

1 **Artículo en edición**

2

1

2 **DESCRIPCIÓN DE ONDAS DE GRAVEDAD ATMOSFÉRICAS EN LA**
3 **COSTA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA**

4 **Iael Pérez^{1,2}, Walter Dragani^{1,2,3,5}, Marcos Saucedo⁴, Alejandro Godoy^{4,6}, Bibiana**
5 **Cerne^{3,5} y Paula Martín^{1,2,7}**

6

7

¹Servicio de Hidrografía Naval (Ministerio de Defensa)

8

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

9

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

10

⁴Servicio Meteorológico Nacional (Ministerio de Defensa)

11

⁵Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (UMI

12

IFAECI/CNRS-CONICET/CIMA/UBA)

13

⁶Universidad Nacional de la Plata (UNLP)

14

⁷Departamento de Geografía (FFyL/UBA)

15

16

Autor correspondiente: Iael Pérez, iaelperez@gmail.com

17

18

RESUMEN

19

20 En este trabajo se estudiaron las perturbaciones de la presión atmosférica en alta frecuencia
21 (ondas de gravedad atmosféricas, OGA) registradas en Mar del Plata durante 2013.
22 Mediante el análisis realizado con el método espectral *wavelets* se obtuvo que las
23 duraciones de los lapsos de actividad, la estructura espectral, la intensidad energética y las
24 amplitudes de las OGA son diferentes para cada evento. En general, los eventos activos
25 duran entre 5 y 20 h y las máximas fluctuaciones de presión están comprendidas entre 0.5 y
26 2 hPa, con periodicidades típicas entre 30 y 150 min. De los 37 casos de OGA detectados se
27 encontró que 24 están asociados a frentes fríos, 9 a frentes cálidos, y 4 están relacionados
28 con otros forzantes sinópticos. Se encontró que la mayoría de los eventos ocurren cuando la
29 zona frontal se ubica al N de la Patagonia y se desplaza hacia el E o NE. Se utilizó el

3

4

5 **Artículo en edición**

6

30 modelo Weather Research and Forecasting (WRF) para simular dos casos. En el primero se
31 observó un frente frío y un ciclón en superficie al S de la provincia de Buenos Aires y sobre
32 el océano mientras que en el segundo, un frente cálido al S de Buenos Aires que luego se
33 desplazó hacia el NO como frente frío. Los resultados obtenidos con el modelo WRF
34 indicarían que la dirección predominante de propagación de OGA en la región costera
35 bonaerense sería hacia el E-NE, discrepando con los escasos antecedentes disponibles para
36 la región que indican que la dirección de propagación sería hacia el ESE-SE.

37

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

40

41 **DESCRIPTION OF ATMOSPHERIC GRAVITY WAVES IN THE**
42 **BUENOS AIRES COAST, ARGENTINA**

43

44

ABSTRACT

45

46 High-frequency perturbations of the atmospheric pressure (atmospheric gravity waves,
47 AGW) measured at Mar del Plata in 2013 are studied in the present paper. Implementing
48 the wavelet spectral method it was obtained that the duration of the active lapses, the
49 spectral structure, the energy and the amplitudes of AGW are different for each event. It
50 was found that, in general, active events last between 5 and 20 h and that the maximum
51 pressure fluctuations range between 0.5 and 2 hPa, with typical oscillations between 30 and
52 150 min. From the 37 active cases of AGW, it was established that 24 are associated with
53 cold fronts, 9 with warm fronts, and 4 are related to other synoptic systems. It was found
54 that most of the events occur when the frontal zone is located at the northern Patagonia and
55 moves towards the E or NE. The Weather Research and Forecasting (WRF) model was
56 implemented and two cases were simulated. In the first case, a cold front and a cyclone
57 located at the southern Buenos Aires Province and on the ocean were observed. In contrast,
58 in the second case, a warm front was observed at the southern Buenos Aires Province,

7

8

9 **Artículo en edición**

10

59 which then moved towards the NW as a cold front. The results achieved with the WRF
60 model indicate that the predominant direction of propagation in the coastal region of
61 Buenos Aires could be towards E-NE, in disagreement with the available scarce
62 background for the region indicating that the direction of propagation could be towards the
63 ESE-SE.

64

65 **Key Words:** Atmospheric gravity waves; numerical modeling; WRF model; Buenos Aires
66 coast province

67

68 **1. INTRODUCCIÓN**

69

70 Las ondas de gravedad atmosféricas (OGA) constituyen un importante mecanismo para el
71 transporte vertical de energía y cantidad de movimiento. Las OGA pueden ser producidas
72 por distintas fuentes tales como la orografía (Long, 1955; Lilly y Kennedy, 1973), la con-
73 vección (Alexander y otros, 1995; Fovell, 2002), la convección profunda (Hoffmann y Ale-
74 xander, 2010), el ajuste geostrófico en regiones de inestabilidad baroclínica (Fritts y Luo,
75 1992; O'Sullivan y Dunkerton, 1995; Chagnon y Bannon, 2005, entre otros), la inestabili-
76 dad por cortante vertical (Mastrantonio y otros, 1976; Shen y Lin, 1999), y el pasaje de sis-
77 temas frontales (Gall y otros, 1988; Reeder y Griffiths, 1996). Estas ondas son importantes
78 para la determinación de la estructura térmica de la atmósfera baja y media (Lindzen and
79 Tung, 1976) y sus características principales se conocen desde hace varias décadas
80 (Queney, 1948; Scorer, 1949; Gossard and Munk, 1954; Palm, 1955; Sawyer, 1959). Para
81 avanzar en su conocimiento es necesario estudiar no sólo los mecanismos por los cuales se
82 generan sino también sus características, distribución y variabilidades (Zhang, 2004). Para
83 el caso de pasajes frontales, Uccellini y Koch (1987) presentaron un modelo conceptual del
84 entorno sinóptico en que se desarrollan las OGA. Dichos autores las ubican en la región
85 comprendida entre el punto de inflexión de la parte delantera de vaguada y el eje de cuña en
86 el nivel de 300 hPa, el cual se posiciona respecto a superficie, del lado frío de la superficie
87 frontal. Además los autores consideran un ingrediente fundamental la ubicación de la co-

11

12

13 **Artículo en edición**

14

88 riente en chorro de altura, ya que se ha encontrado que las OGA se desarrollan a la salida
89 del "jet streak" (donde el flujo es fuertemente difluente y desbalanceado) ubicada general-
90 mente en la región descrita anteriormente. Más recientemente Plougonven y Zhang (2013)
91 presentaron una revisión acerca del estado del conocimiento actual de las OGA en
92 inmediaciones de jets y frentes basada en observaciones de campo, teoría y modelado.

93

94 En Argentina, el estudio de las OGA asociadas a la orografía ha sido investigado, por
95 ejemplo, por De la Torre y otros (2012). Sin embargo, existe tan sólo un trabajo en la región
96 concerniente a la relación entre las OGA y los pasajes frontales (Nuñez y otros, 1998).
97 Dichos autores estudiaron un evento de OGA de gran amplitud en la costa de la provincia
98 de Buenos Aires ocurrido en octubre de 1985 que dio lugar a un meteotsunami en la región.
99 En dicho estudio se analizaron las dos únicas series disponibles de presión atmosférica
100 (analógicas) de alta resolución, cuya longitud es de aproximadamente dos días, obtenidas
101 en los faros Punta Médanos y El Rincón (Figura 1). Se encontró que los picos de energía
102 espectral estaban predominantemente ubicados entre 40 min y 2 h. Por otro lado, utilizando
103 la función coherencia concluyeron que se trataba de un fenómeno regional y que la
104 situación sinóptica durante el evento mostró la presencia de un frente frío en superficie y la
105 corriente en chorro en altura. Este resultado coincide con el señalado por Uccellini y Koch
106 (1987). Al presente no existen estudios locales que hagan uso de modelos numéricos para
107 estudiar el desarrollo de las OGA en la costa bonaerense. Sin embargo, en otras regiones
108 estas ondas fueron modeladas en las escalas sub-sinóptica de 100 a 600 km (por ejemplo, O
109 Sullivan y Dunkerton, 1995) y en la meso escala de 50 a 500 km (Zhang, 2004, entre
110 otros).

