia, los efectos en la erosión costera se amplifican. Se estudió una zona costera, Paso Seco, caracterizada por un clima semiárido y la formación de una espiga de arena, donde se observaron ingresos de agua de mar que superan la espiga y generan inundaciones de la planicie ubicada por detrás. Para explicar este proceso se estudiaron las situaciones sinópticas típicas de los días que se producían las inundaciones, los vientos característicos de estos eventos y las olas. Se llegó a la conclusión que ondas de tormenta afectan la costa, con suficiente energía para que el agua supere la espiga e inunde la planicie. Si los eventos duraban varios días el agua permanecía en la planicie. En Paso Seco, las ondas de tormenta son generadas por desplazamientos de tormentas extra-tropicales caracterizadas por frentes fríos en dirección SO-NE. Los frentes están asociados a centros de baja presión en el Océano Atlántico que producen fuertes vientos principalmente del SO de más de 40 km/h de velocidad media. Estos vientos originan olas de más de 3 m de altura y 9 s de período aproximadamente, con dirección del cuadrante S. Las máximas inundaciones se registraron cuando estos eventos están favorecidos por la marea de sicigia. Sin embargo, también pueden ocurrir en mareas de cuadratura, generando inundaciones más bajas.

Las inundaciones de agua de mar en el sector posterior a la espiga costera comienzan cuando la velocidad del viento SO es máxima generando la máxima altura de ola. La duración del evento es un factor importante, ya que luego de la primera inundación, si el viento continúa o aumenta puede mantener el agua por encima de la planicie o producir una inundación aún mayor. La formación de estructuras microbianas de deformación de gran envergadura como los enrollamientos de mata microbiana en Paso Seco se puede relacionar entonces con las condiciones meteorológicas y oceanográficas imperantes no sólo en la costa sino también en el océano Atlántico.

La utilización de modelos numéricos de olas y de modelos sinópticos del tiempo atmosférico utilizados en el estudio permitió completar y explicar el efecto de las ondas de tormenta en el sitio de estudio. Los resultados de los diferentes modelos presentan valores similares. Ellos son una herramienta muy útil e importante ya que pueden ser potencialmente utilizados en aquellas zonas en las cuales no se dispone de estaciones de monitoreo.

6. REFERENCIAS

- Alvarez, J., Ríos F., 1988. Estudios litorales en las bahías San Blas y San Antonio Oeste. I. Caracterización oceanográfica preliminar de la zona interior de la Bahía San Blas, provincia de Buenos Aires. CONICET- U.N.M.P.- Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Ciencias Marinas. 39 pp.
- Ambrosini, G.L., 1984. Geomorfología de la Isla Jabalí, departamento de Patagones, provincia de Buenos Aires. IX Congreso Geológico Argentino, Actas: 513-519, Argentina, San Carlos de Bariloche.
- Beigt, D., Cuadrado D.G., Piccolo M.C., 2009. Resultados preliminares del efecto del viento en la marea de Bahía San Blas. XXIV Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodesias, Resúmenes: 287-288, Argentina, Mendoza.
- Beigt, D., Cuadrado, D.G., Piccolo, M.C., 2011. Study of the surface water circulation in San Blas channel (Argentina) using Landsat imagery. *Brazilian Journal of Oceanography* 59, 241–252.

- Bouougri E.H., Porada H., 2012. Wind-induced mat deformation structures in recent tidal flats and sabkhas of SE-Tunisia and their significance for environmental interpretation of fossil structures. *Sedimentary Geology* 263-264, 56-66.
- Breda, A., Preto, N., 2011. Anatomy of an Upper Triassic continental to marginal-marine system: the mixed siliciclastic-carbonate Travenanzes Formation (Dolomites, Northern Italy). *Sedimentology*, 58: 1613-1647.
- Bunya, S., Dietrich, J.C., Westerink, J.J., Ebersol, B.A., Smith, J.M., Atkinson, J.H., Jensen, R., Resio, D.T., Luettich, R.A., Dawson, C., Cardone, V.J., Cox, A.T., Powell, M.D., Westerink, H.J., Roberts, H.J., 2010. A High-Resolution Coupled Riverine Flow, Tide, Wind, Wind Wave, and Storm Surge Model for Southern Louisiana and Mississippi. Part I: Model Development and Validation. *Monthly Weather Review* 138, 345-377.
- Cuadrado, D., Blasi, A., 2018. Reconocimiento de actividad microbiana en ambientes silicoclásticos actuales y en paleoambientes. Estudio comparativo para el establecimiento de análogos. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*. 24, 39-73.
- Cuadrado, D.G., Pan J., Gómez, E.A, Maisano, L., 2015. Deformed microbial mat structures in a semiarid temperate coastal setting. *Sedimentary Geology* 325, 106-118.
- Dasgupta, S., Laplante, B., Murray, S., Wheeler, D., 2009. Climate Change and the Future Impacts of Storm-Surge Disasters in Developing Countries. Center for Global Development Working Paper No. 182. Disponible en SSRN: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1479650.
- Deb, M., Ferreira, C.M., 2016. Simulation of cyclone-induced storm surges in the low-lying delta of Bangladesh using coupled hydrodynamic and wave model (SWAN + ADCIRC). *Journal of Flood Risk Management*, doi: 10.1111/jfr3.12254.
- Debernard, J., Sætra, Ø, Røed, L.P., 2002. Future wind, wave and storm surge climate in the northern North Atlantic. *Climate Research* 23, 39-49.
- Dietrich, J.C., Westerink, J.J., Kennedy A.B., Smith, J.M., Jensen, R.M., Zijlema, M., Holthuijsen, L.H., Dawson, C., Luettich, R.A., Powell, M.D., Cardone, V.J., Cox, A.T., Stone, G.W., Pourtaheri, H., Hope, M.E., Tanaka, S., Westerink, L.G.,

