

-- Capítulo I --	Introducción	5
-- Capítulo II --	El Río de la Plata y la marea meteorológica	9
II-1.	Características del Río de la Plata	11
II-1.1.	Geometría	11
II-1.2.	Batimetría y morfología	14
II-1.3.	Mareas	16
II-2.	La marea meteorológica y antecedentes de su estudio en la región	17
II-2.1.	Aspectos generales de la marea meteorológica	17
II-2.2.	Antecedentes de su estudio en la región del Río de la Plata	26
-- Capítulo III --	Análisis de series de niveles	35
III-1.	Introducción	37
III-1.1.	Información disponible	38
III-2.	Análisis exploratorio de las series de niveles	43
III-2.1.	Metodología	43
III-2.2.	Resultados	43
III-3.	Obtención de las series de niveles residuales	76
III-3.1.	Metodología	76
III-3.2.	Resultados	76
-- Capítulo IV --	Análisis conjunto de series de niveles residuales	81
IV-1.	Introducción	83
IV-2.	Metodología	83
IV-2.1.	Información disponible	83
IV-2.2.	Análisis de Componentes Principales	84
IV-2.3.	Análisis de propagación de eventos	85
IV-3.	Resultados	87
IV-3.1.	Análisis de componentes principales	87
IV-3.2.	Análisis de propagación de eventos	92
-- Capítulo V --	Vinculación con los forzantes atmosféricos	101
V-1.	Introducción	103
V-2.	Información disponible	103
V-3.	Análisis de las condiciones atmosféricas asociadas a eventos extremos en las series residuales de niveles	104
V-3.1.	Metodología	104
V-3.2.	Resultados	105

V-4.	Observaciones sobre las condiciones atmosféricas que dan lugar a la marea meteorológica en el Río de la Plata	109
V-4.1.	Vinculación entre las series residuales de niveles y la serie de viento en la estación Pilote Norden	109
V-4.2.	Observaciones sobre las condiciones sinópticas asociadas a eventos de ondas de tormenta en el Río de la Plata	113
V-5.	Síntesis	123
-- Capítulo VI --	Simulaciones numéricas	125
VI-1.	Introducción	127
VI-2.	Características generales del modelo MOHID	127
VI-3.	Implementación del modelo	128
VI-3.1.	Dominio simulado	128
VI-3.2.	Condiciones de borde	132
VI-4.	Calibración y validación del modelo	138
VI-4.1.	Calibración con marea astronómica	139
VI-4.2.	Calibración y validación con marea real	142
VI-5.	Caracterización de los eventos y forzantes durante el período simulado 144	
VI-5.1.	Eventos en las series residuales de niveles y su vinculación con el viento en Pilote Norden	145
VI-5.2.	Situación sinóptica durante los eventos simulados	146
VI-6.	Simulaciones realizadas	151
VI-6.1.	Metodología	151
VI-6.2.	Respuesta del modelo regional a los forzantes atmosféricos	152
VI-6.3.	Influencia del forzante local en el Río de la Plata	165
VI-7.	Síntesis	166
-- Capítulo VII --	Conclusiones	169
-- Capítulo VIII --	Bibliografía	175
-- Capítulo IX --	Agradecimientos	181
-- Capítulo X --	Anexos	185
X-1.	Información de niveles disponible	187
X-2.	Eventos en la series de niveles residuales seleccionados para su análisis. 192	
X-3.	Descripción del modelo MOHID	198
X-3.1.	Ecuaciones Gobernantes	198
X-3.2.	Discretización de las ecuaciones	200

X-3.3.	Condiciones iniciales y de borde	202
X-3.4.	Viscosidad y difusividad turbulenta	203

-- Capítulo I --

Introducción

I-1. Introducción

Desde hace varios años en el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental se trabaja en la simulación numérica de la hidrodinámica del Río de la Plata y su frente marítimo. Gran parte de la experiencia acumulada se basa en la realización de simulaciones retrospectivas, las cuales han permitido estudiar la hidrodinámica del río (Piedra-Cueva et al., 2007; Fossati et al., 2008; Santoro et al., 2008), la dinámica de frente salino y sus sedimentos (Fossati et al., 2004; Fossati et al., 2010), sino también evaluar exitosamente la respuesta hidrodinámica del sistema a distintas obras de ingeniería tales como dragados, descargas de emisarios (Fossati et al., 2009), infraestructura portuaria, etc. Sin embargo, dicho enfoque no es suficiente para abordar otro tipo de situaciones que requieren de información de pronóstico a corto plazo en tiempo real como son las actividades de búsqueda y rescate en accidentes marítimos, ayuda a la navegación por zonas de profundidad restringida, ayuda a la gestión de derrames de contaminantes, etc. Es así que en la actualidad, con el propósito de brindar una herramienta de apoyo a la gestión del Río de la Plata, se está trabajando desde hace algunos años en el desarrollo de un modelo operacional de predicción de niveles y corrientes para el Río de la Plata (Santoro et al., 2011).