111

112 Existen evidencias que sostienen que el campo bórico asociado a las OGA constituiría el
113 forzante de los meteotsunamis en la costa bonaerense (Dragani y otros, 2002; Dragani,
114 2007). Sin embargo los estudios sobre la física de las OGA en esta región son muy escasos
115 (Nuñez y otros, 1998). El objetivo del presente trabajo es realizar una descripción
116 preliminar acerca de la duración típica de los eventos de OGA, las amplitudes máximas de

17 **Artículo en edición**

18

117 presión atmosférica asociada, el rango de periodicidades esperable y la dirección de
118 propagación de estas ondas en la costa bonaerense. Asimismo, examinar si durante el
119 desarrollo de cada uno de los casos de OGA se observa la presencia de una zona frontal en
120 la región de estudio y explorar la capacidad del modelo Weather Research and Forecasting
121 (WRF) para representarlas. Se espera que los resultados de este trabajo constituyan las
122 bases para una futura investigación permitiendo la implementación de OGA como forzantes
123 de un modelo de generación de tsunamis meteorológicos en la región de la plataforma
124 continental bonaerense.

125

126 **2. DATOS Y METODOLOGÍA**

127

128 Los datos de presión atmosférica utilizados en el presente estudio fueron obtenidos con una
129 estación meteorológica Davis con el sensor ubicado aproximadamente a 10 m sobre el nivel
130 del mar y con frecuencia de muestreo 1 min. Dicho instrumento estuvo instalado en el
131 Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP, 38.03° S, 57.53° O),
132 situado en Mar del Plata (Figura 1), y registró entre enero y diciembre de 2013. El equipo
133 midió con una resolución de 0.1 hPa y con una precisión de ± 1.0 hPa
134 (<http://www.davisnet.com/product/vantage-vue-wireless-weather-station/>). Si bien se
135 propuso medir durante todo el 2013, es necesario destacar que los registros de presión
136 atmosférica presentan lapsos relativamente largos con datos faltantes. Se utilizaron además
137 datos horarios de presión atmosférica de la estación Mar del Plata AERO (de aquí en más
138 AERO, 37.56° S, 57.35° O, altura del sensor 21 m sobre el nivel del mar) del Servicio
139 Meteorológico Nacional (SMN) ubicada aproximadamente a 12 km al NNO del INIDEP,
140 para realizar el control de la evolución de la presión en escala sinóptica registrada en el
141 INIDEP. La serie de datos de presión de la estación del SMN no presentó datos faltantes y
142 se asumió valedero el control de calidad realizado por dicha institución.

143

144 Por otro lado, con el fin de detectar la posible presencia de frentes en los eventos de OGA
145 se analizaron observaciones, cartas sinópticas de superficie e imágenes de satélite GOES-13

21 **Artículo en edición**

22

146 del SMN. Con los datos indicados en las cartas sinópticas (presión, temperatura, viento,
147 humedad y nubosidad) registrados en las estaciones del SMN y con las isobaras se
148 identificaron las regiones de discontinuidad frontal. Se complementó el análisis con las
149 cartas correspondientes a los campos iniciales del modelo ETA-SMN, las cuales
150 permitieron observar con mayor detalle las zonas frontales. Además, se exploró la
151 estructura tridimensional de los sistemas atmosféricos utilizando campos de variables
152 meteorológicas en diferentes niveles para verificar la presencia de frentes. Finalmente, se
153 emplearon imágenes de satélites para complementar la información de la nubosidad
154 asociada a los sistemas frontales. Esto permitió ubicar con mayor exactitud la posición de
155 los frentes, principalmente en la región oceánica, donde no hay observaciones de superficie.
156

157 Sobre la serie de datos de presión de alta resolución (obtenidos con la estación
158 meteorológica Davis) se realizó un estricto control de calidad. En primer lugar se
159 eliminaron unos pocos datos espurios presentes en la serie (<1%). Seguidamente se
160 excluyeron algunos pocos datos que estaban fuera de rango (valores espurios), es decir, que
161 la diferencia entre el valor anterior o posterior al dato superaba dos veces el desvío estándar
162 correspondiente a la serie (<1% de la cantidad total de datos). En ambos casos los datos
163 descartados fueron reemplazados por valores interpolados linealmente entre el dato anterior
164 y posterior al eliminado. Luego, se detectaron breves lapsos con intervalo de muestreo
165 diferente a 1 min los cuales estaban asociados a problemas intrínsecos del instrumento.
166 Dichos lapsos no fueron considerados para el análisis resultando así seis períodos de datos,
167 entre 30 y 40 días aproximadamente, tal como se indica en la Tabla I. Finalmente, las series
168 de datos de alta resolución se contrastaron con los valores horarios obtenidos en la estación
169 AERO. La comparación indica que ambas series (Davis y AERO) muestran una diferencia
170 constante de aproximadamente 8 hPa, no atribuible al desnivel entre ambas estaciones. Sin
171 embargo se observó que ambas series poseen variabilidades horarias similares en el
172 comportamiento de la presión. Luego de algunos ensayos, se diseñó un filtro de Hamming
173 de 251 elementos (Hamming, 1977) del tipo pasa-altos, con período de corte 3 h. Mediante
174 la convolución entre dicho filtro y la serie de datos de presión se retuvieron las

23

24

25 **Artículo en edición**

26

175 perturbaciones de alta frecuencia correspondientes a las OGA. Dicha diferencia de 8 hPa,
176 probablemente atribuible a una incorrecta configuración de la estación Davis ("off set"), no
177 es relevante para el desarrollo de este estudio dado que se trabaja con la serie filtrada, es
178 decir, con perturbaciones de altas frecuencias.

179

180 Previamente al filtrado numérico, sobre la serie de presión atmosférica se aplicaron técnicas
181 espectrales y se detectó la presencia de la onda de marea semidiurna. El calentamiento de la
182 atmósfera debido a la radiación solar combinado con los procesos turbulentos de
183 calentamiento desde el suelo genera ondas internas con períodos diurnos y semidiurnos
184 (Lindzen y Chapman, 1969). Estas ondas causan oscilaciones regulares en los campos de
185 viento, temperatura y presión, las cuales se conocen como mareas en la atmósfera, que para
186 el caso de la presión recibe el nombre de marea barométrica. En la región de estudio la
187 mayor caída horaria de la presión media anual es de 2 hPa aproximadamente (Possia y
188 otros, 2014). Dicha componente semidiurna se estimó utilizando la técnica mínimos
189 cuadrados mediante el ajuste de una onda sinusoidal y fue filtrada de la serie de datos. En el
190 presente estudio se obtuvo una variación barométrica comprendida entre 1 y 1.4 hPa,
191 dependiendo del período analizado.