- Westerink, H.J., Cobell, Z., 2011. Hurricane Gustav (2008) Waves and Storm Surge: Hindcast, Synoptic Analysis, and Validation in Southern Louisiana. *Monthly Weather Review* 139, 2488-2522.
- D'Onofrio, E., Fiore M., Campetella C., Possia N., Cerne B., Bertolotti M. y Saurral R., 2005. Ondas de Tormenta Negativas en el Puerto de Buenos Aires. IX Congreso Argentino de Meteorología (CONGREGMET), Argentina, Buenos Aires.
- Escobar, G., Vargas, W., Bischoff, S., 2004. Wind tides in the Rio de La Plata Estuary: Meteorological Conditions. *International Journal of Climatology* 24, 1159–1169.
- Espinosa M., Isla F., 2011. Diatom and sedimentary record during the mid-holocene evolution of the San Blas estuarine complex, northern Patagonia, Argentina. *Ameghiniana* 48: 411-423.
- Etala, M.P., 2000. Modelos hidrodinámicos anidados para el cálculo de la onda de tormenta en el estuario de Bahía Blanca. Tesis de Doctorado, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 132 pp. Disponible en: http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_3279_Etala.pdf
- Fairley, I., Masters, I., Karunaratna, H., 2016. Numerical modelling of storm and surge events on offshore sandbanks. *Marine Geology* 371, 106–119.
- Ferrelli, F., Bohn, V.Y., Piccolo, M.C., 2012. Variabilidad de la precipitación y ocurrencia de eventos secos en el sur de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Proceeding IX Jornadas Nacionales de Geografía Física, Argentina, Bahía Blanca*, pp. 15–28.
- Flather, R.A., 1994. A Storm Surge Prediction Model for the Northern Bay of Bengal with Application to the Cyclone Disaster in April 1991. *Journal of Physical Oceanography* 24, 172-190.
- Gill, A.E., 1982. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. Academic Press, San Diego, USA. 662 pp. (página 394).
- Google Earth Pro, 2019. Zona costera de Paso Seco, Buenos Aires Argentina. Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO, Image Digital Globe.
- Hallegatte, S., Ranger, N., Mestre, O., Dumas, P., Corfee-Morlot, J., Herweijer, C., Muir Wood, R., 2011. Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: a case study on Copenhagen. *Climatic Change* 104, 113-137.

- Hayes, M.O., 1979, Barrier island morphology as a function of wave and tide regime. En Leatherman, S. P. (Ed.), *Barrier islands from the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico*. Academic Press, New York, USA, pp 1-29.
- Hope, M.E., Westerink, J. J., Kennedy, A.B., Kerr, P. C., Dietrich, J. C., Dawson C., Bender, C.J., Smith, J. M., Jensen, R.E. Zijlema, M., Holthuijsen, L. H., Luettich Jr., R. A. , Powell, M. D., Cardone, V.J., Cox, A.T., Pourtaheri, H., Roberts, H. J., Atkinson, J. H., Tanaka, S., Westerink, H. J., Westerink, L. G., 2013. Hindcast and validation of Hurricane Ike (2008) waves, forerunner, and storm surge. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118, 4424–4460.
- Iglesias, A., 1981. Temperaturas. En: Chiozza, E., Figueira, R. (Eds.), *Atlas Total de la República Argentina*. Centro Editor de América Latina, Buenos Aires, pp. 204–208.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE. Disponible en: <http://tempo.cptec.inpe.br/>.
- Intellicast. Disponible en: <http://www.intellicast.com/Global/Surface.aspx?location=ARRN0080>.
- Irish, J.L., Resio, D.T., Ratcliff, J.J., 2008. The Influence of Storm Size on Hurricane Surge. *Journal of Physical Oceanography* 38, 2003-2013.
- Kokot, R., 2010. Espigas indicadoras de proveniencia de olas en la costa argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 67 (1): 19 – 26.
- Li, J., Nie, B., 2017. Storm surge prediction: present status and future challenges. *Procedia IUTAM* 25, 3-9.
- Lin, N., Emanuel, K.A., Smith, J.A., Vanmarcke, E., 2010. Risk assessment of hurricane storm surge for New York City. *Journal of Geophysical Research*, 115, doi:10.1029/2009JD013630.
- Maisano, L., 2019. Estructuras sedimentarias generadas por la presencia de matas microbianas en un ambiente evaporítico costero. Procesos de formación y preservación. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geología (inérita). 108 pp.
- Maisano, L., Cuadrado, D.G., Gómez, E.A., 2019. Processes of MISS-formation in a modern siliciclastic tidal flat, Patagonia (Argentina). *Sedimentary Geology*, 381, 1-12.

