

## DESCRIPCIÓN DE ONDAS DE GRAVEDAD ATMOSFÉRICAS EN LA COSTA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA

Iael Pérez<sup>1,2</sup>, Walter Dragani<sup>1,2,3,5</sup>, Marcos Saucedo<sup>4</sup>, Alejandro Godoy<sup>4,6</sup>, Bibiana Cerne<sup>3,5</sup> y Paula Martín<sup>1,2,7</sup>

<sup>1</sup>Servicio de Hidrografía Naval (Ministerio de Defensa)

<sup>2</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

<sup>3</sup>Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN/UBA)

<sup>4</sup>Servicio Meteorológico Nacional (Ministerio de Defensa)

<sup>5</sup>Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (UMI IFAECI/CNRS-CONICET/CIMA/UBA)

<sup>6</sup>Universidad Nacional de la Plata (UNLP)

<sup>7</sup>Departamento de Geografía (FFyL/UBA)

(Manuscrito recibido el 13 de marzo de 2018, en su versión final el 27 de septiembre de 2018)

### RESUMEN

En este trabajo se estudiaron las perturbaciones de la presión atmosférica en alta frecuencia (ondas de gravedad atmosféricas, OGA) registradas en Mar del Plata durante 2013. Mediante el análisis realizado con el método espectral wavelets se obtuvo que las duraciones de los lapsos de actividad, la estructura espectral, la intensidad energética y las amplitudes de las OGA son diferentes para cada evento. En general, los eventos activos duran entre 5 y 20 h y las máximas fluctuaciones de presión están comprendidas entre 0.5 y 2 hPa, con periodicidades típicas entre 30 y 150 min. De los 37 casos de OGA detectados se encontró que 24 están asociados a frentes fríos, 9 a frentes cálidos, y 4 están relacionados con otros forzantes sinópticos. Se encontró que la mayoría de los eventos ocurren cuando la zona frontal se ubica al N de la Patagonia y se desplaza hacia el E o NE. Se utilizó el modelo Weather Research and Forecasting (WRF) para simular dos casos. En el primero se observó un frente frío y un ciclón en superficie al S de la provincia de Buenos Aires y sobre el océano mientras que en el segundo, un frente cálido al S de Buenos Aires que luego se desplazó hacia el NO como frente frío. Los resultados obtenidos con el modelo WRF indicarían que la dirección predominante de propagación de OGA en la región costera bonaerense sería hacia el E-NE, discrepando con los escasos antecedentes disponibles para la región que indican que la dirección de propagación sería hacia el ESE-SE.

*Palabras clave: Ondas de gravedad atmosféricas; modelado numérico; modelo WRF; costa de la provincia de Buenos Aires*

## DESCRIPTION OF ATMOSPHERIC GRAVITY WAVES IN THE BUENOS AIRES COAST, ARGENTINA

### ABSTRACT

High-frequency perturbations of the atmospheric pressure (atmospheric gravity waves, AGW) measured at Mar del Plata in 2013 are studied in the present paper. Implementing the wavelet spectral method it was obtained that the duration of the active lapses, the spectral structure, the energy and the amplitudes of AGW are different for each event. It was found that, in general, active events last between 5 and 20 h and that the maximum pressure fluctuations range between 0.5 and 2 hPa, with typical oscillations between 30 and 150 min. From the 37 active cases of AGW, it was established that 24 are associated with cold fronts, 9 with warm fronts, and 4 are related to other synoptic systems. It was found that most of the events occur when the frontal zone is located at the northern Patagonia and moves towards the E or NE. The Weather Research and Forecasting (WRF) model was implemented and two cases were simulated. In the first case, a cold front and a cyclone located at the southern Buenos Aires Province and on the ocean were observed. In contrast, in the second case, a warm front was observed at the southern Buenos Aires Province, which then moved towards the NW as a cold front. The results achieved with the WRF model indicate that the predominant direction of propagation in the coastal region of Buenos Aires could be towards E-NE, in disagreement with the available scarce background for the region indicating that the direction of propagation could be towards the ESE-SE.

*Keywords: Atmospheric gravity waves; numerical modeling; WRF model; Buenos Aires coast province*

## 1. INTRODUCCIÓN

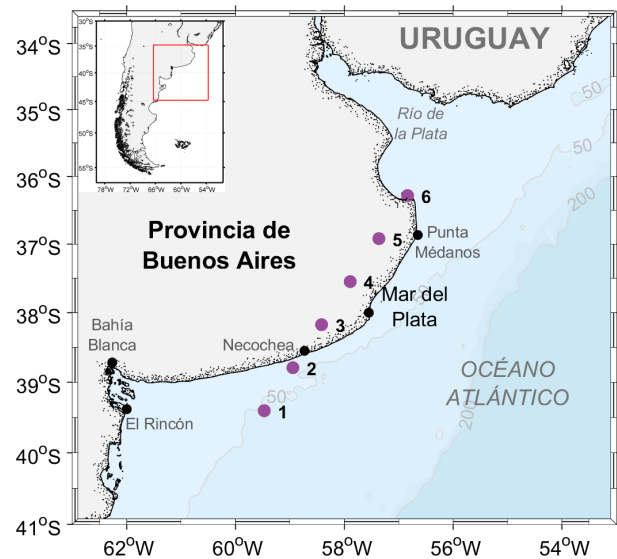
Las ondas de gravedad atmosféricas (OGA) constituyen un importante mecanismo para el transporte vertical de energía y cantidad de movimiento. Las OGA pueden ser producidas por distintas fuentes tales como la orografía (Long, 1955; Lilly y Kennedy, 1973), la convección (Alexander y otros, 1995; Fovell, 2002), la convección profunda (Hoffmann y Alexander, 2010), el ajuste geostrófico en regiones de inestabilidad baroclínica (Fritts y Luo, 1992; O'Sullivan y Dunkerton, 1995; Chagnon y Bannon, 2005, entre otros), la inestabilidad por cortante vertical (Mastrantonio y otros, 1976; Shen y Lin, 1999), y el pasaje de sistemas frontales (Gall y otros, 1988; Reeder y Griffiths, 1996). Estas ondas son importantes para la determinación de la estructura térmica de la atmósfera baja y media (Lindzen and Tung, 1976) y sus características principales se conocen desde hace varias décadas (Queney, 1948; Scorer, 1949; Gossard and Munk, 1954; Palm, 1955; Sawyer, 1959). Para avanzar en su conocimiento es necesario estudiar no sólo los mecanismos

por los cuales se generan sino también sus características, distribución y variabilidades (Zhang, 2004). Para el caso de pasajes frontales, Uccellini y Koch (1987) presentaron un modelo conceptual del entorno sinóptico en que se desarrollan las OGA. Dichos autores las ubican en la región comprendida entre el punto de inflexión de la parte delantera de vaguada y el eje de cuña en el nivel de 300 hPa, el cual se posiciona respecto a superficie, del lado frío de la superficie frontal. Además los autores consideran un ingrediente fundamental la ubicación de la corriente en chorro de altura, ya que se ha encontrado que las OGA se desarrollan a la salida del "jet streak" (donde el flujo es fuertemente difluente y desbalanceado) ubicada generalmente en la región descrita anteriormente. Más recientemente Plougonven y Zhang (2013) presentaron una revisión acerca del estado del conocimiento actual de las OGA en inmediaciones de jets y frentes basada en observaciones de campo, teoría y modelado.

En Argentina, el estudio de las OGA asociadas a

la orografía ha sido investigado, por ejemplo, por De la Torre y otros (2012). Sin embargo, existe tan sólo un trabajo en la región concerniente a la relación entre las OGA y los pasajes frontales (Nuñez y otros, 1998). Dichos autores estudiaron un evento de OGA de gran amplitud en la costa de la provincia de Buenos Aires ocurrido en octubre de 1985 que dio lugar a un meteotsunami en la región. En dicho estudio se analizaron las dos únicas series disponibles de presión atmosférica (análogicas) de alta resolución, cuya longitud es de aproximadamente dos días, obtenidas en los faros Punta Médanos y El Rincón (Figura 1). Se encontró que los picos de energía espectral estaban predominantemente ubicados entre 40 min y 2 h. Por otro lado, utilizando la función coherencia concluyeron que se trataba de un fenómeno regional y que la situación sinóptica durante el evento mostró la presencia de un frente frío en superficie y la corriente en chorro en altura. Este resultado coincide con el señalado por Uccellini y Koch (1987). Al presente no existen estudios locales que hagan uso de modelos numéricos para estudiar el desarrollo de las OGA en la costa bonaerense. Sin embargo, en otras regiones estas ondas fueron modeladas en las escalas sub-sinóptica de 100 a 600 km (por ejemplo, O'Sullivan y Dunkerton, 1995) y en la meso escala de 50 a 500 km (Zhang, 2004, entre otros).

Existen evidencias que sostienen que el campo bórico asociado a las OGA constituiría el forzante de los meteotsunamis en la costa bonaerense (Dragani y otros, 2002; Dragani, 2007). Sin embargo los estudios sobre la física de las OGA en esta región son muy escasos (Nuñez y otros, 1998). El objetivo del presente trabajo es realizar una descripción preliminar acerca de la duración típica de los eventos de OGA, las amplitudes máximas de presión atmosférica asociada, el rango de periodicidades esperable y la dirección de propagación de estas ondas en la costa bonaerense. Asimismo, examinar si durante el desarrollo de cada uno de los casos de OGA se observa la presencia de una zona frontal en la región de estudio y explorar la capacidad del modelo Weather Research and Forecasting



*Figure 1:* Costa bonaerense argentina. Se indican con puntos violetas (1-6) los sitios ubicados a lo largo de una transecta orientada SSO-NNE, a lo largo de la cual se analizaron las fluctuaciones de presión en alta frecuencia simuladas. En el ángulo superior izquierdo se indica con un recuadro rojo el dominio computacional del modelo WRF implementado.

(WRF) para representarlas. Se espera que los resultados de este trabajo constituyan las bases para una futura investigación permitiendo la implementación de OGA como forzantes de un modelo de generación de tsunamis meteorológicos en la región de la plataforma continental bonaerense.

## 2. DATOS Y METODOLOGÍA

Los datos de presión atmosférica utilizados en el presente estudio fueron obtenidos con una estación meteorológica Davis con el sensor ubicado aproximadamente a 10 m sobre el nivel del mar y con frecuencia de muestreo 1 min. Dicho instrumento estuvo instalado en el Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP, 38.03° S, 57.53° O), situado en Mar del Plata (Figura 1), y registró entre enero y diciembre de 2013. El equipo midió con una resolución de 0.1 hPa y con una precisión de  $\pm 1,0$

hPa (<http://www.davisnet.com/product/vantage-vue-wireless-weather-station/>). Si bien se propuso medir durante todo el 2013, es necesario destacar que los registros de presión atmosférica presentan lapsos relativamente largos con datos faltantes. Se utilizaron además datos horarios de presión atmosférica de la estación Mar del Plata AERO (de aquí en más AERO, 37.56° S, 57.35° O, altura del sensor 21 m sobre el nivel del mar) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) ubicada aproximadamente a 12 km al NNO del INIDEP, para realizar el control de la evolución de la presión en escala sinóptica registrada en el INIDEP. La serie de datos de presión de la estación del SMN no presentó datos faltantes y se asumió valedero el control de calidad realizado por dicha institución.

Por otro lado, con el fin de detectar la posible presencia de frentes en los eventos de OGA se analizaron observaciones, cartas sinópticas de superficie e imágenes de satélite GOES-13 del SMN. Con los datos indicados en las cartas sinópticas (presión, temperatura, viento, humedad y nubosidad) registrados en las estaciones del SMN y con las isobaras se identificaron las regiones de discontinuidad frontal. Se complementó el análisis con las cartas correspondientes a los campos iniciales del modelo ETA-SMN, las cuales permitieron observar con mayor detalle las zonas frontales. Además, se exploró la estructura tridimensional de los sistemas atmosféricos utilizando campos de variables meteorológicas en diferentes niveles para verificar la presencia de frentes. Finalmente, se emplearon imágenes de satélites para complementar la información de la nubosidad asociada a los sistemas frontales. Esto permitió ubicar con mayor exactitud la posición de los frentes, principalmente en la región oceánica, donde no hay observaciones de superficie.

Sobre la serie de datos de presión de alta resolución (obtenidos con la estación meteorológica Davis) se realizó un estricto control de calidad. En primer lugar se eliminaron unos pocos datos espurios presentes en la serie (<1%). Seguidamente se excluyeron algunos

pocos datos que estaban fuera de rango (valores espurios), es decir, que la diferencia entre el valor anterior o posterior al dato superaba dos veces el desvío estándar correspondiente a la serie (<1% de la cantidad total de datos). En ambos casos los datos descartados fueron reemplazados por valores interpolados linealmente entre el dato anterior y posterior al eliminado. Luego, se detectaron breves lapsos con intervalo de muestreo diferente a 1 min los cuales estaban asociados a problemas intrínsecos del instrumento. Dichos lapsos no fueron considerados para el análisis resultando así seis períodos de datos, entre 30 y 40 días aproximadamente, tal como se indica en la Tabla I. Finalmente, las series de datos de alta resolución se contrastaron con los valores horarios obtenidos en la estación AERO. La comparación indica que ambas series (Davis y AERO) muestran una diferencia constante de aproximadamente 8 hPa, no atribuible al desnivel entre ambas estaciones. Sin embargo se observó que ambas series poseen variabilidades horarias similares en el comportamiento de la presión. Luego de algunos ensayos, se diseñó un filtro de Hamming de 251 elementos (Hamming, 1977) del tipo pasa-altos, con período de corte 3 h. Mediante la convolución entre dicho filtro y la serie de datos de presión se retuvieron las perturbaciones de alta frecuencia correspondientes a las OGA. Dicha diferencia de 8 hPa, probablemente atribuible a una incorrecta configuración de la estación Davis (“off set”), no es relevante para el desarrollo de este estudio dado que se trabaja con la serie filtrada, es decir, con perturbaciones de altas frecuencias.