192 Para estudiar la estructura espectral en alta frecuencia de la presión atmosférica en Mar del
193 Plata se computaron, en primera instancia, los espectros (FFT) sobre series contiguas de 40 h
194 de duración y se les aplicó un suavizado basado en la técnica de promedios móviles. Según
195 Torrence y Campo (1998) el análisis espectral clásico (FFT) no es la herramienta más
196 apropiada para el estudio de señales transitorias. Esto es así ya que, en una señal transitoria, la
197 densidad de energía espectral estimada para una frecuencia particular resulta distorsionada
198 debido a que se superponen contribuciones correspondientes a lapsos de fuerte, mediana y
199 débil actividad de OGA, y de calmas. Una herramienta espectral que contempla la variabilidad
200 de la señales es la técnica *wavelet*, la cual es útil para describir perturbaciones de presión
201 atmosférica de pequeña amplitud (Tanaka y otros., 2014). El análisis espectral a través de
202 *wavelets* se ha tornado en una herramienta muy útil para estudiar variaciones de energía

27

28

203 localizadas en series temporales. Una de las ventajas de utilizar la técnica *wavelet* es que
204 permite estudiar procesos de varias escalas sobre un dominio finito (Lau y Weng, 1995). A
205 diferencia de la FFT posee la capacidad de tratar comportamientos no-estacionarios
206 (Daubechies, 1990). La descomposición de series temporales en tiempo-frecuencia permite
207 estudiar tanto los modos dominantes de variabilidad de la serie original, como así también las
208 variaciones temporales de éstos (Torrence y Campo, 1998). Los *wavelets* constituyen una
209 herramienta frecuentemente utilizada en estudios que incluyen la descripción de fenómenos no
210 estacionarios y se utilizaron en numerosos trabajos en las áreas de las ciencias de la atmósfera
211 como, por ejemplo, en estudios de la convección tropical (Weng y Lau, 1994), el ENSO (Gu y
212 Philander, 1995; Wang y Wang, 1996) y en oceanografía para el análisis de meteotsunamis
213 (Pérez y Dragani, 2017). Consecuentemente, en este trabajo también se aplicó el análisis
214 espectral a través de *wavelets* para estudiar la serie de presión atmosférica de alta
215 resolución, registrada en Mar del Plata en 2013 computado con el método de Morlet
216 (Torrence y Campo, 1998). La ventaja de utilizar el método de Morlet fue documentada en
217 distintos trabajos como, por ejemplo, Lau y Weng (1995).

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

228 Al disponerse de tan solo un registro de presión atmosférica de alta resolución en Mar del
229 Plata (Figura 1) no es factible determinar la dirección de propagación ni la estructura
230 espacial de los campos de OGA a partir de las observaciones. Consecuentemente, se

33 **Artículo en edición**

34

231 recurrió a la simulación numérica en alta resolución utilizando el modelo WRF-ARW
232 (WRF) en la versión 3.3.1 (Skamarock y otros, 2008) con el que se diagnosticó la evolución
233 del campo de presión atmosférica. El modelo WRF se utilizó satisfactoriamente en diversas
234 partes del mundo para simular OGA como, por ejemplo, en el sector occidental de la cuenca
235 Mediterránea (Costantino y otros, 2015), en Nueva Zelanda (Kruse y Smith, 2015) y en China
236 (Su y Zhai, 2017). Particularmente, se usó en las islas Baleares para el estudio de la
237 predictibilidad de meteotsunamis. En este caso las OGA simuladas con el modelo WRF
238 sirvieron como forzante de un modelo oceánico (Renault y otros, 2011).

239 El modelo WRF se implementó en una retícula de 4 km (0.036°) de resolución horizontal y 43
240 niveles verticales sigma-p, con tope en 50 hPa. El dominio de simulación se extendió entre los
241 paralelos 34.8° S y 44.8° S, y entre los meridianos de 66.5° O y 53.5° O. Este dominio abarca
242 todo el litoral atlántico bonaerense y parte de la costa patagónica, hasta el S de Chubut, junto
243 con el océano adyacente. Las simulaciones se extendieron durante 48 h generando campos de
244 presión atmosférica a nivel del mar, viento y tasa de precipitación cada 5 min. El modelo
245 WRF fue inicializado y forzado en los bordes por el modelo de pronóstico operativo Global
246 Forecasting System (GFS) el cual tiene una resolución horizontal de 0.5° y una temporal de 3
247 h.

248

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

35

36

259 **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

260

261 **3.1. Análisis y descripción espectral de las OGA**

262

263 En la Figura 2.a y b se muestran, a modo de ejemplo, las series de presión observada y
264 filtrada para un período de noviembre de 2013, respectivamente. En la Figura 2.a se
265 observa que la presión presenta una importante variabilidad en la escala sinóptica, con
266 variaciones comprendidas entre 1007 y 1031 hPa, aproximadamente. Asimismo, pueden
267 detectarse algunos lapsos en los que hay variabilidad de alta frecuencia (con períodos
268 comprendidos entre algunos minutos y 3 h) los cuales se aprecian más claramente en la
269 serie filtrada (Figura 2.b) donde las fluctuaciones de la presión superan los 2 hPa. En las
270 Figuras 2.c y d se muestra un detalle de las Figuras 2.a y b, respectivamente, entre los días
271 14/11 01:00 y 16/11 00:00 en donde se puede apreciar un lapso con gran actividad de OGA.
272 El comienzo de la actividad de OGA ocurre el 14/11 a las 18:00 (Figura 2.d) y se manifiesta
273 durante un mínimo relativo de presión (Figura 2.c) asociado al pasaje de un frente frío por
274 la región de estudio como se explicará más adelante.

275 Por otro lado, se muestra la estructura espectral en alta frecuencia de la presión atmosférica en
276 Mar del Plata. A modo de ejemplo, en la Figura 3 pueden observarse tres espectros
277 suavizados con promedios móviles de siete elementos. Los mismos corresponden a tres
278 lapsos registrados en noviembre con diferentes características en la actividad de OGA
279 (Figura 2.b). Puede apreciarse que los tres espectros tienen algunas características básicas
280 similares, es decir, la mayor parte de la energía se concentra entre 0.33 y 2-3 ciclos por hora
281 (cph). Sin embargo, cada uno presenta rasgos particulares. En el espectro de la Figura 3.a
282 (14-16 de noviembre) se observan dos máximos distintivos, el mayor ubicado en 0.84 cph
283 (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-
284 24 de noviembre, respectivamente) presentan estructuras más parecidas entre sí, con
285 máximos espectrales ubicados en frecuencias un poco más bajas que el primer caso,
286 aproximadamente en 0.5 cph (2 h).

41 **Artículo en edición**

42

287 Sobre la serie de presión atmosférica filtrada se calculó la varianza considerando lapsos
288 consecutivos de 72 h. Luego de algunos ensayos se estableció que el valor de varianza de
289 0.18 hPa^2 podría considerarse como el valor límite (umbral) para caracterizar
290 preliminarmente el inicio de los lapsos de actividad de OGA. De esta manera se detectaron
291 objetivamente 37 casos (Tabla I) en los cuales la varianza superó el umbral establecido. La
292 duración de cada caso se calculó mediante la determinación de sus instantes iniciales y
293 finales, identificando el comienzo y la finalización de oscilaciones béricas con amplitudes
294 superiores a $\pm 0.3 \text{ hPa}$. El error cometido en este proceso es inferior a $\pm 6 \text{ min}$. En la Tabla I
295 se presenta la duración del caso y la intensidad de la máxima fluctuación (medida entre el
296 valle y la cresta, en hPa) para cada uno de los 37 eventos. Se observa que las duraciones
297 están comprendidas entre 3.8 (evento 10) y 45.7 h (evento 21), notándose que la mayoría de
298 los eventos duran entre 5 y 20 h. Las máximas perturbaciones de presión están
299 comprendidas entre 0.5 (evento 32) y 5.2 (evento 21) hPa pero, en general, se encuentran
300 entre 0.5 y 2 hPa. Estos resultados coinciden con los indicados por Nuñez y otros (1998)
301 quienes hallaron amplitudes de hasta 2.5 hPa y frecuencias entre 0.5 y 2 cph para la misma
302 región de estudio. Asimismo, son del orden de los descritos por Uccellini y Koch (1987)
303 para Estados Unidos de Norte América con amplitudes comprendidas entre 0.2 y 7 hPa y
304 períodos entre 1 y 4 h.