- McIvor, A.L., Spencer, T., Möller, I., Spalding, M., 2012. Storm surge reduction by mangroves. Natural Coastal Protection Series: Report 2. Cambridge Coastal Research Unit Working Paper 41. Published by The Nature Conservancy and Wetlands International. 35 pp. ISSN 2050-7941. Disponible en: <http://www.naturalcoastalprotection.org/documents/storm-surge-reduction-by-mangroves>.
- Millward, D., Davies, S.J., Williamson, F., Curtis, R., Kearsey, T.I., Bennett, C.E., Marshall, J.E.A., Browne, M.A.E., 2018. Early Mississippian evaporites of coastal tropical wetlands. *Sedimentology* 65, 2278–2311.
- Mori, N., Kato, M., Kim, S., Masel, H., Shibutanil, Y., Takemil, T., Tsuboki, K., Yasudal, T., Haiyan, T., 2014. Local amplification of storm surge by Super Typhoon Haiyan in Leyte Gulf. *Geophysical Research Letters* 41, 5106-5113, doi:10.1002/2014GL060689.
- Mori, N., Takemi, T., 2016. Impact assessment of coastal hazards due to future changes of tropical cyclones in the North Pacific Ocean. *Weather and Climate Extremes* 11, 53-69.
- Mousavi, M.E., Irish, J.L., Frey, A.E., Olivera, F., Edge, B.L., 2011. Global warming and hurricanes: the potential impact of hurricane intensification and sea level rise on coastal flooding. *Climatic Change* 104(3-4), 575-597.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). What is storm surge? National Ocean Service website, 25/06/18. Disponible en: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/stormsurge-stormtide.html>.
- Noffke, N., 2010. *Microbial Mats in Sandy Deposits from the Archean Era to Today*. Springer-Verlag, Berlin, p. 200.
- Parise, C.K., Calliari, L.J., Krusche, N., 2009. Extreme storm surges in the South of Brazil: atmospheric conditions and shore erosion. *Brazilian Journal of Oceanography*, 57(3), 175-188.
- Perillo, G.M.E. y Piccolo, M.C., 1991. Tidal response in the Bahía Blanca Estuary. *Journal of Coastal Research* 7(2), 437-449 (ISSN 0749-0208).

- Re, M., Menéndez, A.N., 2006. Impacto del Cambio Climático en las costas del Río de La Plata. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 7(1), 25-34.
- Servicio de Hidrografía Naval (SHN), 2019. Tablas de marea. Disponible en: http://www.hidro.gov.ar/oceanografia/Tmareas/Form_Tmareas.asp.
- Servicio de Hidrografía Naval (SHN), 2019. Modelos numéricos de ondas de tormenta. Disponible en: <http://www.hidro.gob.ar/smara/Mmareas.asp>.
http://www3.smn.gov.ar/pronos/ondatormenta_plataformario.php?id=1.
- Servicio Meteorológico Nacional Argentina (SMN), 2017. Carta sinóptica del 19 de Agosto de 2017. Disponible en: <https://www.smn.gov.ar/>.
- Servicio Meteorológico Nacional Argentina (SMN), 2019. Pronóstico numérico de Olas. Disponible en: <http://www3.smn.gov.ar/?mod=archolas&id=16>.
- Spencer, T., Brooks S.M., Evans B.R., Tempest J.A., Möller I., 2015. Southern North Sea storm surge event of 5 December 2013: Water levels, waves and coastal impacts. Earth-Science Reviews 146, 120–145.
- Sterl, A., van den Brink, H., de Vries, H., Haarsma, R., van Meijgaard, E., 2009. An ensemble study of extreme storm surge related water levels in the North Sea in a changing climate. Ocean Science 5, 369-378.
- Storch, H., Woth, K., 2008. Storm surges: perspectives and options. Sustainability Science 3(1), 33-43.
- Swindles, G.T., Galloway, J.M., Macumber, A.L., Croudace, I.W., Emery, A.R., Woulds, C., Bateman, M.D., Parry, L., Jones, J.M., Selby, K., Rushby, G.T., Baird, A.J., Woodroffe, S.A., Barlow, N.L.M., 2018. Sedimentary records of coastal storm surges: Evidence of the 1953 North Sea event 2018. Marine Geology 403, 262–270.
- Talley, L.D., Pickard, G.L., Emery, W.J., Swift, J.H., 2011. *Descriptive Physical Oceanography: An Introduction (Sixth edition)*. Elsevier-Academic Press, San Diego, USA. 560 pp. (página 230).
- Tolman, H. L., 2009. User manual and system documentation of WAVEWATCH IIITM version 3.14. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 276, 194 pp y apéndices.