Previamente al filtrado numérico, sobre la serie de presión atmosférica se aplicaron técnicas espectrales y se detectó la presencia de la onda de marea semidiurna. El calentamiento de la atmósfera debido a la radiación solar combinado con los procesos turbulentos de calentamiento desde el suelo genera ondas internas con períodos diurnos y semidiurnos (Lindzen y Chapman, 1969). Estas ondas causan oscilaciones regulares en los campos de viento, temperatura y presión, las cuales se conocen

Período	Caso	Fecha DD/MM	Duración (h)	Máx. fluct. (hPa)	Frentes de superficie en la región
I 20/02 - 21/03	1	23/feb	16.5	1.2	Frente frío al S de Buenos Aires
	2	24/feb	12.9	1.7	Frente frío en el centro de Buenos Aires
	3	1/mar	39.8	1.5	Frente cálido al S de Buenos Aires
	4	9/mar	11.4	1.2	Frente frío al N de la Patagonia
II 23/03 - 29/04	5	24/mar	16.8	1.9	Frente frío al N de la Patagonia
	6	4/abr	12.0	1.5	No se observa
	7	11/abr	13.3	1.7	Frente frío al N de la Patagonia
	8	27/abr	12.8	1.2	Frente frío al N de Buenos Aires
III 28/05 - 01/07	9	28/may	17.3	2.1	Frente frío en el centro del país
	10	29/may	3.8	0.6	Frente frío al N de Buenos Aires
	11	1/jun	19.4	1.6	Frente frío al N de la Patagonia
	12	27/jun	12.3	2.1	Frente frío al N de la Patagonia
IV 12/08 - 21/09	13	20/ago	14.8	3.4	Frente cálido al N de Buenos Aires
	14	27/ago	7.7	0.8	Frente frío al N de la Patagonia
	15	31/ago	8.0	1.0	Frente frío al N de la Patagonia
	16	2/sep	12.0	1.1	Frente frío en el centro de Buenos Aires
	17	4/sep	8.8	1.0	Frente frío al N de la Patagonia
	18	6/sep	13.9	1.2	Frente cálido en el centro de Buenos Aires
	19	7/sep	12.3	1.0	Frente cálido al S de Buenos Aires
	20	9/sep	12.0	1.7	Frente frío al N de la Patagonia
	21	10/sep	45.7	5.2	Frente cálido al N de Buenos Aires
	22	12/sep	7.7	0.8	No se observa
	23	15/sep	6.3	0.9	No se observa
V 12/11 - 30/11	24	14/nov	23.7	2.2	Frente frío al N de la Patagonia
	25	18/nov	14.2	1.5	Frente frío al N de la Patagonia
	26	19/nov	12.0	1.1	Frente frío al N de Buenos Aires
	27	22/nov	13.7	1.6	Frente frío al N de la Patagonia
	28	23/nov	12.1	1.4	Frente frío al S de Buenos Aires
	29	24/nov	14.6	2.9	Frente frío al N de la Patagonia
	30	26/nov	9.8	0.8	No se observa
	31	30/nov	16.2	1.9	Frente cálido al S de Buenos Aires
VI 01/12 - 21/12	32	1/dic	3.9	0.5	Frente cálido al S de Buenos Aires
	33	1/dic	15.9	4.1	Frente frío al N de la Patagonia
	34	2/dic	12.1	1.4	Frente frío al N de la Patagonia
	35	7/dic	12.8	4.2	Frente cálido en el centro de Buenos Aires
	36	13/dic	15.0	1.8	Frente cálido al S de Buenos Aires
	37	17/dic	13.3	1.1	Frente frío al N de la Patagonia

Table I: Fecha en la que se centra la actividad de OGA, duración (h) del caso, máxima fluctuación (diferencia entre la máxima y la mínima presión atmosférica de la fluctuación, hPa), y presencia o no de frente en superficie para cada caso de actividad de OGA en Mar del Plata (2013). Las filas en gris corresponden a los casos simulados con el modelo WRF.

como mareas en la atmósfera, que para el caso de la presión recibe el nombre de marea barométrica. En la región de estudio la mayor caída horaria de la presión media anual es de 2 hPa aproximadamente (Possia y otros, 2014). Dicha componente semidiurna se estimó utilizando la técnica mínimos cuadrados mediante el ajuste de una onda sinusoidal y fue filtrada de la serie de datos. En el presente estudio se obtuvo una variación barométrica comprendida entre 1 y 1.4 hPa, dependiendo del período analizado.

Para estudiar la estructura espectral en alta

frecuencia de la presión atmosférica en Mar del Plata se computaron, en primera instancia, los espectros (FFT) sobre series contiguas de 40 h de duración y se les aplicó un suavizado basado en la técnica de promedios móviles. Según Torrence y Campo (1998) el análisis espectral clásico (FFT) no es la herramienta más apropiada para el estudio de señales transitorias. Esto es así ya que, en una señal transitoria, la densidad de energía espectral estimada para una frecuencia particular resulta distorsionada debido a que se superponen contribuciones correspondientes a lapsos de fuerte, mediana y débil actividad de OGA, y de calmas. Una herramienta espectral que contempla la variabilidad de la señales es la técnica wavelet, la cual es útil para describir perturbaciones de presión atmosférica de pequeña amplitud (Tanaka y otros., 2014). El análisis espectral a través de wavelets se ha tornado en una herramienta muy útil para estudiar variaciones de energía localizadas en series temporales. Una de las ventajas de utilizar la técnica wavelet es que permite estudiar procesos de varias escalas sobre un dominio finito (Lau y Weng, 1995). A diferencia de la FFT posee la capacidad de tratar comportamientos no-estacionarios (Daubechies, 1990). La descomposición de series temporales en tiempo-frecuencia permite estudiar tanto los modos dominantes de variabilidad de la serie original, como así también las variaciones temporales de éstos (Torrence y Campo, 1998). Los wavelets constituyen una herramienta frecuentemente utilizada en estudios que incluyen la descripción de fenómenos no estacionarios y se utilizaron en numerosos trabajos en las áreas de las ciencias de la atmósfera como, por ejemplo, en estudios de la convección tropical (Weng y Lau, 1994), el ENSO (Gu y Philander, 1995; Wang y Wang, 1996) y en oceanografía para el análisis de meteotsunamis (Pérez y Dragani, 2017). Consecuentemente, en este trabajo también se aplicó el análisis espectral a través de wavelets para estudiar la serie de presión atmosférica de alta resolución, registrada en Mar del Plata en 2013 computado con el método de Morlet (Torrence y Campo, 1998). La ventaja de utilizar el método de Morlet fue

documentada en distintos trabajos como, por ejemplo, Lau y Weng (1995).

Se determinaron los lapsos de actividad de OGA para cada uno de los seis períodos mencionados (Tabla I) y se investigó la situación meteorológica asociada a cada uno. En las cartas sinópticas se distinguieron los sistemas frontales de superficie cercanos a Mar del Plata y otros patrones meteorológicos como sistemas de baja presión en superficie y altura. De esta manera, se pudo identificar para cada caso las masas de aire y los sistemas meteorológicos asociados a los eventos de OGA. A través de las imágenes de satélite se reconocieron los patrones nubosos asociados a los sistemas frontales. Finalmente se agruparon (subjetivamente) los casos con actividad de OGA según la situación sinóptica imperante. No fue posible utilizar metodologías estadísticas de agrupamiento de casos debido a que se dispone de tan solo un año de datos.

Al disponerse de tan solo un registro de presión atmosférica de alta resolución en Mar del Plata (Figura 1) no es factible determinar la dirección de propagación ni la estructura espacial de los campos de OGA a partir de las observaciones. Consecuentemente, se recurrió a la simulación numérica en alta resolución utilizando el modelo WRF-ARW (WRF) en la versión 3.3.1 (Skamarock y otros, 2008) con el que se diagnosticó la evolución del campo de presión atmosférica. El modelo WRF se utilizó satisfactoriamente en diversas partes del mundo para simular OGA como, por ejemplo, en el sector occidental de la cuenca Mediterránea (Costantino y otros, 2015), en Nueva Zelanda (Kruse y Smith, 2015) y en China (Su y Zhai, 2017). Particularmente, se usó en las islas Baleares para el estudio de la predictibilidad de meteotsunamis. En este caso las OGA simuladas con el modelo WRF sirvieron como forzante de un modelo oceánico (Renault y otros, 2011).

El modelo WRF se implementó en una retícula de 4 km (0.036°) de resolución horizontal y 43 niveles verticales sigma-p, con tope en 50 hPa. El dominio de simulación se extendió entre los

paralelos 34.8° S y 44.8° S, y entre los meridianos de 66.5° O y 53.5° O. Este dominio abarca todo el litoral atlántico bonaerense y parte de la costa patagónica, hasta el S de Chubut, junto con el océano adyacente. Las simulaciones se extendieron durante 48 h generando campos de presión atmosférica a nivel del mar, viento y tasa de precipitación cada 5 min. El modelo WRF fue inicializado y forzado en los bordes por el modelo de pronóstico operativo Global Forecasting System (GFS) el cual tiene una resolución horizontal de 0.5° y una temporal de 3 h.

Proceso	Esquema
Microfísica	WRF Single Moment (WSM) / 6 clases (Hong, 2004)
Capa límite	Mellor/Yamada/Janjic (Mellor y Yamada, 1982),(Janjic,2002)
Superficie	Modelo Noah/ 4 capas (Chen y Dudhia, 2001)
Radiación onda larga	RRTM (Mlawery, 1997)
Radiación onda corta	Dudhia (Dudhia, 1989)

Table II: Parametrizaciones utilizadas en el modelo WRF

El modelo WRF utiliza diversas parametrizaciones para representar fenómenos que ocurren a escala sub-reticular las cuales se describen en la Tabla II. Debido a que el modelo se implementó con alta resolución espacial, éste es capaz de representar explícitamente los procesos convectivos y, por lo tanto, no se utilizó una parametrización para la convección. Se destaca, además, que a fin de considerar la estabilización del modelo (procesos de "spin-up") las simulaciones fueron inicializadas al menos 6 h antes del comienzo del lapso analizado. Las series de presión atmosférica en cada uno de los nodos se filtraron con el mismo pasa-altos descripto precedentemente (filtro de Hamming). Por otro lado, a partir de este filtrado numérico se obtuvieron campos de presión en alta frecuencia (con períodos de hasta 3 h) asociados a las OGA.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Análisis y descripción espectral de las OGA

En la Figura 2.a y b se muestran, a modo de ejemplo, las series de presión observada

y filtrada para un período de noviembre de 2013, respectivamente. En la Figura 2.a se observa que la presión presenta una importante variabilidad en la escala sinóptica, con variaciones comprendidas entre 1007 y 1031 hPa, aproximadamente. Asimismo, pueden detectarse algunos lapsos en los que hay variabilidad de alta frecuencia (con períodos comprendidos entre algunos minutos y 3 h) los cuales se aprecian más claramente en la serie filtrada (Figura 2.b) donde las fluctuaciones de la presión superan los 2 hPa. En las Figuras 2.c y d se muestra un detalle de las Figuras 2.a y b, respectivamente, entre los días 14/11 01:00 y 16/11 00:00 en donde se puede apreciar un lapso con gran actividad de OGA. El comienzo de la actividad de OGA ocurre el 14/11 a las 18:00 (Figura 2.d) y se manifiesta durante un mínimo relativo de presión (Figura 2.c) asociado al pasaje de un frente frío por la región de estudio como se explicará más adelante.

Por otro lado, se muestra la estructura espectral en alta frecuencia de la presión atmosférica en Mar del Plata. A modo de ejemplo, en la Figura 3 pueden observarse tres espectros suavizados con promedios móviles de siete elementos. Los mismos corresponden a tres lapsos registrados en noviembre con diferentes características en la actividad de OGA (Figura 2.b). Puede apreciarse que los tres espectros tienen algunas características básicas similares, es decir, la mayor parte de la energía se concentra entre 0.33 y 2-3 ciclos por hora (cph). Sin embargo, cada uno presenta rasgos particulares. En el espectro de la Figura 3.a (14-16 de noviembre) se observan dos máximos distintivos, el mayor ubicado en 0.84 cph (1.18 h) y el otro en 1.34 cph (0.75 h). Los otros dos espectros (Figuras 3.b y c, 18-20 y 22-24 de noviembre, respectivamente) presentan estructuras más parecidas entre sí, con máximos espectrales ubicados en frecuencias un poco más bajas que el primer caso, aproximadamente en 0.5 cph (2 h).

Sobre la serie de presión atmosférica filtrada se calculó la varianza considerando lapsos consecutivos de 72 h. Luego de algunos ensayos

se estableció que el valor de varianza de 0.18 hPa<sup>2</sup> podría considerarse como el valor límite (umbral) para caracterizar preliminarmente el inicio de los lapsos de actividad de OGA. De esta manera se detectaron objetivamente 37 casos (Tabla I) en los cuales la varianza superó el umbral establecido. La duración de cada caso se calculó mediante la determinación de sus instantes iniciales y finales, identificando el comienzo y la finalización de oscilaciones bariométricas con amplitudes superiores a  $\pm 0,3$  hPa. El error cometido en este proceso es inferior a  $\pm 6$  min. En la Tabla I se presenta la duración del caso y la intensidad de la máxima fluctuación (medida entre el valle y la cresta, en hPa) para cada uno de los 37 eventos. Se observa que las duraciones están comprendidas entre 3.8 (evento 10) y 45.7 h (evento 21), notándose que la mayoría de los eventos duran entre 5 y 20 h. Las máximas perturbaciones de presión están comprendidas entre 0.5 (evento 32) y 5.2 (evento 21) hPa pero, en general, se encuentran entre 0.5 y 2 hPa. Estos resultados coinciden con los indicados por Nuñez y otros (1998) quienes hallaron amplitudes de hasta 2.5 hPa y frecuencias entre 0.5 y 2 cph para la misma región de estudio. Asimismo, son del orden de los descritos por Uccellini y Koch (1987) para Estados Unidos de Norte América con amplitudes comprendidas entre 0.2 y 7 hPa y períodos entre 1 y 4 h.