305 Como se comentara precedentemente, en la Figura 2.b se aprecia que la actividad de las OGA
306 tiene un claro comportamiento transitorio, es decir, hay lapsos activos relativamente cortos
307 separados por prolongados períodos de muy baja actividad. Para analizar esta señal
308 transitoria se utilizó la técnica de *wavelets* cuyos resultados se muestran en las Figuras 4 a 9.
309 Para facilitar el análisis de los resultados se presentan las series de presión filtrada (paneles
310 superiores) y el *wavelet* correspondiente a cada una (paneles inferiores). En las Figuras 6 y
311 se destacan dos lapsos de intensa actividad de OGA los cuales fueron simulados
312 numéricamente con el modelo WRF descrito en la Sección 2. En la Tabla I se indican los
313 eventos clasificados según el tipo de situación sinóptica. Los eventos con actividad de OGA
314 pueden abarcar a más de un tipo de situación. Por ejemplo, los casos 32-34 comienzan con

43

44

45 **Artículo en edición**

46

315 un frente caliente que luego evoluciona como frente frío que se desplaza hacia el NE.

316 En la Figura 4 se observa que entre el 20 de febrero y el 21 de marzo ocurrieron tres lapsos
317 con actividad de OGA (período I, casos 1-4, Tabla I). Primeramente, entre el 22 y 25 de
318 febrero, puede observarse un lapso con amplitudes máximas ubicadas entre 30 y 150 min.
319 Debe destacarse que en ese lapso se distinguen dos casos de actividad, con oscilaciones de
320 hasta 2 hPa (casos 1 y 2, Tabla I). Luego de un prolongado lapso caracterizado por un nivel
321 bajo de energía espectral, reaparece la actividad de OGA entre el 28 de febrero y el 3 de
322 marzo (caso 3, Tabla I) en una banda de períodos similar a la del caso anterior. Finalmente,
323 y luego de un período de muy baja actividad, el 6 de marzo se inicia un evento prolongado
324 pero algo más difuso (caso 4, Tabla I). La amplitud máxima para este evento se observa el
325 10 de marzo, pero ésta es menor que la apreciada en los casos anteriores y cubre un rango
326 de períodos comprendido entre 70 y 130 min.

327 En la Figura 5, correspondiente al lapso comprendido entre el 23 de marzo y el 30 de abril,
328 se aprecian varios eventos de actividad de OGA pero menos definidos que en el lapso
329 anteriormente descrito (período II, casos 5-8, Tabla I). La determinación de los instantes
330 de inicio y finalización son menos distinguibles ya que a lo largo de toda serie se dan
331 pequeños eventos de moderada o baja actividad. Los tres eventos más importantes
332 presentan su máximo nivel de energía el 25 de marzo, el 11 y el 27 de abril (casos 5, 7 y 8,
333 respectivamente, Tabla I), caracterizados por una estructura espectral relativamente similar,
334 es decir, concentrando la máxima energía en un lapso de tiempo relativamente pequeño,
335 con períodos comprendidos entre 50 y 135 min.

336 La serie de presión filtrada y su respectivo *wavelet* correspondiente al periodo comprendido
337 entre el 28 mayo y el 1 de julio se presenta en la Figura 6 (período III, casos 9-12, Tabla I).
338 En la misma pueden detectarse tres eventos con relativamente alta actividad de OGA, con
339 fluctuaciones de la presión de aproximadamente 2 hPa, con energía espectral distribuida
340 entre 75 y 135 min (casos 9, 11 y 12, Tabla I). En la Figura 7 se muestra la serie de presión
341 filtrada y su respectivo *wavelet* para el período comprendido entre el 12 de agosto y el 26

49 **Artículo en edición**

50

342 de septiembre (período IV, casos 13-23, Tabla I). Durante este lapso puede observarse dos
343 eventos de OGA caracterizados por variaciones de la presión atmosférica en alta frecuencia
344 de hasta 6 hPa. El primero, de unas pocas horas de duración, se registró el 20 de agosto y
345 presenta contribuciones espectrales distribuidas entre 30 y 150 min (caso 13, Tabla I). El
346 segundo evento, más prolongado, comienza el 10 de septiembre y contiene contribuciones
347 espectrales entre 10 y 150 min (caso 21, Tabla I).

348 La serie de presión atmosférica filtrada y su correspondiente *wavelet*, para el período
349 comprendido entre el 12 al 30 de noviembre, se presenta en la Figura 8 (período V, casos
350 24-31, Tabla I). Tanto la estructura temporal como espectral de este período muestra una
351 buena semejanza con la serie de tiempo y el *wavelet* de la Figura 4. Es decir, se observan
352 varios eventos de actividad de OGA, separados por lapsos de relativamente baja energía. Si
353 bien hay algunos eventos de débil actividad de OGA, pueden notarse tres eventos intensos.
354 El primero está centrado en las últimas horas del 14 de noviembre (caso 24, Tabla I), el
355 segundo se manifiesta el 24 de noviembre (caso 29, Tabla I) y el tercero el 29 de noviembre
356 de 2013 (caso 31, Tabla I). Las fluctuaciones de presión son de hasta 2.5 hPa y las
357 contribuciones espectrales aparecen entre 30 y 140 min. En cambio, los eventos más
358 débiles presentan contribuciones espectrales en una banda más acotada, con periodicidades
359 mayores a 60 min, aproximadamente. Finalmente, en la Figura 9 se muestra la serie de
360 presión filtrada y el *wavelet* para el período comprendido entre el 1 y el 21 de diciembre de
361 2013 (período VI, casos 32-37, Tabla I). En este caso los eventos son breves pero
362 claramente distinguibles. El primer evento puede observarse entre el 1 y 2 de diciembre
363 (casos 32-34, Tabla I). Luego de unos días de relativamente baja actividad de OGA, el 7 de
364 diciembre (caso 35, Tabla I) la energía espectral se intensifica abarcando casi toda la banda
365 estudiada (10 a 150 min.). Posteriormente se registraron dos débiles eventos de OGA, el 13
366 y el 17 de diciembre, con contribuciones espectrales ubicadas en una banda de frecuencias
367 relativamente acotada, asociada a períodos comprendidos entre 90 y 140 min.,
368 aproximadamente (casos 36 y 37, respectivamente, Tabla I).

369 Como se observa de las Figuras 4 a 9 y de la Tabla I, las OGA son un fenómeno

51

52

370relativamente frecuente en la región costera bonaerense. Puede apreciarse que las OGA no
371se manifiestan siempre con las mismas características. Es decir, las duraciones de los lapsos
372de actividad, la estructura espectral, la intensidad energética y las amplitudes son muy
373diferentes para cada caso. Finalmente, se realizó un análisis exploratorio particular sobre
374cada uno de los eventos y se observó que en algunos de ellos la actividad de OGA puede
375manifestarse como un único paquete de ondas (Figura 3.a), en otros casos como
376fluctuaciones irregulares intermitentes con diferentes duraciones (Figura 3.b), o también
377como dos o más paquetes de ondas (Figura 3.c).