A la hora de realizar simulaciones retrospectivas, se imponen como condiciones de borde a los modelos del Río de la Plata las variaciones de nivel registradas en algunas estaciones de la frontera oceánica y se resuelve su propagación en el mismo. No obstante, el abordaje operacional implica predecir la evolución de la dinámica de la región oceánica adyacente en base a los forzantes atmosféricos y astronómicos, por lo que el problema se torna claramente más complejo y el modelo implementado debe considerar los procesos atmosféricos que actúan sobre la plataforma continental y sobre la región oceánica adyacente.

Sin embargo al abordar este nuevo problema varias son las interrogantes que surgen, entre ellas:

- En qué medida la marea meteorológica observada en el Río de la Plata tiene origen remoto o local.
- Para el caso remoto, qué tan extenso debe ser el dominio a modelar de forma tal que los forzantes atmosféricos efectivamente desarrollen la marea meteorológica que se observa en el Río de la Plata.
- Cómo son las características de propagación de dichas oscilaciones dentro del estuario.
- Y finalmente, cuáles son las capacidades de los modelos empleados en representar dichas oscilaciones.

Es en este marco que surge la motivación para realizar este trabajo de tesis orientado al estudio de la marea meteorológica en el Río de la Plata y su frente marítimo. El objetivo del mismo es dar respuesta a las inquietudes planteadas anteriormente, utilizando para ello diversas técnicas que incluyen una fuerte componente de análisis de registros de niveles y variables atmosféricas, así como una importante componente de modelación numérica.

El presente informe se divide en nueve capítulos, comenzando por este capítulo de introducción. En el segundo capítulo se presentan las características de la zona de estudio, un breve marco teórico sobre aspectos relativos a la marea meteorológica y finalmente un resumen de los antecedentes de su estudio en la región. El tercer capítulo aborda el estudio de las series de niveles en diversas estaciones del Río de la Plata en forma individual. Incluye la presentación de la información de niveles disponible en el Río de la Plata, un análisis exploratorio de los mismos para cada estación y finalmente la evaluación de metodologías para la remoción de las componentes astronómicas obteniendo así las series sobre las cuales se trabajará en el resto del estudio. El cuarto capítulo presenta un análisis conjunto de las series de niveles en varias estaciones del Río de la Plata y su frente marítimo. El mismo incluye un análisis de componentes principales, así como una caracterización de eventos en las series de niveles en términos de sus amplitudes, períodos y tiempos de propagación entre estaciones. En el quinto capítulo se incorporan al estudio los forzantes atmosféricos, buscando establecer su vinculación con la marea meteorológica en el Río de la Plata. Se realiza un análisis de las condiciones atmosféricas asociadas a eventos extremos en las series de niveles utilizando la técnica de "composites". Por otra parte se presenta una vinculación entre las series de viento y nivel en la estación Pilote Norden; y finalmente se presentan algunos comentarios a partir de la observación de los campos de viento y presión en superficie de Reanalysis en conjunto con las series de niveles. En el sexto capítulo se presentan los análisis realizados utilizando herramientas numéricas. Se realiza una breve descripción de la implementación, calibración y validación de los modelos, para luego abordar la metodología y resultados de las distintas simulaciones realizadas. Un primer conjunto de simulaciones tiene por objetivo evaluar la respuesta del modelo a los forzantes atmosféricos a escala regional, buscando visualizar los mecanismos de generación de la marea meteorológica y evaluar el peso relativo de los distintos forzantes. Mientras que un segundo conjunto de simulaciones intenta identificar la importancia del forzante local frente al remoto. Finalmente en el séptimo capítulo se presentan las conclusiones de este estudio.