Como se comentara precedentemente, en la Figura 2.b se aprecia que la actividad de las OGA tiene un claro comportamiento transitorio, es decir, hay lapsos activos relativamente cortos separados por prolongados períodos de muy baja actividad. Para analizar esta señal transitoria se utilizó la técnica de wavelets cuyos resultados se muestran en las Figuras 4 a 9. Para facilitar el análisis de los resultados se presentan las series de presión filtrada (paneles superiores) y el wavelet correspondiente a cada una (paneles inferiores). En las Figuras 6 y 9 se destacan dos lapsos de intensa actividad de OGA los cuales fueron simulados numéricamente con el modelo WRF descrito en la Sección 2. En la Tabla I se indican los eventos clasificados según el tipo de situación sinóptica. Los eventos con actividad de OGA

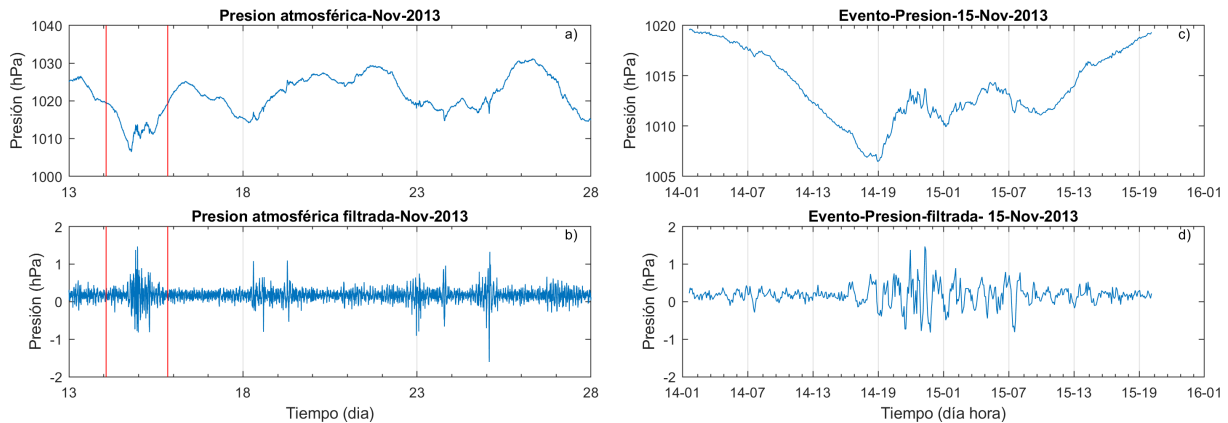


Figure 2: Series de presión atmosférica (a) observada y (b) filtrada, registrada en Mar del Plata en noviembre de 2013. En (c) y (d) se muestra un detalle ampliado, para el evento delimitado entre las líneas rojas.

pueden abarcar a más de un tipo de situación. Por ejemplo, los casos 32-34 comienzan con un frente caliente que luego evoluciona como frente frío que se desplaza hacia el NE.

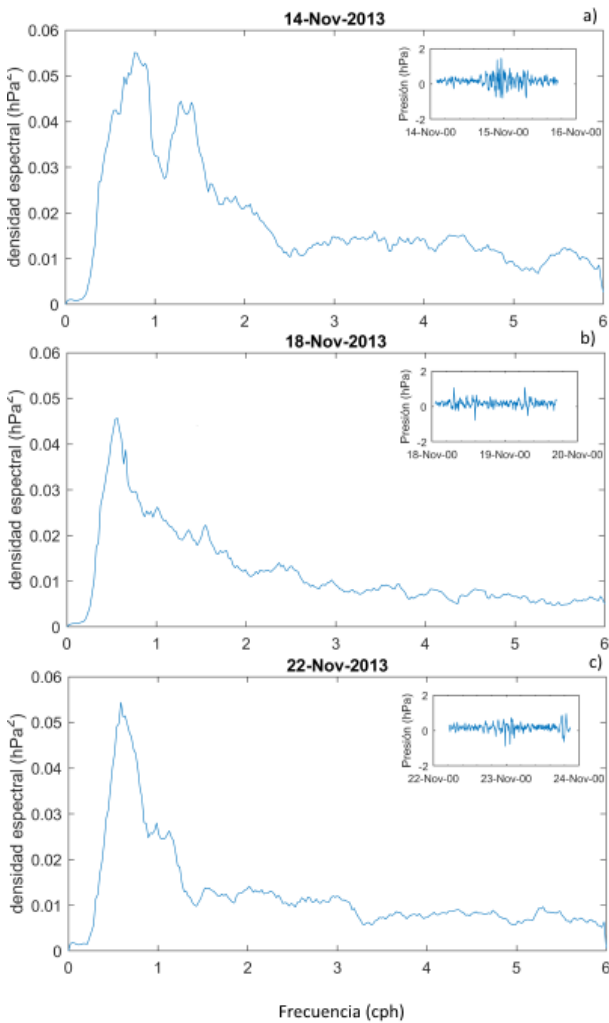
En la Figura 4 se observa que entre el 20 de febrero y el 21 de marzo ocurrieron tres lapsos con actividad de OGA (período I, casos 1-4, Tabla I). Primeramente, entre el 22 y 25 de febrero, puede observarse un lapso con amplitudes máximas ubicadas entre 30 y 150 min. Debe destacarse que en ese lapso se distinguen dos casos de actividad, con oscilaciones de hasta 2 hPa (casos 1 y 2, Tabla I). Luego de un prolongado lapso caracterizado por un nivel bajo de energía espectral, reaparece la actividad de OGA entre el 28 de febrero y el 3 de marzo (caso 3, Tabla I) en una banda de períodos similar a la del caso anterior. Finalmente, y luego de un período de muy baja actividad, el 6 de marzo se inicia un evento prolongado pero algo más difuso (caso 4, Tabla I). La amplitud máxima para este evento se observa el 10 de marzo, pero ésta es menor que la apreciada en los casos anteriores y cubre un rango de períodos comprendido entre 70 y 130 min.

En la Figura 5, correspondiente al lapso comprendido entre el 23 de marzo y el 30 de abril, se aprecian varios eventos de actividad de OGA pero menos definidos que en el lapso

anteriormente descrito (período II, casos 5-8, Tabla I). La determinación de los instantes de inicio y finalización son menos distinguibles ya que a lo largo de toda serie se dan pequeños eventos de moderada o baja actividad. Los tres eventos más importantes presentan su máximo nivel de energía el 25 de marzo, el 11 y el 27 de abril (casos 5, 7 y 8, respectivamente, Tabla I), caracterizados por una estructura espectral relativamente similar, es decir, concentrando la máxima energía en un lapso de tiempo relativamente pequeño, con períodos comprendidos entre 50 y 135 min.

La serie de presión filtrada y su respectivo wavelet correspondiente al período comprendido entre el 28 mayo y el 1 de julio se presenta en la Figura 6 (período III, casos 9-12, Tabla I). En la misma pueden detectarse tres eventos con relativamente alta actividad de OGA, con fluctuaciones de la presión de aproximadamente 2 hPa, con energía espectral distribuida entre 75 y 135 min (casos 9, 11 y 12, Tabla I). En la Figura 7 se muestra la serie de presión filtrada y su respectivo wavelet para el período comprendido entre el 12 de agosto y el 26 de septiembre (período IV, casos 13-23, Tabla I). Durante este lapso puede observarse dos eventos de OGA caracterizados por variaciones de la presión atmosférica en alta frecuencia de hasta 6 hPa. El primero, de unas pocas horas de





*Figure 3:* Espectros de la presión atmosférica para tres eventos de 40 h de duración para el mes de noviembre de 2013, (a) del 14 al 16, (b) del 18 al 20 y (c) del 22 al 23. Las frecuencias están dadas en ciclos por hora (cph).

duración, se registró el 20 de agosto y presenta contribuciones espectrales distribuidas entre 30 y 150 min (caso 13, Tabla I). El segundo evento, más prolongado, comienza el 10 de septiembre y contiene contribuciones espectrales entre 10 y 150 min (caso 21, Tabla I).

La serie de presión atmosférica filtrada y su correspondiente wavelet, para el período comprendido entre el 12 al 30 de noviembre, se presenta en la Figura 8 (período V, casos 24-31,

Tabla I). Tanto la estructura temporal como espectral de este período muestra una buena semejanza con la serie de tiempo y el wavelet de la Figura 4. Es decir, se observan varios eventos de actividad de OGA, separados por lapsos de relativamente baja energía. Si bien hay algunos eventos de débil actividad de OGA, pueden notarse tres eventos intensos. El primero está centrado en las últimas horas del 14 de noviembre (caso 24, Tabla I), el segundo se manifiesta el 24 de noviembre (caso 29, Tabla I) y el tercero el 29 de noviembre de 2013 (caso 31, Tabla I). Las fluctuaciones de presión son de hasta 2.5 hPa y las contribuciones espectrales aparecen entre 30 y 140 min. En cambio, los eventos más débiles presentan contribuciones espectrales en una banda más acotada, con periodicidades mayores a 60 min, aproximadamente. Finalmente, en la Figura 9 se muestra la serie de presión filtrada y el wavelet para el período comprendido entre el 1 y el 21 de diciembre de 2013 (período VI, casos 32-37, Tabla I). En este caso los eventos son breves pero claramente distinguibles. El primer evento puede observarse entre el 1 y 2 de diciembre (casos 32-34, Tabla I). Luego de unos días de relativamente baja actividad de OGA, el 7 de diciembre (caso 35, Tabla I) la energía espectral se intensifica abarcando casi toda la banda estudiada (10 a 150 min.). Posteriormente se registraron dos débiles eventos de OGA, el 13 y el 17 de diciembre, con contribuciones espectrales ubicadas en una banda de frecuencias relativamente acotada, asociada a períodos comprendidos entre 90 y 140 min., aproximadamente (casos 36 y 37, respectivamente, Tabla I).

Como se observa de las Figuras 4 a 9 y de la Tabla I, las OGA son un fenómeno relativamente frecuente en la región costera bonaerense. Puede apreciarse que las OGA no se manifiestan siempre con las mismas características. Es decir, las duraciones de los lapsos de actividad, la estructura espectral, la intensidad energética y las amplitudes son muy diferentes para cada caso. Finalmente, se realizó un análisis exploratorio particular sobre cada uno de los eventos y se observó que en algunos de ellos la actividad

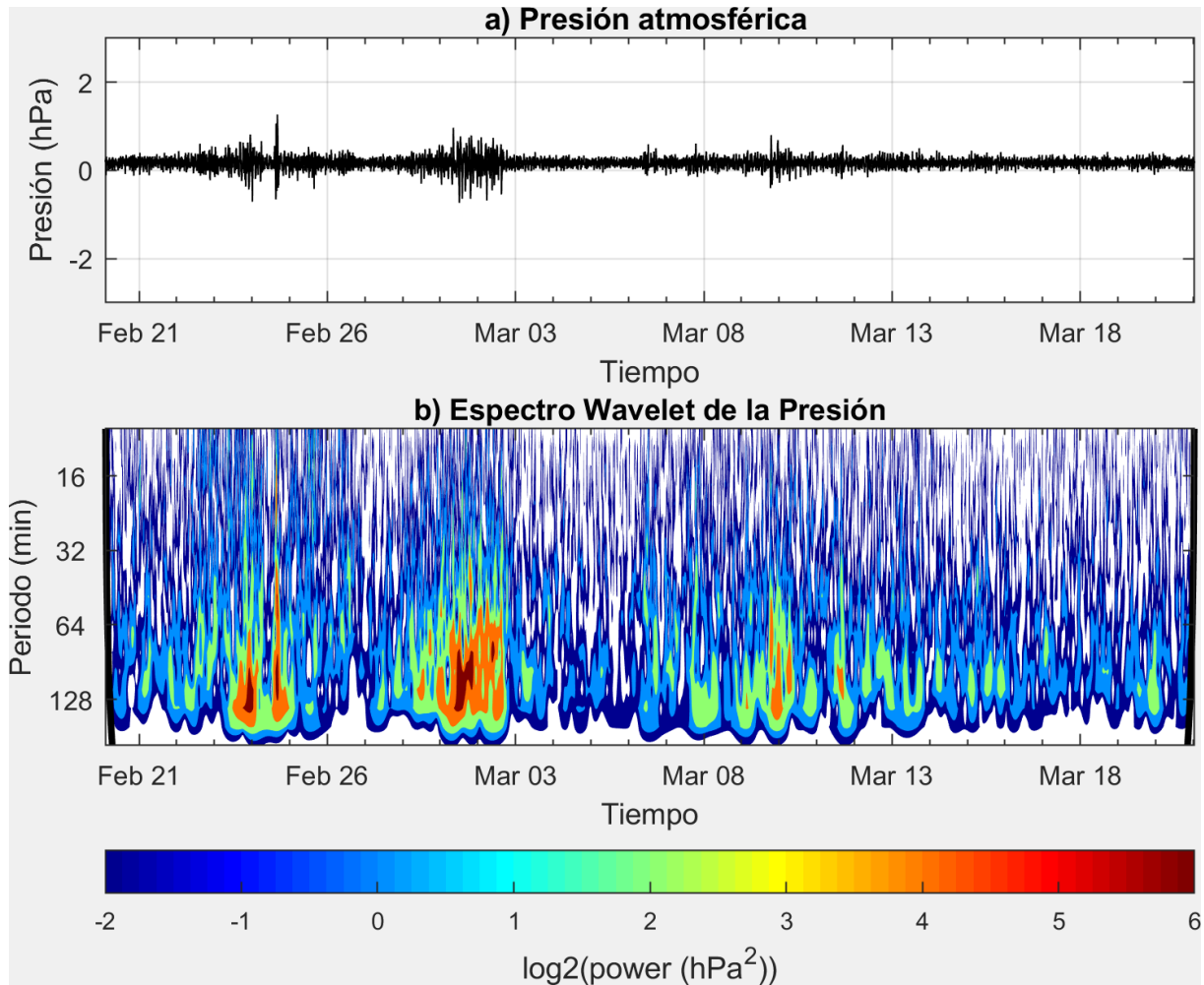


Figure 4: (a) Serie de presión atmosférica filtrada desde el 20 de febrero al 21 de marzo y (b) el respectivo espectro wavelet. A izquierda y derecha se indican los conos de incertidumbre.

de OGA puede manifestarse como un único paquete de ondas (Figura 3.a), en otros casos como fluctuaciones irregulares intermitentes con diferentes duraciones (Figura 3.b), o también como dos o más paquetes de ondas (Figura 3.c).