3783.2. Presencia de frentes durante casos de OGA

379Los frentes constituyen una fuente de OGA (Uccellini y Koch, 1987). Nuñez y otros (1998)
380también reportaron la presencia de un frente frío asociado a un sistema de baja presión en
381superficie durante un período de actividad de OGA en la costa bonaerense. En consecuencia
382se analizó si durante el desarrollo de cada uno de los casos de OGA (Tabla I) se observaba
383la presencia de una zona frontal en la región de estudio. De las 37 situaciones sinópticas
384durante las cuales hubo actividad de OGA se encontró que 24 están asociados a frentes fríos
385(FF), 9 a frentes cálidos (FC) y 4 están relacionados con otros forzantes sinópticos. Es
386decir, de los 37 casos estudiados, en 33 se detectó la presencia de frentes en la zona de
387interés. Por lo tanto, si bien habría que realizar una investigación más profunda, en
388principio se podría considerar que la presencia de frentes en la región sería un indicador de
389actividad de OGA. En consecuencia, esto daría un primer indicio para la búsqueda de
390períodos activos de meteotsunamis en la región costera bonaerense.

391 Un análisis más detallado de la ubicación de los FF y FC (33 casos) permitió conocer que
392la mayoría de los casos ocurren cuando una zona frontal se ubica al N de la Patagonia (16
393casos) y luego se desplaza hacia el E o NE. Se observó, además, que algunos frentes se
394posicionaron al S de la provincia de Buenos Aires (2 fríos y 5 cálidos) mientras que otros lo
395hacen al N (3 fríos y 2 cálidos) o en el centro (2 fríos y 2 cálidos) de la provincia. A
396diferencia de lo señalado por Nuñez y otros (1998) se encontró que varios eventos de OGA

397 están vinculados a la presencia de FC asociados a una masa de aire muy inestable y cálida,
398 la cual favorece el desarrollo de lluvias y tormentas principalmente al S y en el litoral
399 marítimo bonaerense. Por otro lado, se pudieron identificar 4 casos en los cuales las OGA
400 no estaban asociadas a la presencia de frentes sino que se observaron sistemas de bajas
401 segregadas en niveles altos, frentes de origen polar al O de la provincia de Buenos Aires, o
402 bien perturbaciones de onda corta precursoras de tormentas al N de la Patagonia,
403 principalmente en el litoral marítimo. Si bien de los 37 casos en 33 se observaron frentes en
404 superficie, los resultados obtenidos sugieren que el origen de las OGA podrían estar
405 asociado a distintos forzantes (Fritts y Alexander, 2003) y no únicamente a sistemas
406 frontales tal como se describiera en Nuñez y otros (1998). Es de destacar que gran parte de
407 los casos estudiados están relacionados con la presencia de tormentas. Las mismas se
408 desarrollan cerca de la costa, entre Bahía Blanca y Mar del Plata, tanto sobre el continente
409 como en el océano. Considerando que los datos de campo son insuficientes como para
410 avanzar en el estudio de las OGA, sobre todo en lo que se refiere a la dirección de
411 propagación, el análisis descripto en este trabajo se complementó con simulaciones
412 numéricas realizadas con el modelo WRF.

413 **3.3. Descripción y modelado numérico de situaciones sinópticas asociada a las OGA.**

414 Con el fin de obtener detalles de la propagación de OGA se modelaron dos situaciones, una
415 ocurrida en junio (caso 11, Tabla I) y la otra en diciembre (casos 32-34, Tabla I) de 2013.
416 Ambas situaciones fueron seleccionadas ya que para las mismas se dispone de series de
417 datos en donde se observa actividad simultánea e intensa de OGA y de meteotsunamis. De
418 esta manera, es factible encarar el estudio numérico de la generación de meteotsunamis a
419 través de OGA. Dichos eventos de OGA ocurrieron en distintos entornos sinópticos, uno en
420 presencia de un FF (caso 11) y otro durante un FC (casos 32-34) el cual evolucionó como
421 FF. Además, durante dichas situaciones se detectaron tsunamis meteorológicos en Mar del
422 Plata. Se recurrió entonces a la simulación numérica de las dos situaciones mencionadas
423 implementando el modelo WRF. Este modelo permite representar las condiciones que
424 dieron lugar al desarrollo de las OGA y simular su evolución espacio-temporal en alta

61 Artículo en edición

62

425 resolución. El análisis detallado de los procesos involucrados al origen, desarrollo,
426 sostenimiento y decaimiento de las OGA supera el objetivo del presente estudio y será
427 investigado en un trabajo futuro. La información de campo en alta resolución temporal es
428 muy escasa en la región, como se explicó, tan sólo se dispone de la estación Davis instalada
429 en el INIDEP como para validar las series de presión atmosférica en alta frecuencia
430 simuladas por WRF. A modo de ejemplo, en la Figura 10, se presentan las series de presión
431 observada en el INIDEP (filtrada y sin filtrar) y simulada (filtrada) correspondientes a los
432 casos 32-34 (Tabla I) en el nodo más cercano al INIDEP (aproximadamente a 2 km de
433 distancia) y sus respectivos wavelets. En la Figura 10.a se aprecia un decrecimiento general
434 de la presión atmosférica entre 1021 y 1016 hPa, entre el 1ro. y el 2 de diciembre de 2013.
435 Hacia el final del 1ro. de diciembre se observan dos perturbaciones de alta frecuencia que
436 superan los 4 hPa (entre valle y cresta). Aunque el modelo WRF subestima en
437 aproximadamente 2 hPa el pico máximo de la fluctuación bórica observada (Figura. 10.b),
438 se aprecia que logra representar temporalmente bien el lapso de mayor actividad de OGA y
439 la posición de las fluctuaciones principales. Resultados similares a estos fueron reportados
440 por Renault y otros (2011) utilizando el modelo WRF en la región de las islas Baleares. En
441 la Figura 10.c y d se muestran los wavelets para la serie de presión atmosférica filtrada
442 modelada y medida, respectivamente. En ambas figuras los máximos de energía cubren un
443 rango de períodos entre 1 y 3 h, aproximadamente, y poseen una estructura espectral muy
444 parecida. Esto muestra que la arquitectura implementada para el modelo WRF logra
445 representar razonablemente las OGA en la región costera bonaerense.

446 El 1ro. de junio a las 00Z un sistema de baja presión en superficie con una vaguada en
447 niveles medios se ubicó en las costas de Chile, y se propagó hacia el E con un flujo del O
448 sobre el S de Buenos Aires. Un FF débil se desplazaba hacia el E de Mar del Plata con
449 fuerte desarrollo convectivo desde Uruguay hacia el S (figura no mostrada). Rápidamente
450 comenzó a formarse un sistema frontal al N de la Patagonia con un sistema nuboso en
451 forma de banda ubicado por delante del FF. Hacia las 05Z, momentos antes de la ocurrencia
452 de la rápida fluctuación de la presión de superficie (Figura 6.a), el FF se localizó al O de La
453 Pampa extendiéndose hasta la península de Valdés. A las 10Z la perturbación se desplazó

63

64

65 **Artículo en edición**

66

454 hacia el E alcanzado el S de la provincia de Buenos Aires, con desarrollos convectivos en
455 forma de banda claramente observables en la imagen de topes nubosos (Figura 11.a y c). El
456 modelo WRF representó adecuadamente el avance del frente (caso 11), con el flujo del NO
457 asociado al avance de la vaguada frontal que se detecta en el campo de presión y viento a
458 nivel del mar. A las 14Z (Figura 11.b y d) se observa que el eje de la vaguada frontal se
459 posicionó al O de la provincia de Buenos Aires presentando un desarrollo convectivo más
460 debilitado tanto por delante como por detrás del FF mientras que en el litoral oceánico la
461 nubosidad presenta un mayor desarrollo vertical siguiendo a la zona frontal hasta la parte
462 ocluida del frente ubicada al este de la costa norte Patagónica. Luego, el sistema frontal se
463 desplazó hacia el E y hacia el final del evento (02/06/2013 00Z) se ubicó cerca de Mar de
464 Plata.