- Trebino, L.G., 1987. Geomorfología y evolución de la costa en los alrededores del pueblo de San Blas, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 42(1-2), 9-22.
- Westerink, J.J., Luettich, R.A., Feyen, J.C., Atkinson, J.H., Dawson, C., Roberts, H.J., Powell, M.D., Dunion, J.P., Kubatko, E.J., Pourtaheri, H., 2008. A Basin- to Channel-Scale Unstructured Grid Hurricane Storm Surge Model Applied to Southern Louisiana. *Monthly Weather Review* 136, 833-864.
- WindGuru Pro. Disponible en: <https://www.windguru.cz/119155>.
- Wu, T., Tsai, Y., Terng, C., 2017. The recent development of storm surge modeling in Taiwan. *IUTAM Symposium on Storm Surge Modelling and Forecasting, China, Shanghai. Procedia IUTAM* 25, 70-73.
- Xie, D., Zou, Q., Cannon, J.W., 2016. Application of SWAN+ADCIRC to tide-surge and wave simulation in Gulf of Maine during Patriot's Day storm. *Water Science and Engineering* 9(1), 33-41.

7. ANEXO I

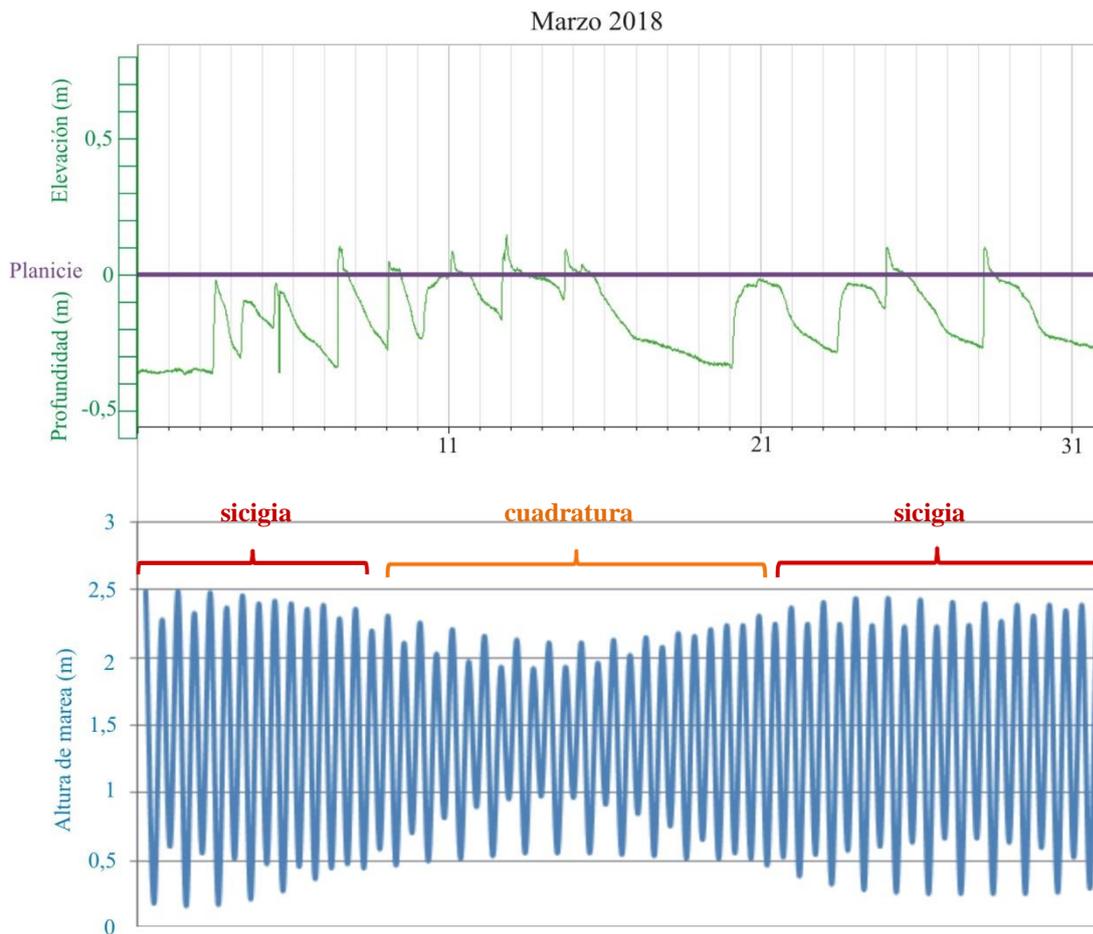


Figura 1. Relación de las inundaciones del mes de Marzo de 2018 en la st3 con la marea astronómica de San Blas obtenida del Servicio de Hidrografía Naval (SHN), definiendo períodos de sicigia y cuadratura. El mismo es un ejemplo de lo que se realizó mes a mes en el período de estudio.

Tabla 1. Fechas de inundaciones en st3 y st4 con sus características de altura de inundación, viento, olas, marea y precipitaciones del año 2015. Fuente: WindGuru Pro e interpretación de las tablas de Marea del Servicio de Hidrografía Naval (SHN).

St3						St4				
Fecha	Altura inundación	Viento	Olas	Marea	Lluvia	Altura inundación	Viento	Olas	Marea	Lluvia
21/03/15	50 cm	SO 39 km/h	3,9 m 10 seg S	sicigia	No					