### 3.2 Presencia de frentes durante casos de OGA

Los frentes constituyen una fuente de OGA (Uccellini y Koch, 1987). Nuñez y otros (1998) también reportaron la presencia de un frente frío asociado a un sistema de baja presión en superficie durante un período de actividad de OGA en la costa bonaerense. En consecuencia se analizó si durante el desarrollo de cada uno de los casos de OGA (Tabla I) se observaba la presencia

de una zona frontal en la región de estudio. De las 37 situaciones sinópticas durante las cuales hubo actividad de OGA se encontró que 24 están asociados a frentes fríos (FF), 9 a frentes cálidos (FC) y 4 están relacionados con otros forzantes sinópticos. Es decir, de los 37 casos estudiados, en 33 se detectó la presencia de frentes en la zona de interés. Por lo tanto, si bien habría que realizar una investigación más profunda, en principio se podría considerar que la presencia de frentes en la región sería un indicador de actividad de OGA. En consecuencia, esto daría un primer indicio para la búsqueda de períodos activos de meteotsunamis en la región costera bonaerense.

Un análisis más detallado de la ubicación de

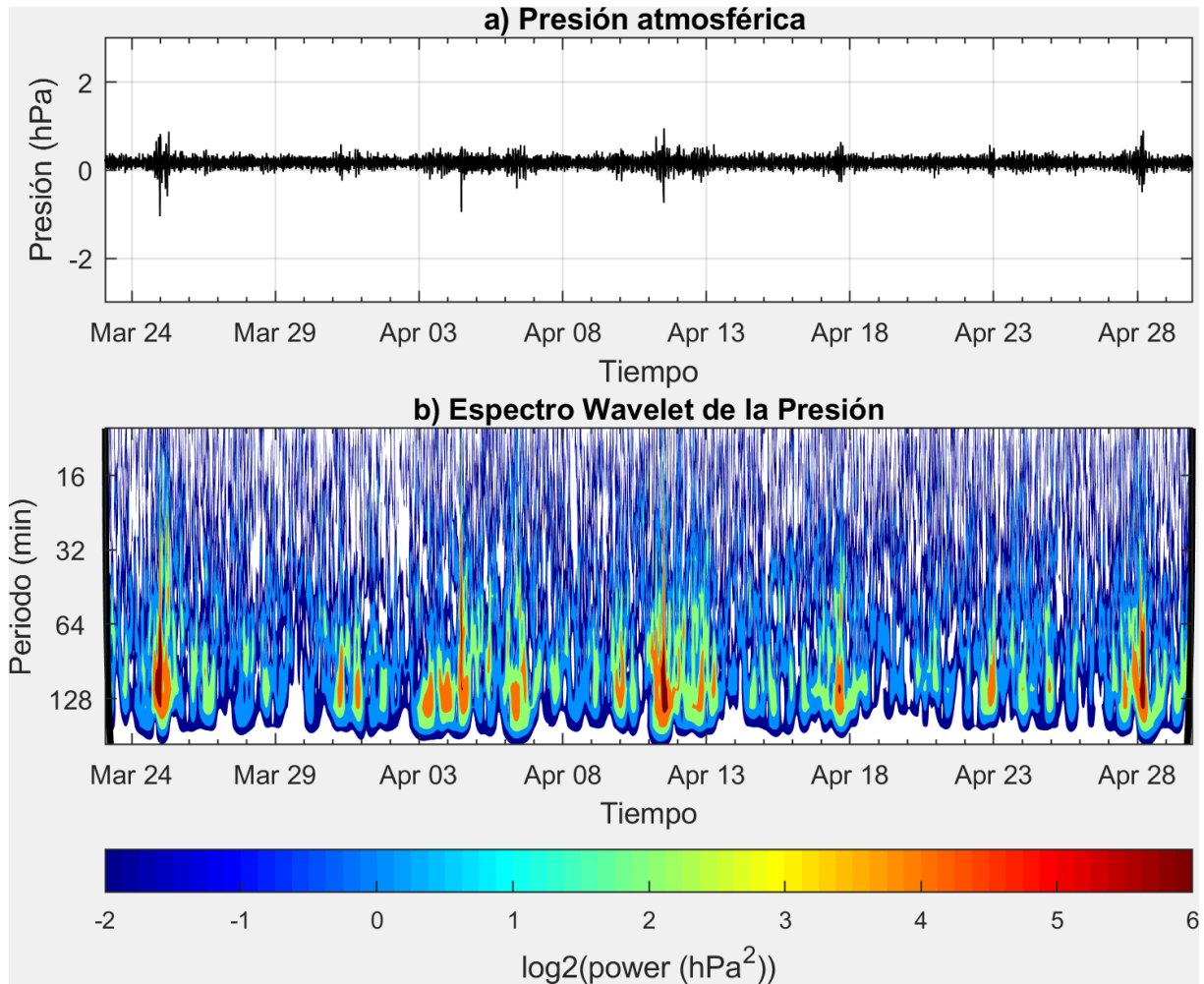


Figure 5: (a) Serie de presión atmosférica filtrada desde el 23 de marzo al 30 de abril y (b) el respectivo espectro wavelet. A izquierda y derecha se indican los conos de incertidumbre.

los FF y FC (33 casos) permitió conocer que la mayoría de los casos ocurren cuando una zona frontal se ubica al N de la Patagonia (16 casos) y luego se desplaza hacia el E o NE. Se observó, además, que algunos frentes se posicionaron al S de la provincia de Buenos Aires (2 fríos y 5 cálidos) mientras que otros lo hacen al N (3 fríos y 2 cálidos) o en el centro (2 fríos y 2 cálidos) de la provincia. A diferencia de lo señalado por Nuñez y otros (1998) se encontró que varios eventos de OGA están vinculados a la presencia de FC asociados a una masa de aire muy inestable y cálida, la cual favorece el desarrollo de lluvias y tormentas principalmente al S y en el litoral marítimo bonaerense. Por otro lado, se pudieron identificar 4 casos en los cuales las OGA no

estaban asociadas a la presencia de frentes sino que se observaron sistemas de bajas segregadas en niveles altos, frentes de origen polar al O de la provincia de Buenos Aires, o bien perturbaciones de onda corta precursoras de tormentas al N de la Patagonia, principalmente en el litoral marítimo. Si bien de los 37 casos en 33 se observaron frentes en superficie, los resultados obtenidos sugieren que el origen de las OGA podrían estar asociado a distintos forzantes (Fritts y Alexander, 2003) y no únicamente a sistemas frontales tal como se describiera en Nuñez y otros (1998). Es de destacar que gran parte de los casos estudiados están relacionados con la presencia de tormentas. Las mismas se desarrollan cerca de la costa, entre Bahía Blanca y Mar del Plata, tanto sobre el

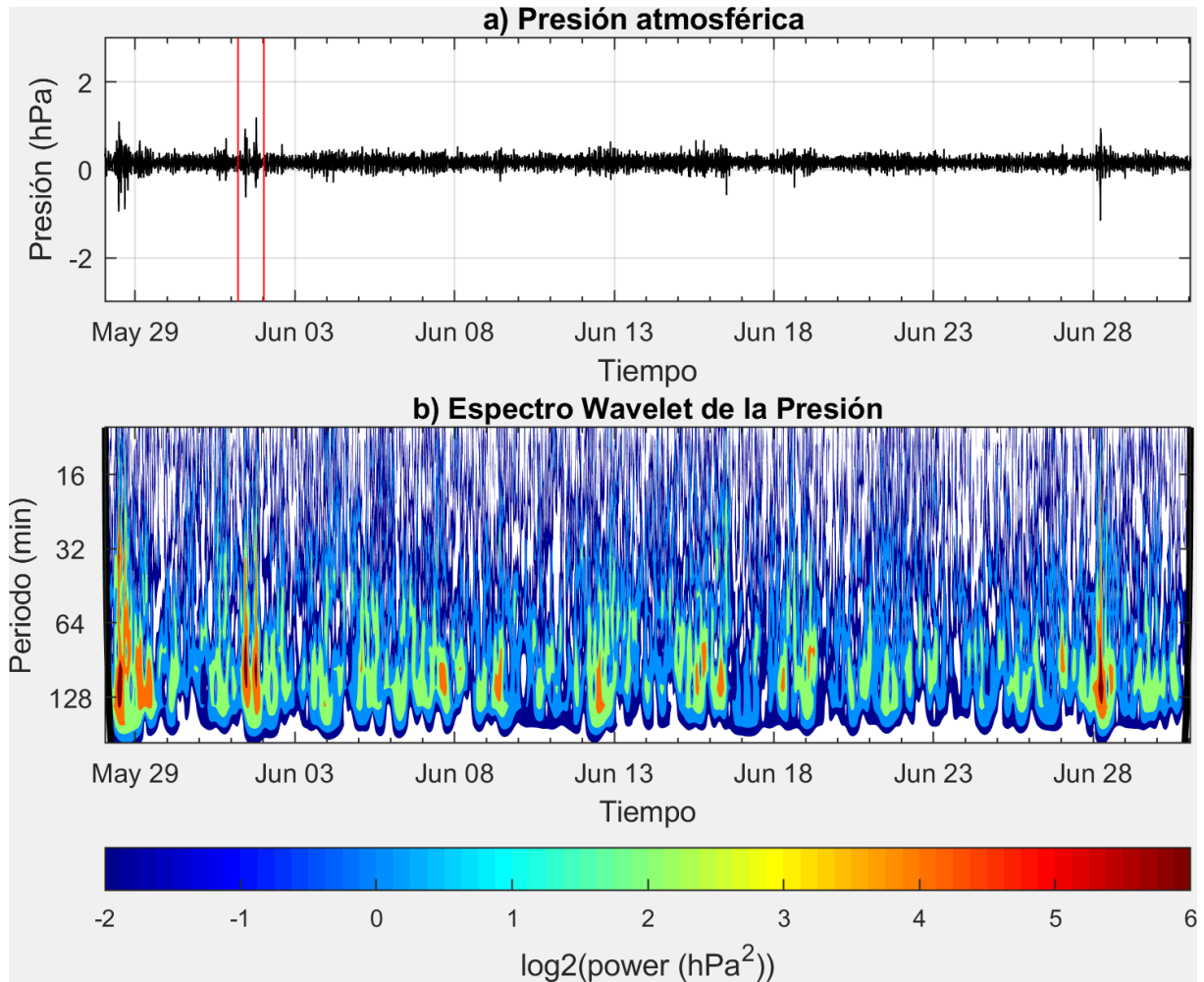


Figure 6: (a) Serie de presión atmosférica filtrada desde el 28 de mayo al 31 de junio (entre líneas verticales rojas se delimita al evento simulado numéricamente) y (b) el respectivo espectro wavelet. A izquierda y derecha se indican los conos de incertidumbre.

continente como en el océano. Considerando que los datos de campo son insuficientes como para avanzar en el estudio de las OGA, sobre todo en lo que se refiere a la dirección de propagación, el análisis descrito en este trabajo se complementó con simulaciones numéricas realizadas con el modelo WRF.

### 3.3 Descripción y modelado numérico de situaciones sinópticas asociada a las OGA.

Con el fin de obtener detalles de la propagación de OGA se modelaron dos situaciones, una ocurrida en junio (caso 11, Tabla I) y la otra en diciembre (casos 32-34, Tabla I) de

2013. Ambas situaciones fueron seleccionadas ya que para las mismas se dispone de series de datos en donde se observa actividad simultánea e intensa de OGA y de meteotsunamis. De esta manera, es factible encarar el estudio numérico de la generación de meteotsunamis a través de OGA. Dichos eventos de OGA ocurrieron en distintos entornos sinópticos, uno en presencia de un FF (caso 11) y otro durante un FC (casos 32-34) el cual evolucionó como FF. Además, durante dichas situaciones se detectaron tsunamis meteorológicos en Mar del Plata. Se recurrió entonces a la simulación numérica de las dos situaciones mencionadas implementando el modelo WRF. Este modelo permite representar

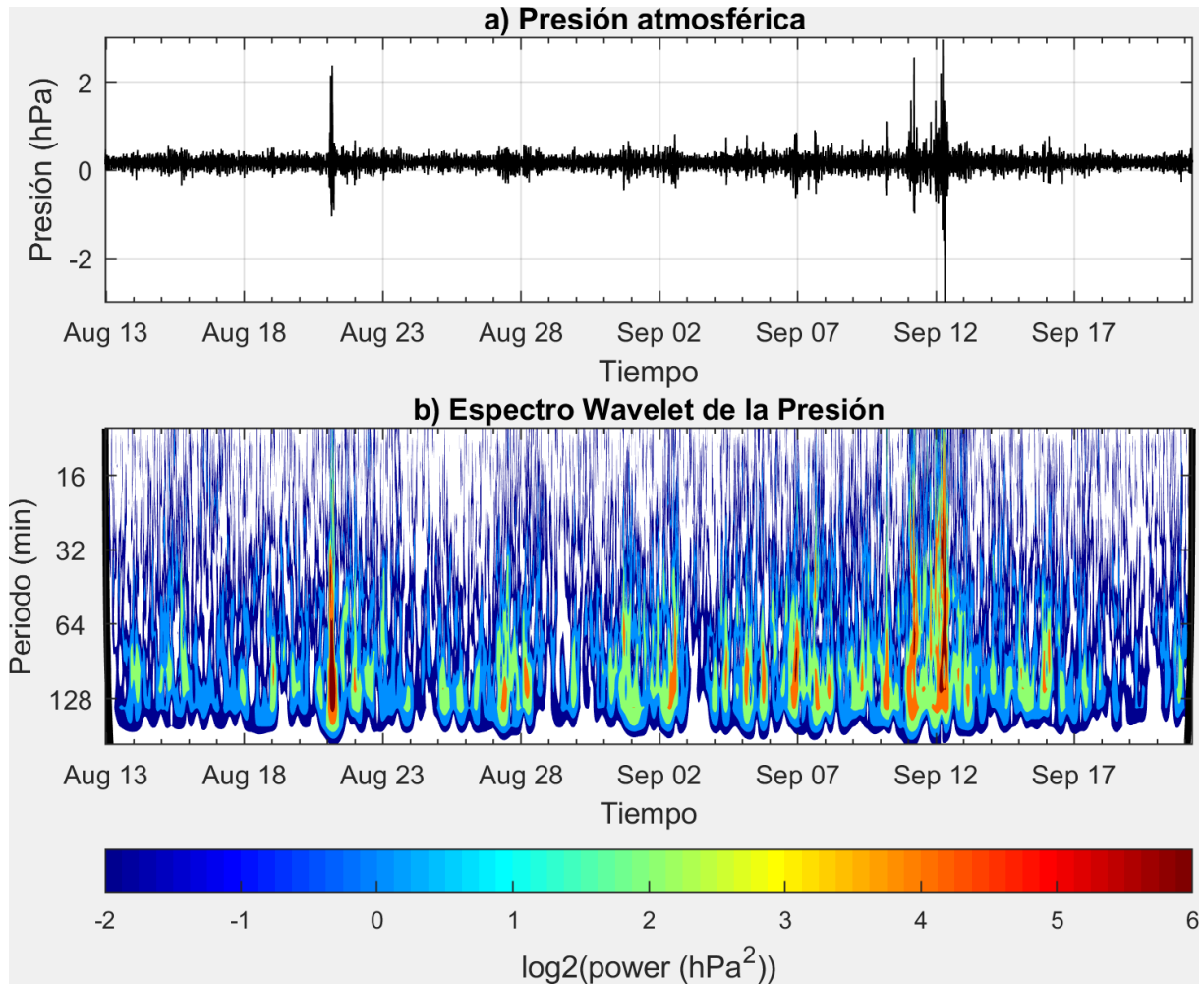


Figure 7: (a) Serie de presión atmosférica filtrada desde el 12 de agosto al 20 de septiembre y (b) el respectivo espectro wavelet. A izquierda y derecha se indican los conos de incertidumbre.