-- Capítulo II --

El Río de la Plata y la marea meteorológica

II-1.	Características del Río de la Plata.....	11
	II-1.1. Geometría.....	11
	II-1.2. Batimetría y morfología.....	14
	II-1.3. Mareas.....	16
II-2.	La marea meteorológica y antecedentes de su estudio en la región.....	17
	II-2.1. Aspectos generales de la marea meteorológica.....	17
	II-2.1.1. Ecuaciones que gobiernan el sistema.....	17
	II-2.1.2. Respuesta a la presión atmosférica.....	18
	II-2.1.3. Respuesta a los vientos.....	21
	II-2.1.4. Ondas de Kelvin.....	24
	II-2.2. Antecedentes de su estudio en la región del Río de la Plata.....	26

II-1. Características del Río de la Plata

El Río de la Plata es un cuerpo de agua que recibe la descarga de la segunda cuenca más grande de Sudamérica y tiene una gran importancia tanto social como económica para la República Argentina y la República Oriental del Uruguay. En su ribera se encuentran las capitales de ambos países, Buenos Aires y Montevideo, dos centros densamente poblados que concentran más de 5 millones de habitantes, junto con las principales aglomeraciones industriales, la mayor parte de la actividad portuaria y las principales actividades económicas de ambos países.

En el Río de la Plata el agua dulce y con elevada concentración de sedimentos provenientes de los tributarios se mezcla con el agua salada del océano, esto bajo la influencia de forzantes atmosféricos locales y las mareas incidentes desde el océano, en una batimetría compleja y de bajas profundidades. Todo esto hace que la hidrodinámica del Río de la Plata sea compleja y por tanto entender su dinámica representa un gran desafío.

Su importancia ha llevado al desarrollo de proyectos internacionales de gran porte para su estudio y gestión, el principal ejemplo es el proyecto Freplata consolidado en el año 1997 con el objetivo de prevenir y, cuando sea necesario, mitigar la degradación de los recursos transfronterizos del Río de la Plata y su Frente Marítimo y contribuir a su uso sustentable por los habitantes de ambos países ribereños. El primer objetivo específico desarrollado por el proyecto fue un diagnóstico transfronterizo del Río de la Plata, el cual al día de hoy constituye una de las principales fuentes de información disponibles.

En este capítulo se presentan las principales características físicas del Río de la Plata. La bibliografía consultada incluye informes de los mencionados proyectos Freplata, el informe final de tesis de maestría sobre modelación del frente salino en el Río de la Plata de la Ing. Fossati (2005), así como diversas publicaciones científicas de la región oportunamente citadas.

II-1.1. Geometría

El Río de la Plata se encuentra ubicado en la costa Este de América del Sur entre los 34° 00' - 36° 00' latitud Sur y 55° 00' - 58° 10' longitud Oeste (Figura 1), sus límites fueron fijados en el Tratado del Río de la Plata en 1973 por los países limítrofes República Oriental del Uruguay y República Argentina. El límite interior está determinado por el paralelo que pasa por Punta Gorda en la costa uruguaya y por la desembocadura de los ríos Paraná y Uruguay en la costa Argentina. El límite exterior con el océano está determinado por una línea recta que une Punta del Este en la costa uruguaya con Punta Rasa en la costa argentina. La superficie total del río es de 30.362 Km², la longitud aproximada a lo largo del eje es de 280 Km y su sección transversal va aumentando hacia el Sureste partiendo de 2 Km en Punta Gorda, 32 Km entre Colonia y La Plata, 100 Km entre Montevideo y Punta Piedras, y finalmente 230 Km entre Punta del Este y Punta Rasa.