01/04/15	35 cm	N-NE 48 km/h	1,9 m 6 seg NO	cuadratura	No					
17/04/15	10 cm	SO 56 km/h	3,3 m 8 seg SO	sicigia	Si algo					

20/04/15	20 cm	SE-SO 23 km/h	1,7 m 10 seg SO-NE	sicigia	No						
02/05/15	60 cm	SO 67 km/h	4,8 m 11 seg SO	cuadratura	Si mucho						
20/05/15	20 cm	N-NO 39 km/h	1,3 m 5 seg N	sicigia	No						
11/06/15	40 cm	SO 53 km/h	3,4 m 10 seg S	cuadratura	No	15 cm	SO 53 km/h	3,4 m 10 seg S	cuadratura	No	
17/06/15	50 cm	SO 50 km/h	3,6 m 12 seg S	sicigia	No	35 cm	SO 50 km/h	3,6 m 12 seg S	sicigia	No	
22/06/15	25 cm	SO 47 km/h	3,4 m 11 seg SO-S	cuadratura	Si poco						
14/07/15	20 cm	SO 43 km/h	2,6 m 9 seg SO	sicigia	No	25 cm	SO 43 km/h	2,6 m 9 seg SO	sicigia	No	
12/08/15						10 cm	SE 26 km/h	1 m 10 seg E-NE	sicigia	No	
22/08/15	20 cm	SO 51 km/h	3 m 9 seg NE-SE (NE)	cuadratura	Si mucho	10 cm	SO 51 km/h	3 m 9 seg NE	cuadratura	Si mucho	
31/08/15						20 cm	S-SO 45 km/h	2,2 m 7 seg S-SO	sicigia	No	
09/09/15	20 cm	SO 43 km/h	1,7 m 6 seg SO	sicigia	No						
10/09/15	35 cm	SO 58 km/h	4 m 9 seg SO	sicigia	Si algo	25 cm	SO 58 km/h	4 m 9 seg SO	sicigia	Si algo	
11/09/15	30 cm	SO 35 km/h	3,6 m 10 seg S	sicigia	No	20 cm	SO 35 km/h	3,6m 10 seg S	sicigia	No	
28/09/15	15 cm	SO 58 km/h	3,1 m 8 seg SO	sicigia	Si bastante	<15cm	SO 58 km/h	3,1 m 8 seg SO	sicigia	Si bastante	
02/10/15						<20 cm	SE 39 km/h	2,6 m 8 seg SE	sicigia	No	
02/11/15	10 cm	NO 41 km/h	1,4 m 7 seg NE	sicigia	No						

Tabla 2. Fechas de inundaciones en st3 y st4 con sus características de altura de inundación, viento, olas, marea y precipitaciones del año 2016. Fuente: WindGuru Pro e interpretación de las tablas de Marea del Servicio de Hidrografía Naval (SHN).