las condiciones que dieron lugar al desarrollo de las OGA y simular su evolución espacio-temporal en alta resolución. El análisis detallado de los procesos involucrados al origen, desarrollo, sostenimiento y decaimiento de las OGA supera el objetivo del presente estudio y será investigado en un trabajo futuro. La información de campo en alta resolución temporal es muy escasa en la región, como se explicó, tan sólo se dispone de la estación Davis instalada en el INIDEP como para validar las series de presión atmosférica en alta frecuencia simuladas por WRF. A modo de ejemplo, en la Figura 10, se presentan las series de presión observada en el INIDEP (filtrada y sin filtrar) y simulada (filtrada) correspondientes a los casos 32-34 (Tabla I) en el nodo más

cercano al INIDEP (aproximadamente a 2 km de distancia) y sus respectivos wavelets. En la Figura 10.a se aprecia un decrecimiento general de la presión atmosférica entre 1021 y 1016 hPa, entre el 1ro. y el 2 de diciembre de 2013. Hacia el final del 1ro. de diciembre se observan dos perturbaciones de alta frecuencia que superan los 4 hPa (entre valle y cresta). Aunque el modelo WRF subestima en aproximadamente 2 hPa el pico máximo de la fluctuación bárica observada (Figura. 10.b), se aprecia que logra representar temporalmente bien el lapso de mayor actividad de OGA y la posición de las fluctuaciones principales. Resultados similares a estos fueron reportados por Renault y otros (2011) utilizando el modelo WRF en la región

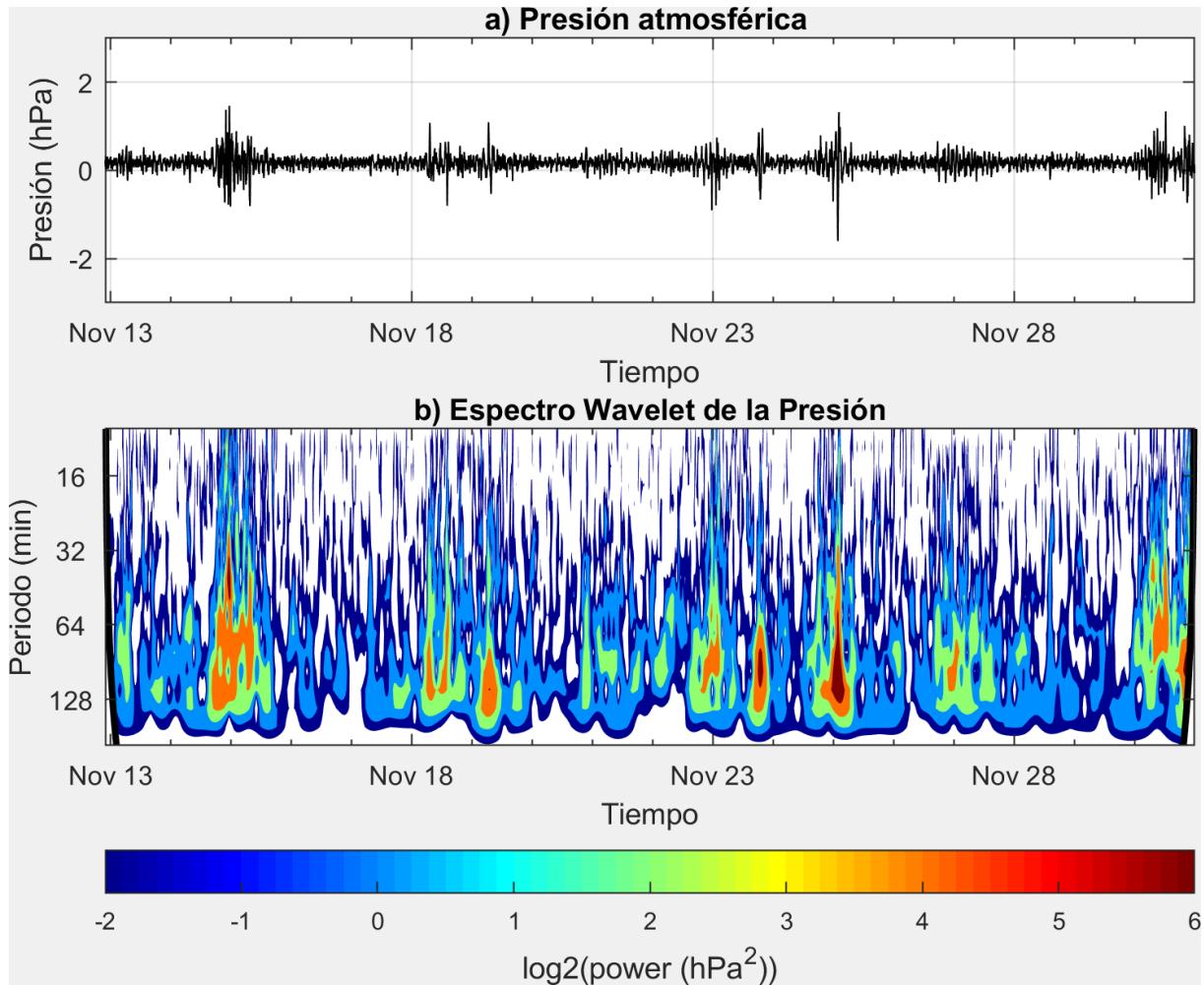


Figure 8: (a) Serie de presión atmosférica filtrada desde el 12 al 30 de noviembre y (b) el respectivo espectro wavelet. A izquierda y derecha se indican los conos de incertidumbre.

de las islas Baleares. En la Figura 10.c y d se muestran los wavelets para la serie de presión atmosférica filtrada modelada y medida, respectivamente. En ambas figuras los máximos de energía cubren un rango de períodos entre 1 y 3 h, aproximadamente, y poseen una estructura espectral muy parecida. Esto muestra que la arquitectura implementada para el modelo WRF logra representar razonablemente las OGA en la región costera bonaerense.

El 1ro. de junio a las 00Z un sistema de baja presión en superficie con una vaguada en niveles medios se ubicó en las costas de Chile, y se propagó hacia el E con un flujo del O sobre el S de Buenos Aires. Un FF débil se desplazaba

hacia el E de Mar del Plata con fuerte desarrollo convectivo desde Uruguay hacia el S (figura no mostrada). Rápidamente comenzó a formarse un sistema frontal al N de la Patagonia con un sistema nuboso en forma de banda ubicado por delante del FF. Hacia las 05Z, momentos antes de la ocurrencia de la rápida fluctuación de la presión de superficie (Figura 6.a), el FF se localizó al O de La Pampa extendiéndose hasta la península de Valdés. A las 10Z la perturbación se desplazó hacia el E alcanzado el S de la provincia de Buenos Aires, con desarrollos convectivos en forma de banda claramente observables en la imagen de topos nubosos (Figura 11.a y c). El modelo WRF representó adecuadamente el avance del frente (caso 11), con el flujo del NO

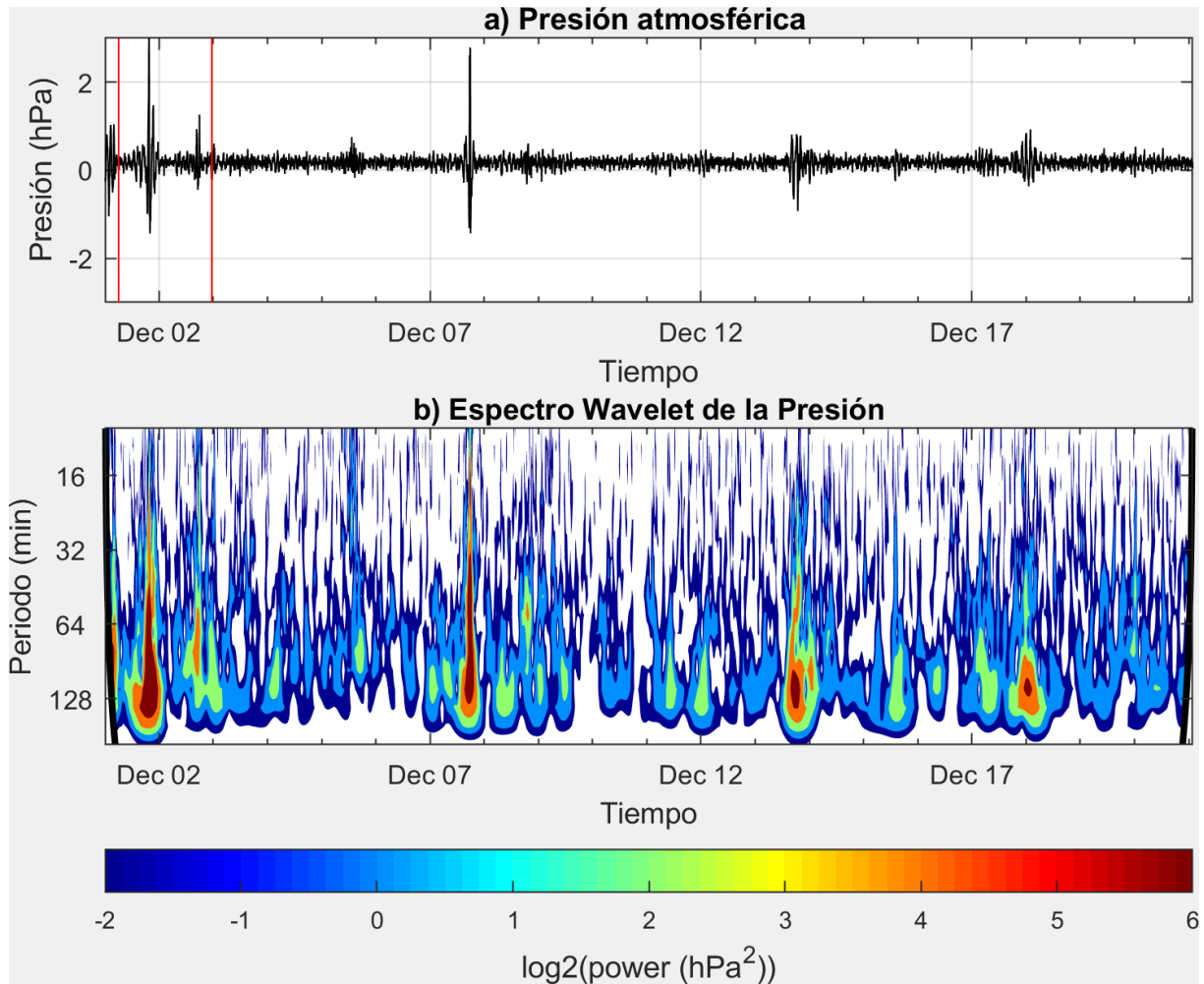


Figure 9: (a) Serie de presión atmosférica filtrada desde el 1ro. al 21 de diciembre (entre líneas verticales rojas se delimita al evento simulado numéricamente) y (b) el respectivo espectro wavelet. A izquierda y derecha se indican los conos de incertidumbre.

asociado al avance de la vaguada frontal que se detecta en el campo de presión y viento a nivel del mar. A las 14Z (Figura 11.b y d) se observa que el eje de la vaguada frontal se posicionó al O de la provincia de Buenos Aires presentando un desarrollo convectivo más debilitado tanto por delante como por detrás del FF mientras que en el litoral oceánico la nubosidad presenta un mayor desarrollo vertical siguiendo a la zona frontal hasta la parte ocluida del frente ubicada al este de la costa norte Patagónica. Luego, el sistema frontal se desplazó hacia el E y hacia el final del evento (02/06/2013 00Z) se ubicó cerca de Mar de Plata.