465

466 A diferencia del caso 11, la segunda situación analizada (casos 32-34) comenzó con un FC
467 ubicado al S de la provincia de Buenos Aires y con la presencia de una masa de aire cálida
468 e inestable en la región de Buenos Aires y La Pampa. Junto al frente se posicionó una onda
469 corta en niveles medios de la atmósfera al SO de Buenos Aires que favoreció desarrollos
470 convectivos en el litoral marítimo hasta Mar del Plata. Las tormentas se mantuvieron al S
471 de la costa durante el desarrollo de la perturbación de la presión entre las 06Z y las 10Z
472 (figura no mostrada). A las 18Z una vaguada invertida se posiciona al S de la costa
473 bonaerense, con flujo del NO y con desarrollo de tormentas que se identifican con los topes
474 nubosos de la imagen de satélite y de reflectividad del modelo (Figura 13.a y c). El modelo
475 WRF simuló adecuadamente la posición del FC. Más tarde, una nueva perturbación de
476 niveles medios al N de la Patagonia favoreció la transformación del FC en un FF con
477 orientación NO-SE ubicado al S de la provincia de Buenos Aires (Figura 13.b). Este FF está
478 asociado a nuevos eventos de OGA (casos 33 y 34), luego el frente se movió lentamente
479 hacia el E presentando desarrollos convectivos cerca de Mar del Plata y en el océano
480 adyacente (Figura 13.b y d). En ambas situaciones analizadas existió una zona frontal pero
481 las situaciones sinópticas fueron diferentes. En la primera (caso 11) se observó un FF con
482 un ciclón en superficie al S de la provincia de Buenos Aires y sobre el océano. En cambio,

67

68

69 **Artículo en edición**

70

483 la segunda (casos 32-34), se caracterizó por la presencia de un FC al S de Buenos Aires que
484 luego se desplazó hacia el NO como FF.

485

486 Se observó que el modelo WRF fue capaz de simular el entorno sinóptico y de mesoescala
487 asociados a los eventos de OGA, como así también a las fluctuaciones barométricas de alta
488 frecuencia. En ambas situaciones se examinó la propagación de las OGA mediante el
489 campo de perturbaciones de presión al nivel del mar, obtenidas a través de un filtrado
490 numérico (Figuras 12 y 14). En la Figura 12 se presentan los campos de presión filtrada
491 para el 1ro. de junio de 2013 entre las 10 y 13Z. En las mismas se observa que las OGA se
492 propagan predominantemente de O a E, coincidentemente con la dirección de propagación
493 de los sistemas sinópticos, con perturbaciones béricas comprendidas entre -0.8 y 1 hPa. Se
494 observa, además, un fuerte patrón de propagación de OGA en la zona adyacente a Bahía
495 Blanca, sobre la Provincia de Buenos Aires (Figura 12 c y d). Sin embargo, dado que el
496 principal interés de este trabajo es el estudio de la propagación de OGA en la zona costera
497 bonaerense, con miras a la generación de meteotsunamis, dicho patrón aunque más intenso
498 que el costero, no es analizado en detalle. De la misma manera, en la Figura 14 se muestran
499 los campos correspondientes al 1ro. de diciembre de 2013 entre las 20 y 23Z. Inicialmente
500 se ve que la actividad de OGA está acotada entre Necochea y Mar del Plata,
501 aproximadamente. En los campos presentados se aprecia que el tren de OGA también se
502 propaga predominantemente hacia el E. Para este evento simulado las perturbaciones
503 béricas que fluctúan entre -1.2 y 1 hPa.

504

505 A modo de ejemplo, se presentan las series de presión atmosférica (filtradas) para el caso
506 33 a lo largo de una transecta orientada en la dirección de propagación del frente (SSO-
507 NNE). Sobre la misma se analizó la presión en seis sitios, equi-espaciados 90 km, los
508 cuales se indican como 1-6 en la Figura 1. Se obtuvo que las perturbaciones asociadas a las
509 OGA son débiles (< 0.3 hPa) para los sitios 1, 5 y 6 (Figura 15). La actividad se manifiesta
510 más intensamente alcanzando fluctuaciones del orden de 1 hPa entre los sitios 2-4, con
511 valores máximos de hasta 2 hPa en el sitio 3. Del análisis de la Figura 15 se aprecia que

71

72

73 **Artículo en edición**

74

512 para el caso simulado (33) la zona de mayor actividad de OGA se acota a una franja de
513 latitudes relativamente angosta, ubicada en torno de los 38° S, en la zona de Mar del Plata.
514 El análisis de la variabilidad espacial y de la amplificación de OGA en este sector de la
515 provincia de Buenos Aires merece un estudio numérico particular el cual escapa a los
516 objetivos planteados en el presente trabajo.

517

518 Los escasos antecedentes disponibles para la región (Nuñez y otros, 1998) sugirieron que
519 las OGA se propagan en la misma dirección que la corriente en chorro intensa de altura
520 (CCi), es decir, hacia el SE. Sin embargo, en el caso 11 se observan trenes de OGA
521 propagándose hacia el E-NE siguiendo al FF y no se apreció a la CCi. El eje de entrada del
522 máximo de viento en altura se ubicó sobre el océano Atlántico en 50°S y no superó los 60
523 ms^{-1} (figura no mostrada). En el caso 32-34 se observan perturbaciones de presión
524 superiores a 0.5 hPa en la región costera de Buenos Aires (Figura 14), indicando también la
525 propagación de OGA hacia el E-NE. Durante esta situación la propagación de OGA es
526 paralela al FC y sigue el desplazamiento de las tormentas que se ubicaron levemente hacia
527 el N de la costa bonaerense. Este caso guarda algunas similitudes con el modelo propuesto
528 por Uccellini y Koch (1987). Dicho modelo postula que las OGA se desarrollan en el punto
529 de inflexión entre la parte delantera de la vaguada y la trasera de la cuña, y se propagarían
530 hacia el SE (lado polar) siguiendo el movimiento del flujo, coincidiendo con lo sugerido
531 por Nuñez y otros (1998). Sin embargo, durante este evento no se observó la clara
532 presencia de una CCi en niveles altos. Tan solo se apreció un máximo local de viento de 30
533 ms^{-1} en 300 hPa en la parte delantera de la vaguada de onda corta (42° S, 57° O) estando el
534 eje de salida de la CC al S de la provincia de Buenos Aires (figura no mostrada). Las
535 perturbaciones de presión asociadas a las OGA se ubicaron del lado polar del FC y se
536 propagaron siguiendo la posición de la zona convectiva, como se aprecia en la Figura 14.
537 En este caso la convección profunda podría ser el indicador de la presencia de OGA y
538 reforzaría la presencia de las mismas (Fritts y Alexander, 2003). Esto último podría estar
539 relacionado, tal como muestran los resultados del modelo WRF, con las descendentes de la
540 precipitación que podrían generar una perturbación positiva en la presión de superficie

75

76

77 **Artículo en edición**

78

541 reforzando el desarrollo de las OGA. Aquí aparecería una dificultad adicional para modelar
542a las OGA, dado que si bien el WRF es capaz de simular la convección, no se puede
543 garantizar que éste represente correctamente la ubicación y el momento exacto de la
544 convección. Estos resultados preliminares, si bien inéditos para la región, requieren de un
545 estudio más profundo que involucre una mayor cantidad de eventos para determinar los
546 mecanismos que generan, sostienen y determinan la propagación de OGA en la provincia
547 de Buenos Aires.