St3						St4				
Fecha	Altura inundación	Viento	Olas	Marea	Lluvia	Altura inundación	Viento	Olas	Marea	Lluvia
20/02/16	15 cm	NO 39 km/h	1,5 m 5 seg NO	sicigia	No					
09/03/16	20 cm	SE 44km/h	2,2 m 8 seg S	sicigia	No					
18/03/16	25 cm	SO 51 km/h	2,3 m 7 seg SO	sicigia	No					
16/04/16	20 cm	SO 52 km/h	2,9 m 8 seg SO	sicigia	No					
20/04/16	20 cm	O 54 km/h	1,9 m 6 seg O	cuadratura	No					
26/04/16	25 cm	S 54 km/h	4,3 m 11 seg SE	cuadratura	Si algo	45 cm	S 54 km/h	4,3 m 11 seg SE	cuadratura	Si algo
28/04/16	< 20 cm	S 37km/h	2,7 m 12 seg SE	cuadratura	No	30 cm	S 37 km/h	2,7 m 12 seg SE	cuadratura	No
31/05/16	15 cm	SE 53 km/h	3,9 m 11seg SE	sicigia	Si mucho	<30 cm	SE 53 km/h	3,9 m 11 seg SE	sicigia	Si mucho
07/06/16	35 cm	SO 55 km/h	3,9 m 10 seg S	sicigia	Si poco	<30 cm	SO 55 km/h	3,9 m 10 seg S	sicigia	Si poco
8/06/16	20 cm	SO 44 km/h	3,7 m 10 seg S	sicigia	No	15 cm	SO 44 km/h	3,7 m 10 seg S	sicigia	No
9/06/16	20 cm	SO 42 km/h	3,1 m 9 seg SE	sicigia	Si poco	15 cm	SO 42km/h	3,1 m 9 seg SE	sicigia	Si poco
10/06/16	15 cm	SO 38 km/h	3,1 m 11 seg SE	sicigia	No	10 cm	SO 38 km/h	3,1 m 11 seg SE	sicigia	No
13/08/16	<20 cm	SO-O 35km/h	1,4 m 11 seg S	cuadratura	No					
23/09/16	20 cm	SO 37 km/h	3 m 9 seg S	sicigia	No	<30 cm	SO 37 km/h	3 m 9 seg S	sicigia	No
3/11/16	<20 cm	O 47 km/h	1,6 m 5 seg O	sicigia	No					
11/11/16	<15	SO	2,5 m	cuadratura	No	10 cm	SO	2,5 m	cuadratura	No

	cm	33 km/h	11 seg S	ura			33 km/h	11 seg S	ura	
14/11/16	40 cm	O 61 km/h	2,3 m 7 seg O	sicigia	No	15 cm	O 61 km/h	2,3 m 7 seg O	sicigia	No
15/11/16						10 cm	SO 47 km/h	2,1 m 7 seg SO	sicigia	No
5/12/16	<30 cm	SO 55 km/h	3,2 m 7 seg SO	cuadrat ura	No	25 cm	SO 55 km/h	3,2 m 7 seg SO	cuadrat ura	No
12/12/16	<30 cm	SO 62 km/h	3 m 8 seg SO	sicigia	Si algo	25 cm	SO 62 km/h	3 m 8 seg SO	sicigia	Si algo
14/12/16	<40 cm	SO 32 km/h	3 m 11 seg S	sicigia	No	40 cm	SO 32 km/h	3 m 11 seg S	sicigia	No

Tabla 3. Fechas de inundaciones en st3 y st4 con sus características de altura de inundación, viento, olas, marea y precipitaciones del año 2017. Fuente: WindGuru Pro e interpretación de las tablas de Marea del Servicio de Hidrografía Naval (SHN).

St3						St4				
Fecha	Altura inundación	Viento	Olas	Marea	Lluvia	Altura inundación	Viento	Olas	Marea	Lluvia
12/01/17	20 cm	NO-O 40 km/h	1,3 m 6 seg NE	sicigia	No					
4/02/17	<20 cm	SE 52 km/h	2,7 m 7 seg SE	sicigia	Si algo	20 cm	SE 52 km/h	2,7 m 7 seg SE	sicigia	Si algo
8/02/17	<20 cm	NO 35 km/h	1,5 m 6 seg NE	sicigia	Si algo	10 cm	NO 35 km/h	1,5 m 6 seg NE	sicigia	Si algo
18/02/17	30 cm	O-SO 51 km/h	2,3 m 8 seg O-SO	cuadrat ura	No					
19/02/17	30 cm	O-NO 44 km/h	1,6 m 7 seg O	cuadrat ura	No					
2/03/17	15 cm	NO-SO 45 km/h	1,7 m 5 seg NO	cuadrat ura	No					
10/03/17	30 cm	SO 55 km/h	3,3 m 9 seg SO	sicigia	No	15 cm	SO 55 km/h	3,3 m 9 seg SO	sicigia	No
11/04/17	20 cm	SO 47 km/h	3,3 m 10 seg S	sicigia	No	10 cm	SO 47 km/h	3,3 m 10 seg S	sicigia	No
12/04/17	15 cm	SO 29 km/h	2,8 m 10 seg	sicigia	No	10 cm	SO 29 km/h	2,8 m 10 seg	sicigia	No