A diferencia del caso 11, la segunda situación analizada (casos 32-34) comenzó con un FC ubicado al S de la provincia de Buenos Aires y con la presencia de una masa de aire cálida e inestable en la región de Buenos Aires y La Pampa. Junto al frente se posicionó una onda corta en niveles medios de la atmósfera al SO de Buenos Aires que favoreció desarrollos convectivos en el litoral marítimo hasta Mar del Plata. Las tormentas se mantuvieron al S de la costa durante el desarrollo de la perturbación de la presión entre las 06Z y las 10Z (figura no mostrada). A las 18Z una vaguada invertida se posiciona al S de la costa bonaerense, con flujo del NO y con desarrollo de tormentas

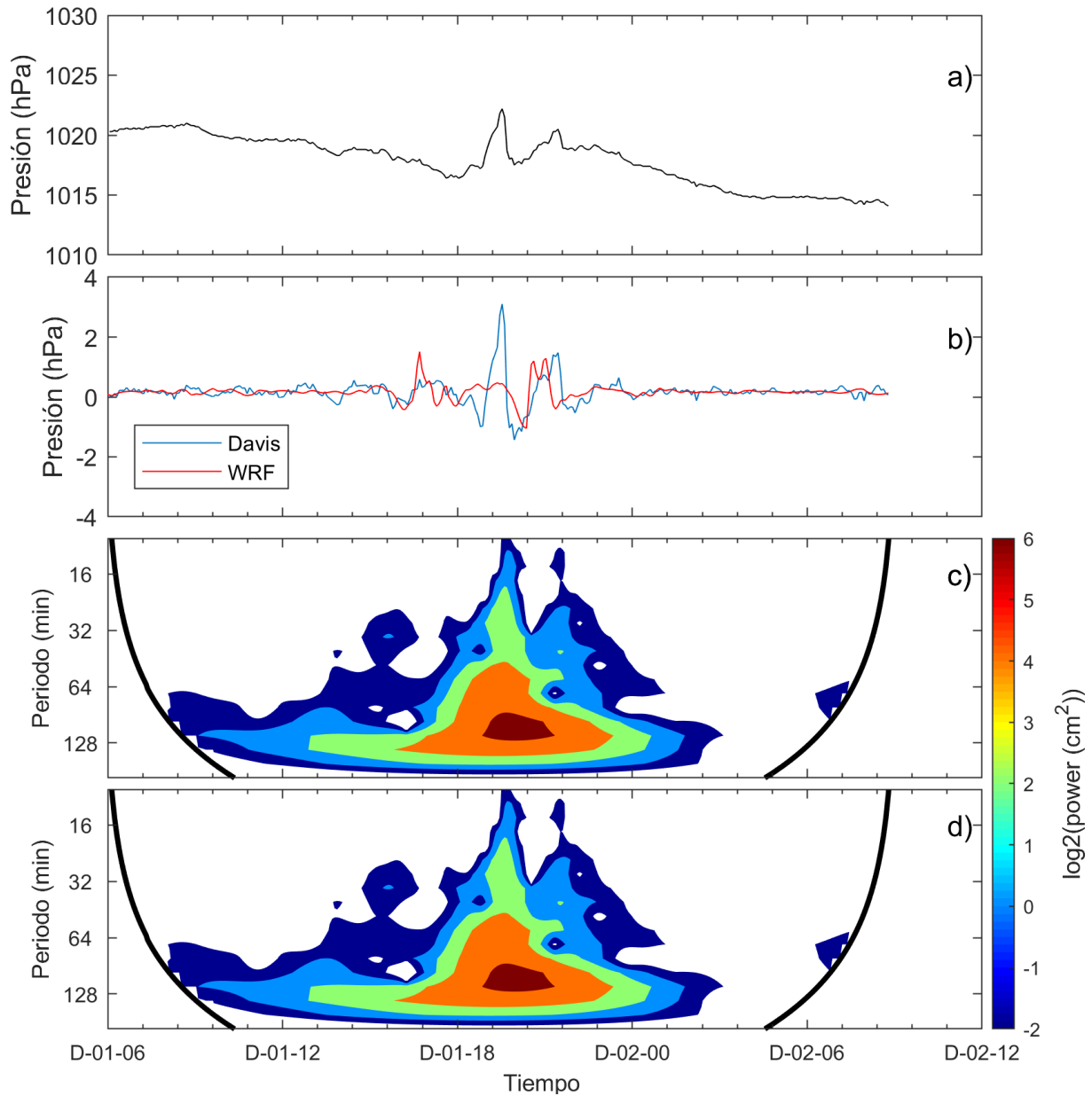


Figure 10: Presión atmosférica (a) observada, (b) filtradas para las series observada (INIDEP) y simulada (WRF), (c) wavelet de la serie de presión simulada filtrada, y (d) wavelet para la serie de presión observada filtrada, correspondiente a los casos 32-34 en Mar del Plata.



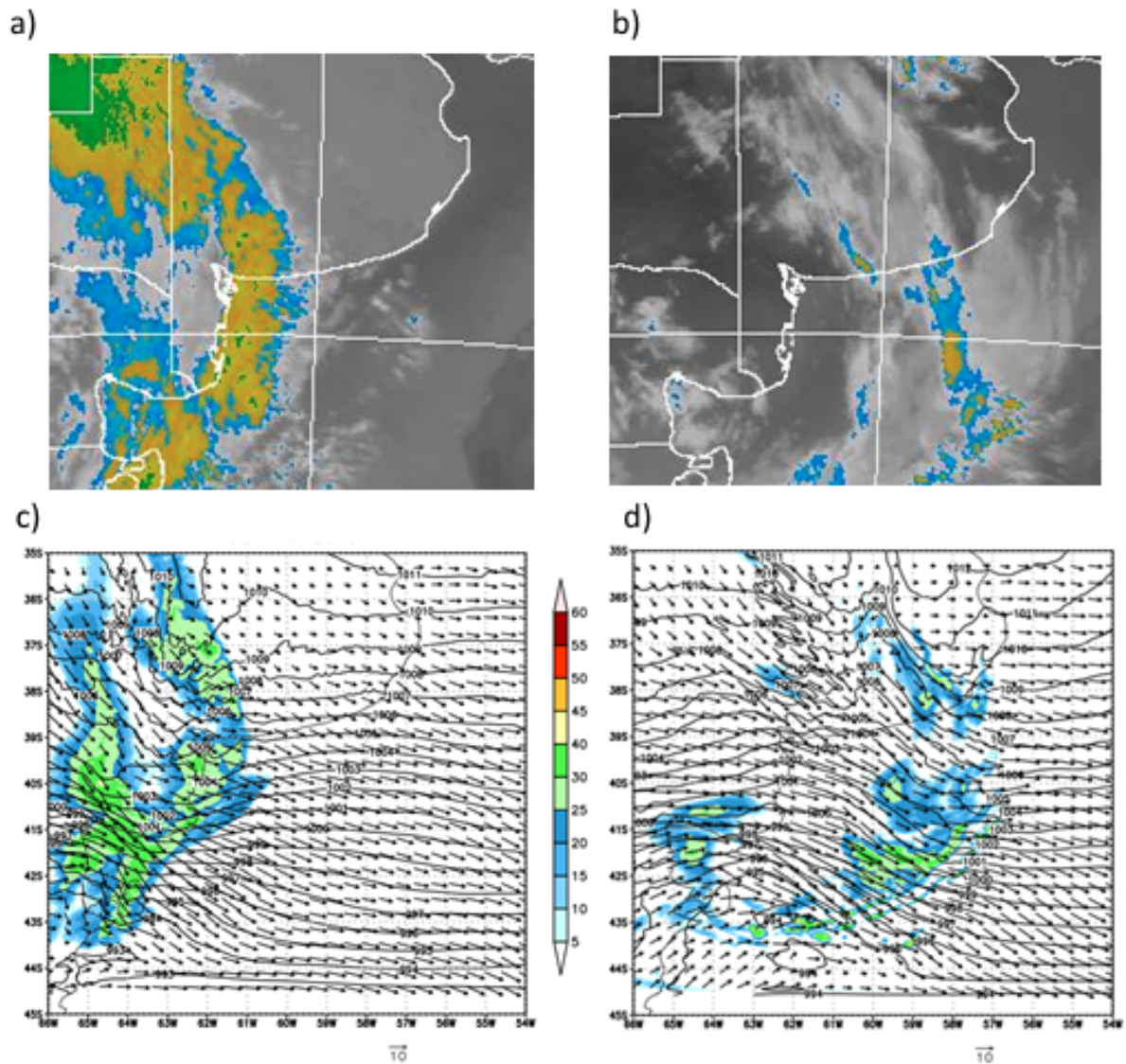


Figure 11: Temperatura de topos nubosos obtenida de GOES/13 - SMN: (a) 1ro. de junio 10Z y (b) 14Z, y reflectividad (dBz, paleta de colores), presión atmosférica a nivel del mar (hPa, contornos) y viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ , flechas) obtenidas del modelo WRF: (c) 1ro. de junio 10Z y (d) 14Z.

que se identifican con los topes nubosos de la imagen de satélite y de reflectividad del modelo (Figura 13.a y c). El modelo WRF simuló adecuadamente la posición del FC. Más tarde, una nueva perturbación de niveles medios al N de la Patagonia favoreció la transformación del FC en un FF con orientación NO-SE ubicado al S de la provincia de Buenos Aires (Figura 13.b). Este FF está asociado a nuevos eventos de OGA (casos 33 y 34), luego el frente se movió lentamente hacia el E presentando desarrollos convectivos cerca de Mar del Plata y en el océano adyacente (Figura 13.b y d). En ambas situaciones analizadas existió una zona frontal pero las situaciones sinópticas fueron diferentes. En la primera (caso 11) se observó un FF con un ciclón en superficie al S de la provincia de Buenos Aires y sobre el océano. En cambio, la segunda (casos 32-34), se caracterizó por la presencia de un FC al S de Buenos Aires que luego se desplazó hacia el NO como FF.

Se observó que el modelo WRF fue capaz de simular el entorno sinóptico y de mesoescala asociados a los eventos de OGA, como así también a las fluctuaciones barométricas de alta frecuencia. En ambas situaciones se examinó la propagación de las OGA mediante el campo de perturbaciones de presión al nivel del mar, obtenidas a través de un filtrado numérico (Figuras 12 y 14). En la Figura 12 se presentan los campos de presión filtrada para el 1ro. de junio de 2013 entre las 10 y 13Z. En las mismas se observa que las OGA se propagan predominantemente de O a E, coincidentemente con la dirección de propagación de los sistemas sinópticos, con perturbaciones b́aricas comprendidas entre -0.8 y 1 hPa. Se observa, adeḿas, un fuerte patrón de propagación de OGA en la zona adyacente a Bahía Blanca, sobre la Provincia de Buenos Aires (Figura 12 c y d). Sin embargo, dado que el principal interés de este trabajo es el estudio de la propagación de OGA en la zona costera bonaerense, con miras a la generación de meteotsunamis, dicho patrón aunque más intenso que el costero, no es analizado en detalle. De la misma manera, en la Figura 14 se muestran los campos correspondientes al 1ro. de diciembre de

2013 entre las 20 y 23Z. Inicialmente se ve que la actividad de OGA está acotada entre Necochea y Mar del Plata, aproximadamente. En los campos presentados se aprecia que el tren de OGA también se propaga predominantemente hacia el E. Para este evento simulado las perturbaciones b́aricas que fluctúan entre -1.2 y 1 hPa.

A modo de ejemplo, se presentan las series de presión atmosférica (filtradas) para el caso 33 a lo largo de una transecta orientada en la dirección de propagación del frente (SSO-NNE). Sobre la misma se analizó la presión en seis sitios, equi-espaciados 90 km, los cuales se indican como 1-6 en la Figura 1. Se obtuvo que las perturbaciones asociadas a las OGA son débiles ( $<0.3$  hPa) para los sitios 1, 5 y 6 (Figura 15). La actividad se manifiesta más intensamente alcanzando fluctuaciones del orden de 1 hPa entre los sitios 2-4, con valores máximos de hasta 2 hPa en el sitio 3. Del análisis de la Figura 15 se aprecia que para el caso simulado (33) la zona de mayor actividad de OGA se acota a una franja de latitudes relativamente angosta, ubicada en torno de los  $38^\circ$  S, en la zona de Mar del Plata. El análisis de la variabilidad espacial y de la amplificación de OGA en este sector de la provincia de Buenos Aires merece un estudio numérico particular el cual escapa a los objetivos planteados en el presente trabajo.

Los escasos antecedentes disponibles para la región (Nuñez y otros, 1998) sugirieron que las OGA se propagan en la misma dirección que la corriente en chorro intensa de altura (CCi), es decir, hacia el SE. Sin embargo, en el caso 11 se observan trenes de OGA propagándose hacia el E-NE siguiendo al FF y no se apreció a la CCi. El eje de entrada del máximo de viento en altura se ubicó sobre el océano Atlántico en  $50^\circ$ S y no superó los  $60 \text{ ms}^{-1}$  (figura no mostrada). En el caso 32-34 se observan perturbaciones de presión superiores a 0.5 hPa en la región costera de Buenos Aires (Figura 14), indicando también la propagación de OGA hacia el E-NE. Durante esta situación la propagación de OGA es paralela al FC y sigue el desplazamiento de las tormentas que se ubicaron levemente hacia el N de la costa