548

549 **5. CONCLUSIONES**

550

551 En el presente trabajo se caracterizó la duración típica, las amplitudes máximas y el rango
552 de periodicidades esperable de las OGA registradas en Mar del Plata en 2013. Por otro lado,
553 se catalogaron las situaciones sinópticas en las cuales se desarrollaron los 37 casos de OGA
554 detectados. Complementado este estudio se implementó el modelo WRF en alta resolución
555 y se exploró su capacidad para simular la propagación de OGA en la región bonaerense.

556

557 Del análisis realizado sobre cada caso de actividad de OGA se obtuvo que, en general,
558 duran entre 5 y 20 h y que la máximas fluctuaciones de presión están comprendidas entre
559 0.5 y 2 hPa, con periodicidades típicas entre 30 y 150 min. De los 37 casos detectados se
560 encontró que 24 están asociados a FF, 9 a FC, y 4 están relacionados con otros forzantes
561 sinópticos. Un análisis más detallado de la ubicación de los FFs y FCs (33 casos) permitió
562 conocer que la mayoría de los casos tienen lugar cuando se ubica una zona frontal al N de
563 la Patagonia (16 casos) que se desplaza hacia el E o NE (Tabla I).

564

565 Se concluye que las OGA son un fenómeno relativamente frecuente en la región costera
566 bonaerense. Se realizó un estudio exploratorio particular sobre cada uno de los eventos y se
567 observó que en algunos de ellos la actividad de OGA puede manifestarse como un único
568 paquete de ondas (Figura 3.a), en otros casos como fluctuaciones irregulares con diferentes
569 duraciones (Figura 3.b), o también como dos o más paquetes de ondas (Figura 3.c). Esto

81 **Artículo en edición**

82

570 queda claramente visualizado a través del análisis realizado con el método espectral
571 *wavelet* (Figuras 4 a 9). De dicho análisis puede apreciarse que las duraciones de los lapsos
572 de actividad, la estructura espectral, la intensidad energética y las amplitudes de las OGA
573 son variables para cada evento.

574

575 Se implementó el modelo numérico de alta resolución WRF para estudiar los campos de
576 OGA (principalmente dirección de propagación y amplitud) en la región de estudio, con el
577 fin de obtener un forzante atmosférico realista para la generación de meteotsunamis. Se
578 simularon dos situaciones, una ocurrida en junio (caso 11) y otra en diciembre (caso 33) de
579 2013 (Tabla I). En la primera se observó un FF y un ciclón en superficie al S de la provincia
580 de Buenos Aires y sobre el océano. En cambio, en la segunda, se observó un FC al S de
581 Buenos Aires que luego se desplazó hacia el NO como FF. En ambos casos el modelo WRF
582 logró simular el entorno sinóptico y de mesoescala, como así también las fluctuaciones
583 barométricas asociadas a las OGA. En el caso 11 las OGA se propagan hacia el E-NE
584 siguiendo al FF (Figura 12.c y d), no observándose la CCi. En el caso 33 la propagación de
585 OGA también es hacia el E-NE (Figura 14.c y d) pero paralelamente al FC, notándose
586 algunas similitudes con el modelo propuesto por Uccellini y Koch (1987) y con lo hallado
587 por Nuñez y otros (1998). Los resultados obtenidos con el modelo WRF, sobre la base de
588 dos eventos activos de OGA simulados, indican que la dirección predominante de
589 propagación en la región costera bonaerense sería hacia el E-NE, difiriendo de lo hallado
590 por Nuñez y otros (1998) quienes señalaron, basados en especulaciones teóricas, que la
591 misma sería hacia el ESE-SE. Los resultados de este trabajo, si bien son preliminares,
592 representan la primera investigación que documenta la existencia de las OGA en la costa
593 bonaerense como un fenómeno frecuente. Además, los resultados obtenidos manifiestan la
594 necesidad de avanzar en el conocimiento de las OGA en la región.

595

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

83

84

85 **Artículo en edición**

86

599

600 **REFERENCIAS**

601

602 **Alexander, M. J., Holton, J. R., and Durran, D. R., 1955:** The gravity Wave Response
603 above Deep Convection in a Squall Line Simulation. *J Atmos Sci*; 52(12).

604 **Chagnon, J. M., and Bannon, P. R., 2005:** Wave Response during Hydrostatic and Geo-
605 strophic Adjustment. Part I: Transient Dynamics. *Journal of the Atmospheric Sciences*,
606 <https://doi.org/10.1175/JAS3283.1>

607 **Chen, F., and J. Dudhia, 2001:** Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with
608 the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementa-
609 tion. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 569–585.

610 **Costantino, L., Heinrich, P., Mzé, N. and Hauchecorne A. 2015:** Convective Gravity
611 Wave Propagation and Breaking in the Stratosphere: Comparison between WRF Model
612 Simulations and Lidar Data.” *Annales Geophysicae*, vol. 33, no. 9, 2015, pp. 1155–71,
613 doi:10.5194/angeo-33-1155.

614

615 **Daubechies, I., 1990:** The wavelet transform time-frequency localization and signal analy-
616 sis. *IEEE Trans. Inform. Theory* 36: 961–1004.

617 **Dragani, W. C., Mazio, C. A., and Nuñez, M. N., 2002:** Sea level oscillations in coastal
618 waters of the Buenos Aires province, Argentina. *Continental Shelf Research*, 22 (5), 779-
619 790. doi: 10.1016/S0278-4343(01)00096-6

620 **Dragani, W. C., 2007:** Numerical experiments on the generation of long ocean waves in
621 coastal waters of the Buenos Aires province, Argentina. *Continental Shelf Research*, 27 (5),
622 699-712. doi: 10.1016/j.csr.2006.11.009

87

88

89 **Artículo en edición**

90

623 **Dudhia, J., 1989:** Numerical study of convection observed during the winter monsoon ex-
624 periment using a mesoscale two-dimensional model, *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3077–3107.

625 **Fovell, R. G., 2002:** Upstream influence of numerically simulated squall-line storms. Quar-
626 terly Journal of the Royal Meteorological Society, 128: 893–912.
627 doi:10.1256/0035900021643737

628 **Fritts, D. C., and Luo Z., 1992:** Gravity Wave Excitation by Geostrophic Adjustment of
629 the Jet Stream. Part I: Two-Dimensional Forcing. *Journal of the Atmospheric Sciences*,
630 [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)

631 **Fritts, D.C., and Alexander, M.J., 2003:** Gravity wave dynamics and effects in the middle
632 atmosphere. *Reviews of geophysics*, 41(1).

633 **Gall, R. I., Williams, R. T., and Clark, T. L., 1988:** Gravity waves generated during fron-
634 togenesis. *J. Atmos. Sci.*, 45, 2204–2219.

635 **Gossard, E., and Munk, W., 1954:** On gravity waves in the atmosphere. *Journal of Meteo-*
636 *rology*, 11(4), 259-269.

637 **Grimsdell, A. W., Alexander, M. J., May, P. T., and Hoffmann, L., 2010:** Model Study
638 of Waves Generated by Convection with Direct Validation via Satellite. *Journal of the At-*
639 *mospheric Sciences*, 67(5).

640 **Gu, D. and Philander, S.G.H., 1995:** Secular changes of annual and interannual variability
641 in the tropics during the past century. *Journal of Climate*, 8(4), pp.864-876.

642 **Hamming, R. W., 1977:** *Digital Filters*. Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall.