			S					S		
26/05/17	35 cm	SO 37 km/h	2,3 m 10 seg SO	sicigia	No	45 cm	SO 37 km/h	2,3 m 10 seg SO	sicigia	No
4/06/17	10 cm	SO 47 km/h	2,3 m 7 seg SO	cuadratura	No					
5/06/17	10 cm	SO-O 29 km/h	1,8 m 10 seg SO	cuadratura	No					
9/06/17	15 cm	O-SO 50 km/h	1,9 m 6 seg O-SO	sicigia	No					
11/06/17	10 cm	SO 48 km/h	3 m 8 seg SO	sicigia	No					
18/06/17	10 cm	SO 89 km/h	6,2 m 12 seg SE	sicigia	Si mucho	30 cm	SO 89 km/h	6,2 m 12 seg SE	sicigia	Si mucho
29/06/17	10cm	NO- SSO 50 km/h	2,3 m 6 seg O	sicigia	No					
30/06/17	10cm	SO 35 km/h	2,5 m 8 seg S-SO	sicigia	No					
15/07/17	20 cm	SE 56 km/h	3,4 m 8 seg SE	sicigia	Si algo	35 cm	SE 56 km/h	3,4 m 8 seg SE	sicigia	Si algo
12/08/17						10 cm	SO 17 km/h	2,7 m 12 seg E-SE	sicigia	No
14/08/17	<15cm	O-SO 38 km/h	2,6 m 9 seg SO	sicigia	No					
16/08/17	<15cm	NO 26 km/h	1,7 m 8 seg SO	sicigia	No					
19/08/17	20 cm	SO 39 km/h	2,2 m 7 seg O	sicigia	No	10 cm	SO 39 km/h	2,2 m 7 seg O	sicigia	No
30/09/17						10 cm	N-NO 24 km/h	1 m 6 seg NE	cuadratura	Si algo
4/10/17	35 cm	O 45 km/h	2,1 m 6 seg NO	cuadratura	No	20 cm	O 45 km/h	2,1 m 6 seg NO	cuadratura	No
5/10/17	20 cm	O-NO 46 km/h	2,1 m 6 seg O	cuadratura	No					
18/11/17	35 cm	SO 36 km/h	3,8 m 11 seg S	sicigia	No					
19/11/17	10 cm	SO	2,9 m	sicigia	No					

		40 km/h	9 seg S							
20/11/17	28 cm	SO 36 km/h	2,5 m 12 seg S	sicigia	No					
21/11/17	10 cm	O-SO 14 km/h	2,6 m 11 seg S	sicigia	No					
24/11/17	10 cm	SO 28 km/h	3,4 m 11 seg S	cuadratura	No					

Tabla 4. Fechas de inundaciones en st3 y st4 con sus características de altura de inundación, viento, olas, marea y precipitaciones del año 2018. Fuente: WindGuru Pro e interpretación de las tablas de Marea del Servicio de Hidrografía Naval (SHN).

St3						St4				
Fecha	Altura inundación	Viento	Olas	Marea	Lluvia	Altura inundación	Viento	Olas	Marea	Lluvia
03/01/18	10 cm	O-SO 42 km/h	1,4 m 6 seg SE	sicigia	No					
30/01/18	15 cm	NO-SO 47 km/h	2,1 m 6 seg NO-SO	sicigia	No					
09/02/18	15 cm	SO 44 km/h	2,3 m 7 seg SO	cuadratura	No					
10/02/18	<15cm	SO 35 km/h	2,5 m 7 seg SO	cuadratura	Si algo					
11/02/18	<15cm	SO 26 km/h	2,3 m 9 seg S	cuadratura	No					
12/02/18	20 cm	NO-O-SO 38 km/h	1,9 m 6 seg NO-SO	cuadratura	No					
07/03/18	10 cm	NO 32 km/h	1,1 m 5 seg NO	sicigia	No					
10/03/18						10 cm	SE 34 km/h	1,8 m 6 seg SE	cuadratura	Si bastante
12/03/18	<15cm	NO-SO 43 km/h	2,2 m 9 seg SE	cuadratura	No					
14/03/18	10 cm	NO-O-SO 38 km/h	1,7m 6 seg O	cuadratura	Si algo					
25/03/18	10 cm	SO 25 km/h	1,7 m 7 seg SE	sicigia	No					