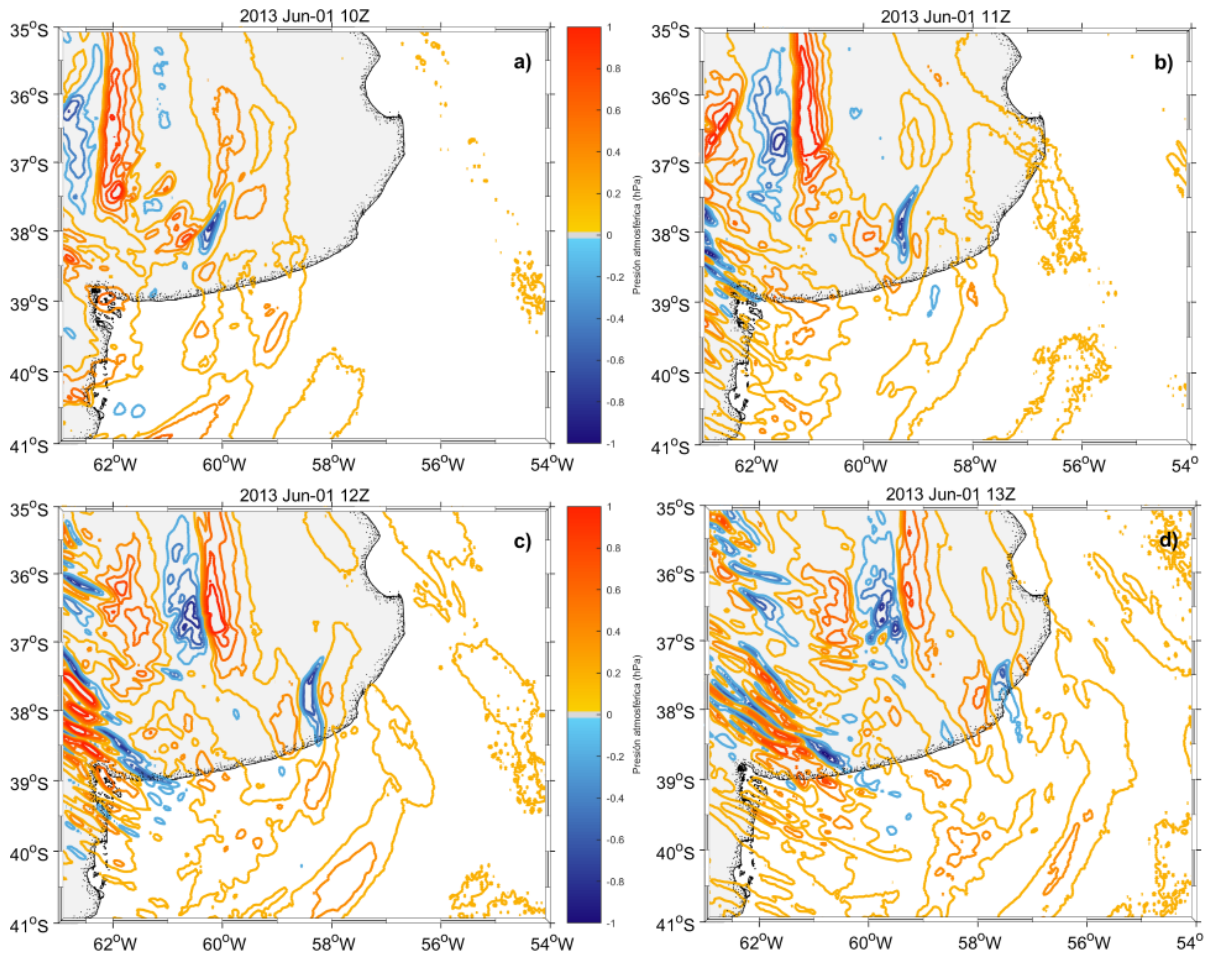


Figure 12: Campos de presión atmosférica filtrada (contornos en hPa, los tonos anaranjados/rojizos indican valores mayores que cero y los celestes/azulados menores que cero) para el 1ro. de junio 2013 (a) 10Z, (b) 11Z, (c) 12Z y (d) 13Z.

bonaerense. Este caso guarda algunas similitudes con el modelo propuesto por Uccellini y Koch (1987). Dicho modelo postula que las OGA se desarrollan en el punto de inflexión entre la parte delantera de la vaguada y la trasera de la cuña, y se propagarían hacia el SE (lado polar) siguiendo el movimiento del flujo, coincidiendo con lo sugerido por Nuñez y otros (1998). Sin embargo, durante este evento no se observó la clara presencia de una CCi en niveles altos. Tan solo se apreció un máximo local de viento de  $30 \text{ ms}^{-1}$  en 300 hPa en la parte delantera de la vaguada de onda corta ( $42^\circ \text{ S}$ ,  $57^\circ \text{ O}$ ) estando el eje de salida de la CC al S de la provincia de Buenos Aires (figura no mostrada). Las perturbaciones de presión asociadas a las

OGA se ubicaron del lado polar del FC y se propagaron siguiendo la posición de la zona convectiva, como se aprecia en la Figura 14. En este caso la convección profunda podría ser el indicador de la presencia de OGA y reforzaría la presencia de las mismas (Fritts y Alexander, 2003). Esto último podría estar relacionado, tal como muestran los resultados del modelo WRF, con las descendentes de la precipitación que podrían generar una perturbación positiva en la presión de superficie reforzando el desarrollo de las OGA. Aquí aparecería una dificultad adicional para modelar a las OGA, dado que si bien el WRF es capaz de simular la convección, no se puede garantizar que éste represente correctamente la ubicación y el momento exacto

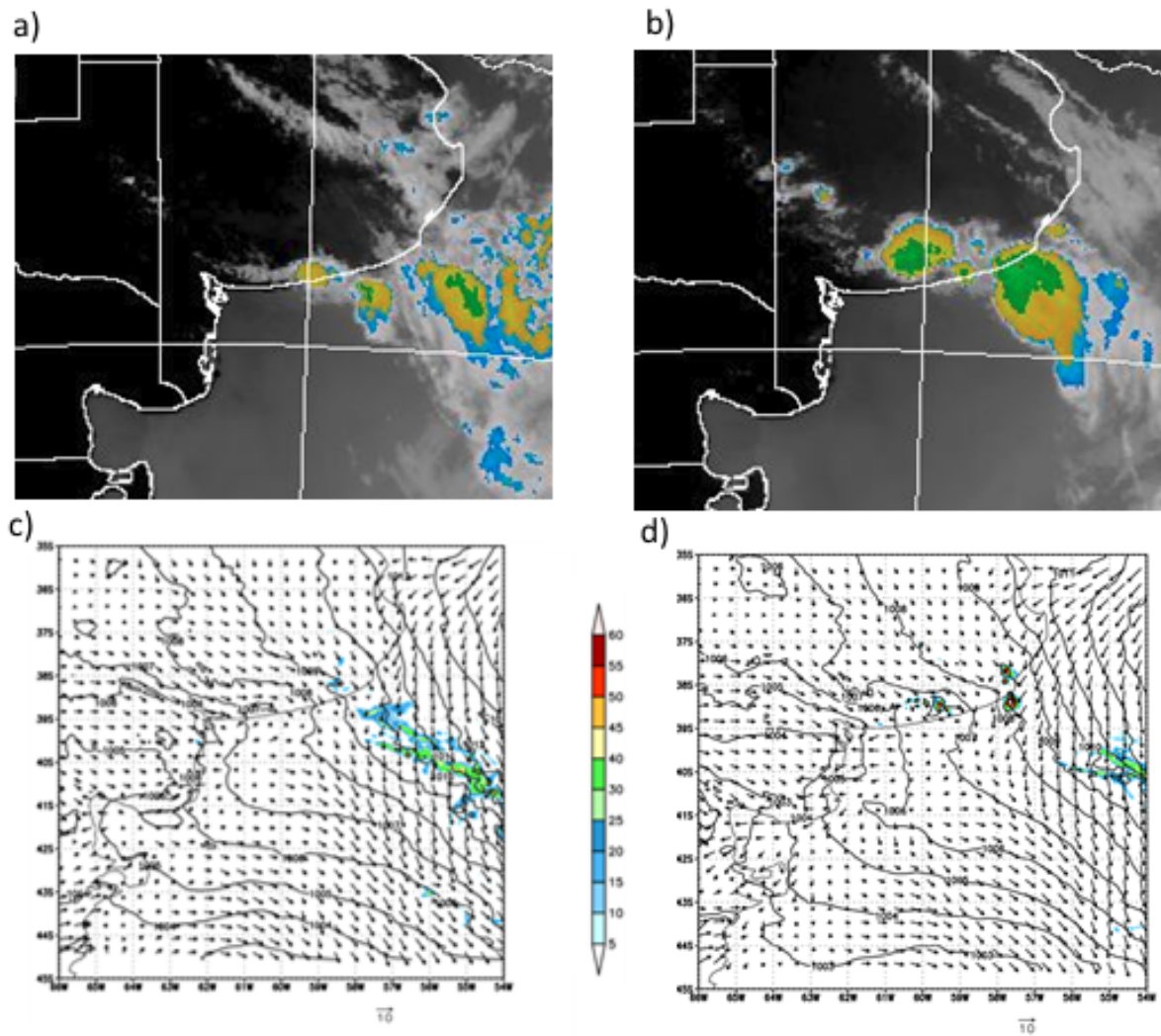


Figure 13: Temperatura de topos nubosos obtenidas de GOES/13 - SMN: (a) 1ro. de diciembre 18Z y (b) 21Z, y reflectividad (dBZ, paleta de colores), presión atmosférica a nivel del mar (hPa, contornos) y viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ , flechas) obtenidas del modelo WRF: (c) 1ro. de diciembre 18Z y (d) 21Z.

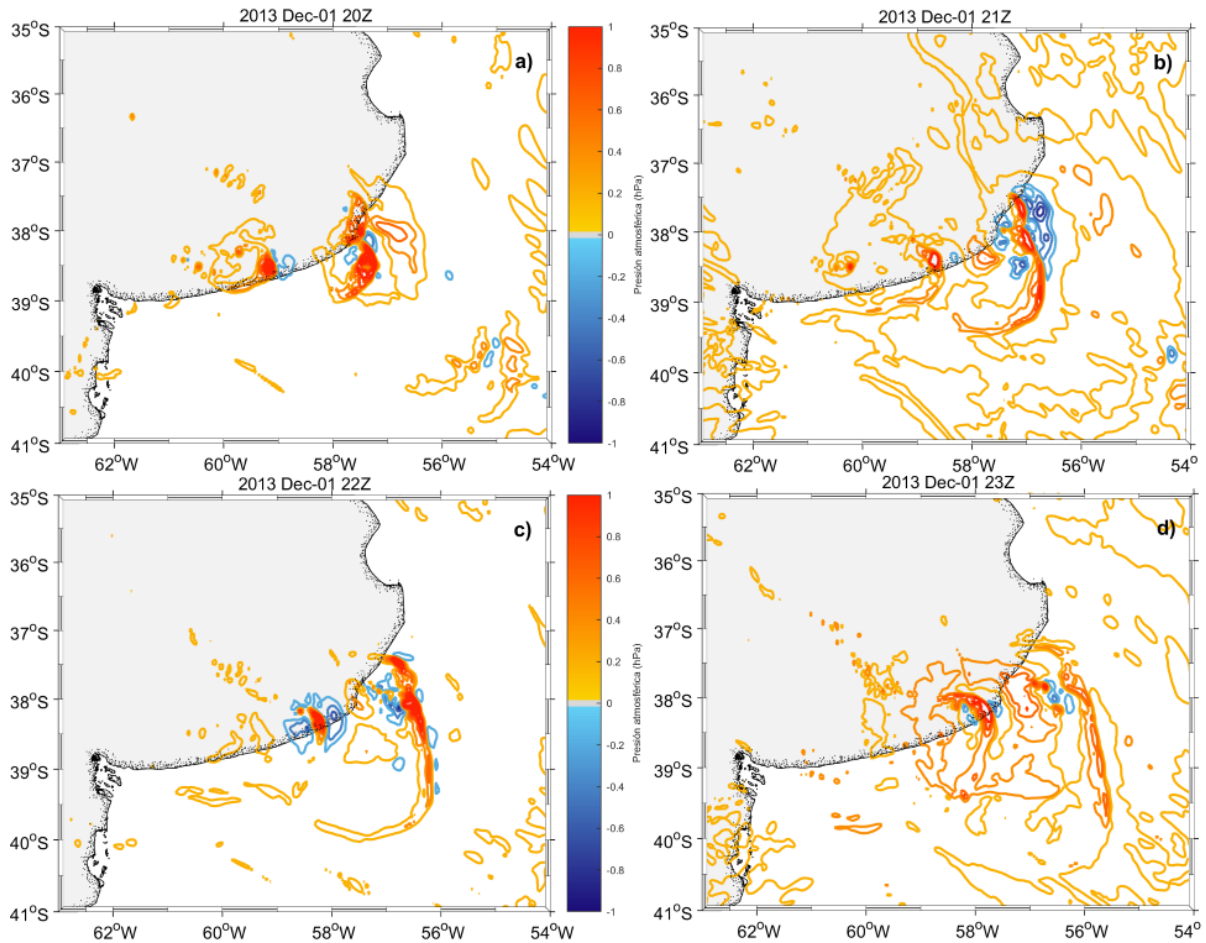


Figure 14: Campos de presión atmosférica filtrada (contornos en hPa, los tonos anaranjados/rojizos indican valores mayores que cero y los celestes/azulados menores que cero) para el 1ro. de diciembre 2013 (a) 20Z, (b) 21Z, (c) 22Z y (d) 23Z.

de la convección. Estos resultados preliminares, si bien inéditos para la región, requieren de un estudio más profundo que involucre una mayor cantidad de eventos para determinar los mecanismos que generan, sostienen y determinan la propagación de OGA en la provincia de Buenos Aires.

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se caracterizó la duración típica, las amplitudes máximas y el rango de periodicidades esperable de las OGA registradas en Mar del Plata en 2013. Por otro lado, se catalogaron las situaciones sinópticas en las cuales se desarrollaron los 37 casos de OGA detectados. Complementado este estudio se

implementó el modelo WRF en alta resolución y se exploró su capacidad para simular la propagación de OGA en la región bonaerense.