643 **Hoffmann, L. and Alexander, M.J., 2010:** Occurrence frequency of convective gravity
644 waves during the North American thunderstorm season. *Journal of Geophysical Research:*
645 *Atmospheres*, 115(D20).

93 **Artículo en edición**

94

646 **Hong, S.-Y., J. Dudhia, and S.-H. Chen, 2004:** A Revised Approach to Ice Microphysical
647 Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation, *Mon. Wea. Rev.*, 132,
648 103–120.

649 **Janjic, Z. I., 2002:** Nonsingular Implementation of the Mellor–Yamada Level 2.5 Scheme
650 in the NCEP Meso model, NCEP Office Note, No. 437, 61 pp.

651 **Kruse, C. G., and Smith R.B, 2015:** Gravity Wave Diagnostics and Characteristics in
652 Mesoscale Fields. *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 72, no. 11, 2015, pp. 4372–92,
653 doi:10.1175/JAS-D-15-0079.1.

654 **Lau K. M., and Weng, H. 1995:** Climate signal detection using wavelet transform: how to
655 make a time series sing. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 76(12): 2391–2402

656 **Lilly, D. K., and Kenned and P. J., 1973.** Observations of a stationary mountain wave and
657 its associated momentum flux and energy dissipation, *J. Atmos. Sci.*, 30, 1135–1152.

658 **Lindzen, R. S., and Chapman, S., 1969:** *Atmospheric Tides*, 200 pp. D. Reidel, Norwell,
659 Mass.

660 **Lindzen, R. S., and Tung, K. K. ,1976:** Banded convective activity and ducted gravity
661 waves. *Monthly Weather Review*, 104(12), 1602-1617.

662 **Long, R. R., 1955:** Some aspects of the flow of stratified fluids, III, Continuous density
663 gradients, *Tellus*, 7, 341–357,

664 **Mastrantonio, G., Einaudi, F., Fua, D., and Lalas, D. P., 1976:** Generation of gravity
665 waves by jet streams in the atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 33(9), 1730-
666 1738.

667 **Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997:** Ra-
668 diative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for
669 the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102 (D14), 16663–16682.

97 **Artículo en edición**

98

670 **Mellor, G. L., and T. Yamada, 1982:** Development of a turbulence closure model for geo-
671 physical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, 851–875.

672 **Nuñez, M. N., Mazio, C. A., and Dragani, W. C., 1998:** Estudio espectral de un lapso de
673 intensa actividad de ondas de gravedad atmosféricas registradas en la costa bonaerense ar-
674 gentina. *Meteorológica*, 23(1), 47-54.

675 **O'sullivan, D., and Dunkerton, T. J., 1995:** Generation of inertia–gravity waves in a sim-
676 ulated life cycle of baroclinic instability. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 52(21),
677 3695-3716.

678 **Palm, E., 1955:** Multiple Layer Mountain Wave Models with Constant Stability and Shear.
679 University of California, Autobarotropic Flow Project.

680 **Pérez, I., and Dragani, W. C., 2017:** Spectral variability in high frequency in sea level and
681 atmospheric pressure on Buenos Aires Coast, Argentina. *Brazilian Journal of Oceanogra-
682 phy*, 65(1), pp.69-78.

683 **Plougonven, R., and Zhang, F., 2013:** Internal gravity waves from atmospheric jets and
684 fronts. *Reviews of Geophysics*, 52(1), 33-76.

685 **Possia, N., Cerne, B., and Campetella, C., 2014:** Descripción de las variaciones horarias
686 medias de presión en la Argentina y su influencia en los sistemas béricos. *Meteorologica*,
687 39(1), 59-71.

688 **Queney, P., 1948:** The problem of air flow over mountains: A summary of theoretical stud-
689 ies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 16-26.

690 **Renault, L., Vizoso, G., Jansá, A., Wilkin, J. and Tintoré, J. 2011:** Toward the
691 Predictability of Meteotsunamis in the Balearic Sea Using Regional Nested Atmosphere
692 and Ocean Models.” *Geophysical Research Letters*, vol. 38, no. 10, 2011, p. n/a-n/a,
693 doi:10.1029/2011GL047361.

695 **Reeder, M. J., and M. Griffiths, 1996:** Stratospheric inertia-gravity waves generated in a
696 numerical model of frontogenesis. I: Wave sources, generation mechanisms and momentum
697 fluxes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122, 1175–1195.

698 **Sawyer, J. S., 1959:** The introduction of the effects of topography into methods of numeri-
699 cal forecasting. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 85(363), 31-43.

700 **Scorer, R. S., 1949:** Theory of waves in the lee of mountains. *Quarterly Journal of the*
701 *Royal Meteorological Society*, 75(323), 41-56.

702 **Shapiro, R., 1970:** Smoothing, filtering, and boundary effects. *Reviews of geophysics*,
703 8(2), pp.359-387.

704 **Shen, B. W., y Lin, Y. L., 1999:** Effects of Critical Levels on Two-Dimensional Back-
705 Sheared Flow over an Isolated Mountain Ridge on an f Plane. *J. of the Atmospheric Sci-*
706 *ences*, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<3286:EOCLOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<3286:EOCLOT>2.0.CO;2)

707 **Skamarock, W. C., Klemp, J. B. , Dudhia, J. , Gill, D. O., Barker, D. M. , Duda, M. G.,**
708 **Huang, X. Y., Wang, W., and Powers, J. G., 2008:** A Description of the Advanced Re-
709 search WRF Version 3. NCAR Technical Note, NCAR/TN–475+STR, 125 pp.

710 **Su, T., and Zhai G., 2017:** The Role of Convectively Generated Gravity Waves on Con-
711 vective Initiation: A Case Study. *Monthly Weather Review*, vol. 145, pp. 335–59,
712 [doi:10.1175/MWR-D-16-0196.1](https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0196.1).

713 **Tanaka, K., Gohara, S., Koga, T., Yamaguchi, R. and Yamada, F., 2014:** Abiki oscilla-
714 tions in Sakitsu Bay, west Kyushu, Japan. *Natural hazards*, 74(1), pp.233-250.

715 **Torre, A., Alexander, P., Hierro, R., Llamedo, P., Rolla, A., Schmidt, T., and Wickert,**
716 **J., 2012:** Large-amplitude gravity waves above the southern Andes, the Drake Passage, and
717 the Antarctic Peninsula. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D2).

105 **Artículo en edición**

106

718 **Torrence, C., and Compo, G. P., 1998:** “A Practical Guide to Wavelet Analysis”, Bul-
719 lentin of the American Meteorological Society, Vol. 79, No. 1.

720 **Uccellini, L. W., and Koch, S. E., 1987:** The synoptic setting and possible energy sources
721 for mesoscale wave disturbances. Monthly weather review, 115(3), 721-729.

722 **Wang, B. and Wang, Y., 1996:** Temporal structure of the Southern Oscillation as revealed
723 by waveform and wavelet analysis. Journal of Climate, 9(7), pp.1586-1598.

724 **Weng, H. and Lau, K.M., 1994:** Wavelets, period doubling, and time–frequency localiza-
725 tion with application to organization of convection over the tropical western Pacific. Jour-
726 nal of the atmospheric sciences, 51(17), pp.2523-2541.

727 **Zhang, F., 2004:** Generation of Mesoscale Gravity Waves in Upper-Tropospheric Jet–Front
728 Systems. Journal of the Atmospheric Sciences, [https://doi.org/10.1175/1520-](https://doi.org/10.1175/1520-7290469(2004)061<0440:GOMGWI>2.0.CO;2)
729 0469(2004)061<0440:GOMGWI>2.0.CO;2

730