28/03/18	10 cm	NO 37 km/h	1,6 m 5 seg NO	sicigia	No					
04/04/18	25 cm	NO 44 km/h	1,8 m 5 seg NO	sicigia	No					
10/04/18	10 cm	NO 39 km/h	1,8 m 5 seg NO	cuadratura						
12/04/18	10 cm	SO 35 km/h	2,3 m 7 seg SO	cuadratura						
27/04/18	10 cm	SO 35 km/h	2 m 7 seg SO	sicigia						
30/04/18	15 cm	S 30 km/h	1,8 m 8 seg S	sicigia						
7/05/18						15 cm	NE 17 km/h	1 m 7 seg SE	cuadratura	Si mucho
11/05/18						10 cm	SO 33km/h	1,6 m 6 seg SO	cuadratura	No
17/05/18						10 cm	N 18 km/h	1,2 m 8 seg SO	sicigia	Si bastante
31/05/18						10 cm	SE 16 km/h	1,1 m 7 seg S	sicigia	Si algo
7/06/18	10 cm	SO 40 km/h	2,9 m 9 seg SO	cuadratura	No	10 cm	SO 40 km/h	2,9 m 9 seg SO	cuadratura	No
12/06/18						10 cm	S 29 km/h	1,5 m 7 seg S-SE	cuadratura	Si bastante
21/06/18	28 cm	SO 50 km/h	3,7 m 10 seg SO	sicigia	No	30 cm	SO 50 km/h	3,7 m 10 seg SO	sicigia	No
22/06/18	29 cm	O 37 km/h	2,2 m 7 seg SO	sicigia	No	25 cm	O 37 km/h	2,2 m 7 seg SO	sicigia	No
23/06/18	70 cm	SO 47 km/h	4,1 m 11 seg SO-S	sicigia	No	90 cm	SO 47 km/h	4,1 m 11 seg SO	sicigia	No
24/06/18	33 cm	NO 33 km/h	2,9 m 11 seg S	sicigia	No	25 cm	NO 33 km/h	2,9 m 11 seg S	sicigia	No
25/06/18	10 cm	SO 30 km/h	1,9 m 8 seg SO	sicigia	No	20 cm	SO 30 km/h	1,9 m 8 seg SO	sicigia	No

Tabla 5. Inundaciones anuales diferenciadas por eventos producidos en marea de sicigia o marea de cuadratura. Inundaciones totales sin diferenciar.

st3 y st4	2015	2016	2017	2018	Total
sicigia	5	9	9	5	28
cuadratura	2	4	1	1	8
Total	7	13	10	6	36

Tabla 6. Cantidad de días en cada dirección de viento y velocidad media promedio (km/h) en los 36 eventos de inundación.

Dirección del viento	Cantidad de días en cada dirección	Velocidad media promedio (km/h)
N	0	0
NE	0	0
E	0	0
SE	3	53,7
S	2	45,5
SO	26	46,4
O	3	47,7
NO	2	34

Tabla 7. Cantidad de días en cada dirección de olas en los 36 eventos de inundación.

Dirección de las olas	Cantidad de días en cada dirección
N	0
NE	2
E	0
SE	8
S	11
SO	12
O	2
NO	1

Tabla 8. Altura (m) y período (seg) de ola en los 36 eventos de inundación a lo largo de los 4 años de estudio. Fuente: WindGuru Pro.

2015		2016		2017		2018	
Altura (m)	Período (seg)						
3,4	10	4,3	11	2,7	7	2,9	9
3,6	12	2,7	12	1,5	6	3,7	10
2,6	9	3,9	11	3,3	9	2,2	7
3	9	3,9	10	3,3	10	4,1	11
4	9	3,7	10	2,8	10	2,9	11
3,6	10	3,1	9	2,3	10	1,9	8
3,1	8	3,1	11	6,2	12		
		3	9	3,4	8		
		2,5	11	2,2	7		
		2,3	7	2,1	6		
		3,2	7				
		3	8				
		3	11				

Tabla 9. Altura de ola (m) cada 3 horas desde el 19 de Junio al 25 de Junio de 2018. Fuente: WindGuru Pro.

19-jun	20-jun	21-jun	22-jun	23-jun	24-jun	25-jun
1	1,4	1,7	1,9	1,9	2,9	1,9
1,2	1,3	2	1,8	2,7	2,6	1,7
1,3	1,2	2,7	1,9	3,3	2,4	1,7
1,4	1,1	3,7	2	3,7	2,2	1,8
1,2	1,2	3,7	2,2	4,1	2,1	1,8
1,2	1,4	3,2	2,2	3,9	2,1	1,7
1,4	1,5	2,7	1,9	3,5	2,1	1,6
1,4	1,6	2,2	1,7	3,2	2	1,5

Tabla 10. Velocidad media del viento (km/h) cada 3 hs desde el 19 de Junio al 25 de Junio de 2018. Fuente: WindGuru Pro.

19-jun	20-jun	21-jun	22-jun	23-jun	24-jun	25-jun
27	18	34	20	28	22	26
31	12	35	27	45	24	25
29	14	45	32	47	22	20
28	17	50	33	44	24	25
31	25	48	37	47	25	30
27	31	42	36	43	33	25
29	24	28	21	32	31	17
16	32	18	16	27	31	27