Del análisis realizado sobre cada caso de actividad de OGA se obtuvo que, en general, duran entre 5 y 20 h y que la máximas fluctuaciones de presión están comprendidas entre 0.5 y 2 hPa, con periodicidades típicas entre 30 y 150 min. De los 37 casos detectados se encontró que 24 están asociados a FF, 9 a FC, y 4 están relacionados con otros forzantes sinópticos. Un análisis más detallado de la ubicación de los FFs y FCs (33 casos) permitió conocer que la mayoría de los casos tienen lugar cuando se ubica una zona frontal al N de la Patagonia (16 casos)

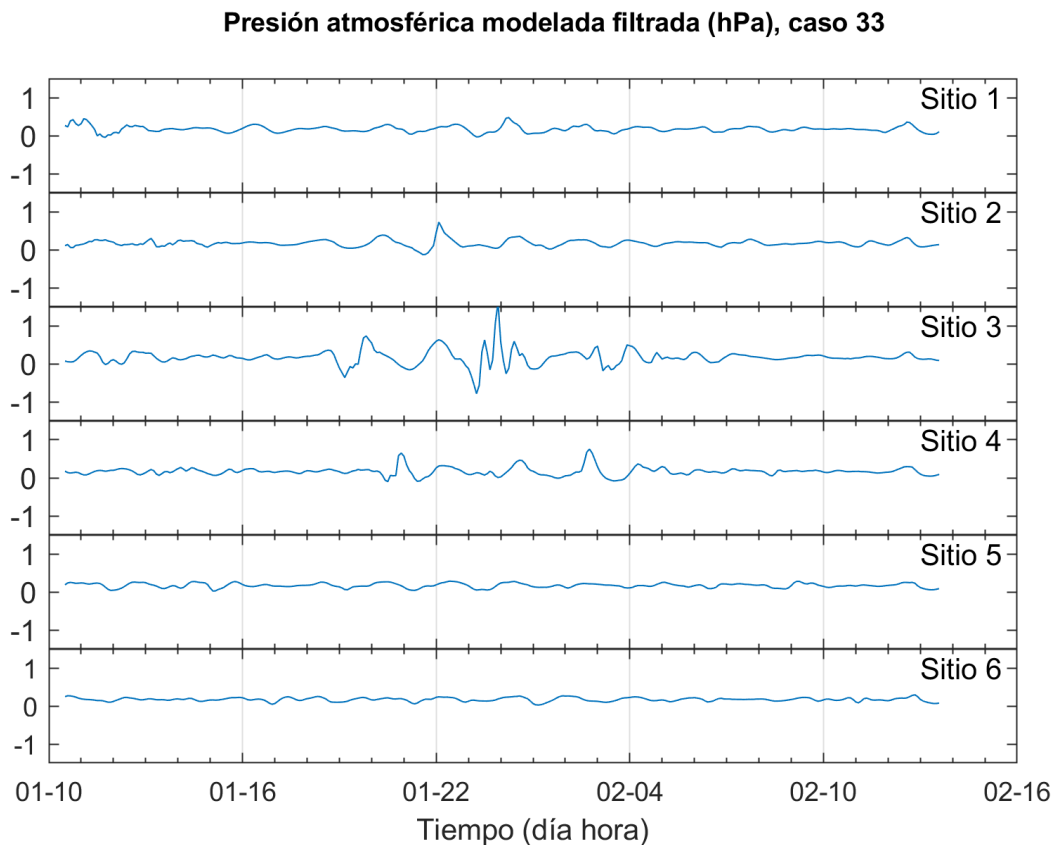


Figure 15: Presión atmosférica modelada (WRF) filtrada para el evento 33 (Tabla I) para 6 sitios indicados con cruces en la Figura 1.

que se desplaza hacia el E o NE (Tabla I).

Se concluye que las OGA son un fenómeno relativamente frecuente en la región costera bonaerense. Se realizó un estudio exploratorio particular sobre cada uno de los eventos y se observó que en algunos de ellos la actividad de OGA puede manifestarse como un único paquete de ondas (Figura 3.a), en otros casos como fluctuaciones irregulares con diferentes duraciones (Figura 3.b), o también como dos o más paquetes de ondas (Figura 3.c). Esto queda claramente visualizado a través del análisis realizado con el método espectral wavelet (Figuras 4 a 9). De dicho análisis puede apreciarse que las duraciones de los lapsos de actividad, la estructura espectral, la intensidad energética y las amplitudes de las OGA son variables para cada evento.

Se implementó el modelo numérico de alta resolución WRF para estudiar los campos de OGA (principalmente dirección de propagación y amplitud) en la región de estudio, con el fin de obtener un forzante atmosférico realista para la generación de meteotsunamis. Se simularon dos situaciones, una ocurrida en junio (caso 11) y otra en diciembre (caso 33) de 2013 (Tabla I). En la primera se observó un FF y un ciclón en superficie al S de la provincia de Buenos Aires y sobre el océano. En cambio, en la segunda, se observó un FC al S de Buenos Aires que luego se desplazó hacia el NO como FF. En ambos casos el modelo WRF logró simular el entorno sinóptico y de mesoescala, como así también las fluctuaciones barométricas asociadas a las OGA. En el caso 11 las OGA se propagan hacia el E-NE siguiendo al FF (Figura 12.c y d), no observándose la CCI. En el caso 33 la propagación de OGA también es hacia el

E-NE (Figura 14.c y d) pero paralelamente al FC, notándose algunas similitudes con el modelo propuesto por Uccellini y Koch (1987) y con lo hallado por Nuñez y otros (1998). Los resultados obtenidos con el modelo WRF, sobre la base de dos eventos activos de OGA simulados, indican que la dirección predominante de propagación en la región costera bonaerense sería hacia en E-NE, difiriendo de lo hallado por Nuñez y otros (1998) quienes señalaron, basados en especulaciones teóricas, que la misma sería hacia el ESE-SE. Los resultados de este trabajo, si bien son preliminares, representan la primera investigación que documenta la existencia de las OGA en la costa bonaerense como un fenómeno frecuente. Además, los resultados obtenidos manifiestan la necesidad de avanzar en el conocimiento de las OGA en la región.

**Acknowledgments:** Parte de las tareas desarrolladas en el presente trabajo fueron financiadas con fondos provenientes del PIP 0174 (CONICET). Los autores de este trabajo agradecen los comentarios y sugerencias de los dos revisores anónimos.

## REFERENCES

- Alexander, M. J., Holton, J. R., and Durran, D. R., 1955: The gravity Wave Response above Deep Convection in a Squall Line Simulation. *J Atmos Sci*; 52(12).
- Chagnon, J. M., and Bannon, P. R., 2005: Wave Response during Hydrostatic and Geostrophic Adjustment. Part I: Transient Dynamics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, <https://doi.org/10.1175/JAS3283.1>
- Chen, F., and J. Dudhia, 2001: Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 569–585.
- Costantino, L., Heinrich, P., Mz , N. and Hauchecorne A. 2015: Convective Gravity Wave Propagation and Breaking in the Stratosphere: Comparison between WRF Model Simulations and Lidar Data.” *Annales Geophysicae*, vol. 33, no. 9, 2015, pp. 1155–71, doi:10.5194/angeo-33-1155.
- Daubechies, I., 1990: The wavelet transform time-frequency localization and signal analysis. *IEEE Trans. Inform. Theory* 36: 961–1004.
- Dragani, W. C., Mazio, C. A., and Nuñez, M. N., 2002: Sea level oscillations in coastal waters of the Buenos Aires province, Argentina. *Continental Shelf Research*, 22 (5), 779-790. doi: 10.1016/S0278-4343(01)00096-6
- Dragani, W. C., 2007: Numerical experiments on the generation of long ocean waves in coastal waters of the Buenos Aires province, Argentina. *Continental Shelf Research*, 27 (5), 699-712. doi: 10.1016/j.csr.2006.11.009
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, *J. Atmos. Sci.*, 46, 3077–3107.
- Fovell, R. G., 2002: Upstream influence of numerically simulated squall-line storms. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 128: 893–912. doi:10.1256/0035900021643737
- Fritts, D. C., and Luo Z., 1992: Gravity Wave Excitation by Geostrophic Adjustment of the Jet Stream. Part I: Two-Dimensional Forcing. *Journal of the Atmospheric Sciences*, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1992\)049<0681:GWEBGA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1992)049<0681:GWEBGA>2.0.CO;2)
- Fritts, D.C., and Alexander, M.J., 2003: Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. *Reviews of geophysics*, 41(1).
- Gall, R. I., Williams, R. T., and Clark, T. L., 1988: Gravity waves generated during frontogenesis. *J. Atmos. Sci.*, 45, 2204–2219.
- Gossard, E., and Munk, W., 1954: On gravity waves in the atmosphere. *Journal of Meteorology*, 11(4), 259-269.
- Grimsdell, A. W., Alexander, M. J., May, P. T., and Hoffmann, L., 2010: Model Study of Waves Generated by Convection with Direct Validation via Satellite. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67(5).
- Gu, D. and Philander, S.G.H., 1995: Secular

- changes of annual and interannual variability in the tropics during the past century. *Journal of Climate*, 8(4), pp.864-876.
- Hamming, R. W., 1977: *Digital Filters*. Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall.
- Hoffmann, L. and Alexander, M.J., 2010: Occurrence frequency of convective gravity waves during the North American thunderstorm season. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D20).
- Hong, S.-Y., J. Dudhia, and S.-H. Chen, 2004: A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation, *Mon. Wea. Rev.*, 132, 103–120.
- Janjic, Z. I., 2002: Nonsingular Implementation of the Mellor–Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model, NCEP Office Note, No. 437, 61 pp.
- Kruse, C. G., and Smith R.B, 2015: Gravity Wave Diagnostics and Characteristics in Mesoscale Fields. *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 72, no. 11, 2015, pp. 4372–92, doi:10.1175/JAS-D-15-0079.1.
- Lau K. M., and Weng, H. 1995: Climate signal detection using wavelet transform: how to make a time series sing. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 76(12): 2391–2402
- Lilly, D. K., and Kenned and P. J., 1973. Observations of a stationary mountain wave and its associated momentum flux and energy dissipation, *J. Atmos. Sci.*, 30, 1135–1152.
- Lindzen, R. S., and Chapman, S., 1969: *Atmospheric Tides*, 200 pp. D. Reidel, Norwell, Mass.
- Lindzen, R. S., and Tung, K. K. ,1976: Banded convective activity and ducted gravity waves. *Monthly Weather Review*, 104(12), 1602-1617.
- Long, R. R., 1955: Some aspects of the flow of stratified fluids, III, Continuous density gradients, *Tellus*, 7, 341–357,
- Mastrantonio, G., Einaudi, F., Fua, D., and Lalas, D. P., 1976: Generation of gravity waves by jet streams in the atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 33(9), 1730-1738.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102 (D14), 16663–16682.
- Mellor, G. L., and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, 851–875.
- Núñez, M. N., Mazio, C. A., and Dragani, W. C., 1998: Estudio espectral de un lapso de intensa actividad de ondas de gravedad atmosféricas registradas en la costa bonaerense argentina. *Meteorológica*, 23(1), 47-54.
- O’sullivan, D., and Dunkerton, T. J. ,1995: Generation of inertia–gravity waves in a simulated life cycle of baroclinic instability. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 52(21), 3695-3716.
- Palm, E., 1955: *Multiple Layer Mountain Wave Models with Constant Stability and Shear*. University of California, Autobarotropic Flow Project.
- Pérez, I., and Dragani, W. C., 2017: Spectral variability in high frequency in sea level and atmospheric pressure on Buenos Aires Coast, Argentina. *Brazilian Journal of Oceanography*, 65(1), pp.69-78.
- Plougonven, R., and Zhang, F., 2013: Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts. *Reviews of Geophysics*, 52(1), 33-76.
- Possia, N., Cerne, B., and Campetella, C., 2014: Descripción de las variaciones horarias medias de presión en la Argentina y su influencia en los sistemas béricos. *Meteorologica*, 39(1), 59-71.
- Queney, P., 1948: The problem of air flow over mountains: A summary of theoretical studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 16-26.
- Renault, L., Vizoso, G., Jansá, A. Wilkin, J. and Tintoré, J. 2011: Toward the Predictability of Meteotsunamis in the Balearic Sea Using Regional Nested Atmosphere and Ocean Models.” *Geophysical Research Letters*, vol. 38, no. 10, 2011, p. n/a-n/a, doi:10.1029/2011GL047361.
- Reeder, M. J., and M. Griffiths, 1996:



- Stratospheric inertia-gravity waves generated in a numerical model of frontogenesis. I: Wave sources, generation mechanisms and momentum fluxes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122, 1175–1195.
- Sawyer, J. S., 1959: The introduction of the effects of topography into methods of numerical forecasting. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 85(363), 31-43.
- Scorer, R. S., 1949: Theory of waves in the lee of mountains. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 75(323), 41-56.
- Shapiro, R., 1970: Smoothing, filtering, and boundary effects. *Reviews of geophysics*, 8(2), pp.359-387.
- Shen, B. W., y Lin, Y. L, 1999: Effects of Critical Levels on Two-Dimensional Back-Sheared Flow over an Isolated Mountain Ridge on an f Plane. *J. of the Atmospheric Sciences*, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<3286:E0CLOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<3286:E0CLOT>2.0.CO;2)
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B. , Dudhia, J. , Gill, D. O., Barker, D. M. , Duda, M. G., Huang, X. Y., Wang, W., and Powers, J. G., 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note, NCAR/TN-475+STR, 125 pp.
- Su, T., and Zhai G., 2017: The Role of Convectively Generated Gravity Waves on Convective Initiation: A Case Study. *Monthly Weather Review*, vol. 145, pp. 335–59, doi:10.1175/MWR-D-16-0196.1.
- Tanaka, K., Gohara, S., Koga, T., Yamaguchi, R. and Yamada, F., 2014: Abiki oscillations in Sakitsu Bay, west Kyushu, Japan. *Natural hazards*, 74(1), pp.233-250.
- Torre, A., Alexander, P., Hierro, R., Llamedo, P., Rolla, A., Schmidt, T., and Wickert, J., 2012: Large-amplitude gravity waves above the southern Andes, the Drake Passage, and the Antarctic Peninsula. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D2).
- Torrence, C., and Compo, G. P., 1998: “A Practical Guide to Wavelet Analysis”, *Bullentin of the American Meteorological Society*, Vol. 79, No. 1.
- Uccellini, L. W., and Koch, S. E., 1987: The synoptic setting and possible energy sources for mesoscale wave disturbances. *Monthly weather review*, 115(3), 721-729.
- Wang, B. and Wang, Y., 1996: Temporal structure of the Southern Oscillation as revealed by waveform and wavelet analysis. *Journal of Climate*, 9(7), pp.1586-1598.
- Weng, H. and Lau, K.M., 1994: Wavelets, period doubling, and time–frequency localization with application to organization of convection over the tropical western Pacific. *Journal of the atmospheric sciences*, 51(17), pp.2523-2541.
- Zhang, F., 2004: Generation of Mesoscale Gravity Waves in Upper-Tropospheric Jet–Front Systems. *Journal of the Atmospheric Sciences*, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2004\)061<0440:GOMGWI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2004)061<0440:GOMGWI>2.0.CO;2)

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.