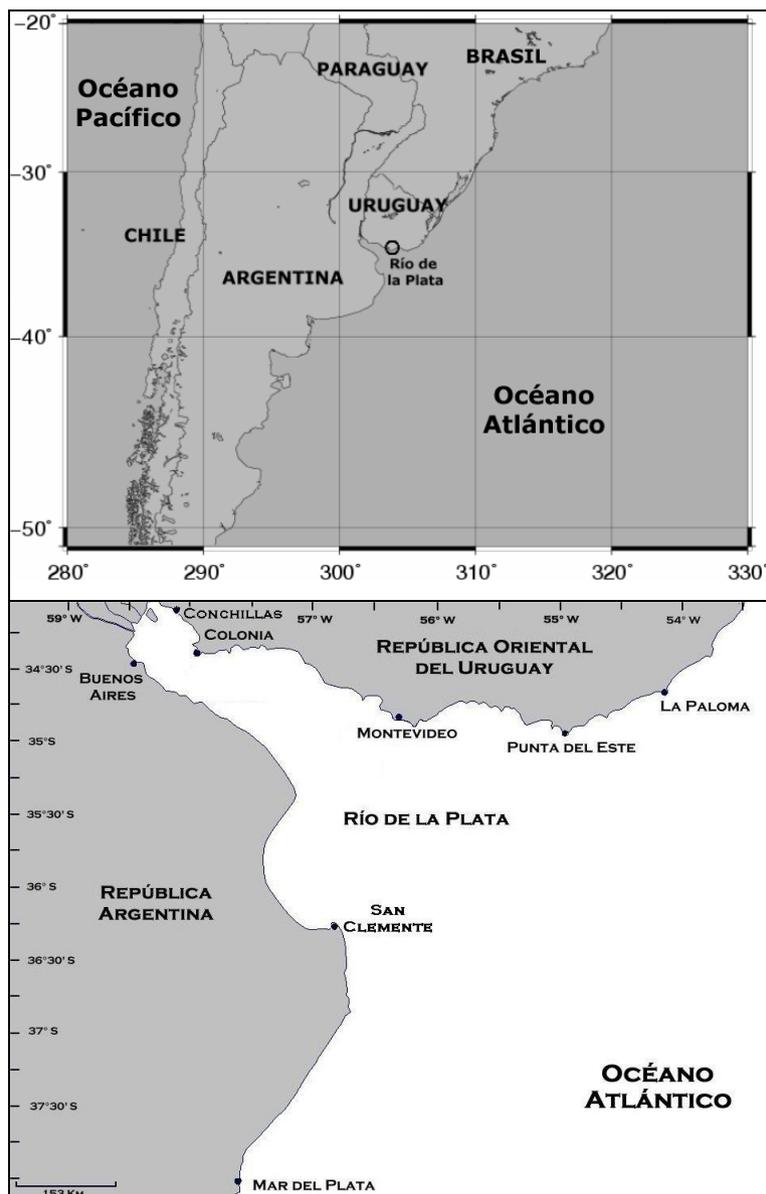


Figura 1: Ubicación general del Río de la Plata.

Como se mencionó anteriormente el río recibe el aporte de la segunda cuenca más grande de Sudamérica (y la quinta en el mundo), con un área de 3.170.000 Km². El aporte de agua dulce se realiza en más del 97% a través de los Ríos Paraná y Uruguay, siendo la descarga media de aproximadamente 22.000 m³/s. El agua dulce se mezcla con las aguas oceánicas generando una zona del Río de la Plata de aguas salobres, la cual se percibe a partir de la franja que une Punta Brava en Montevideo con Punta Piedras en la costa Argentina. Esta zona se extiende hasta aproximadamente Punta Rasa y Punta del Este y contiene aguas salobres de variable salinidad según las mareas, vientos y aportes de agua dulce la cuenca. La superficie de esta zona externa de aguas salobres se estima en unos 18.000 Km² y evidencia características muy particulares desde el punto de vista biológico (Boschi, 1988). Las costas del Río de la Plata son muy diferentes. En la costa Norte predominan las playas arenosas, con barras, cordones litorales y dunas, mientras que la costa Sur es una región baja formada por un conjunto de pantanos, lagunas, planicies de marea e inundación y antiguos cordones de playa. Hacia el Cabo San

Antonio existen zonas de dunas activas y cordones de dunas que alternan con pantanos.

El ambiente regional es mayormente fluvial, pero la mezcla con las aguas oceánicas genera un cambio gradual del ambiente fluvial en la parte superior del río a un ambiente fluvio marino y marino en la parte exterior del río. Se puede entonces subdividir al Río de la Plata según las características de las aguas dulces, salobres y oceánicas, los sedimentos y algunas propiedades biológicas, en tres zonas: la interior, la zona intermedia y la zona exterior (Boschi 1988, CARP 1992). En la Figura 2 se muestran las tres regiones mencionadas.



Figura 2: Clasificación de zonas en el Río de la Plata (basado en Boschi 1988).

El Río de la Plata interior comprende la zona entre el límite fluvial hasta la línea La Plata - Colonia aproximadamente. Esta zona corresponde al delta subfluvial, a las nacientes del río y por ende tiene características típicamente fluviales, influenciadas por el avance del delta sobre el río. Está formada en su mayor parte por bajo fondos, denominado Playa Honda, de profundidades entre 1 y 4 m y se caracteriza por tener un sustrato constituido por arena fina, limo y arcilla. A lo largo de las costas de Uruguay se acumula la mayor cantidad de arena, aunque también existen zonas con rocas. Sobre la costa argentina se observan playas de limo y arcilla, donde prácticamente no hay arena.

El Río de la Plata intermedio comprende la zona entre la línea imaginaria La Plata - Colonia hasta la zona del Codillo, ubicado cerca de la línea entre Punta Brava en Montevideo y Punta Piedras en la costa Argentina. Esta zona es una zona de transición en donde el agua por lo general es dulce con contenido de sedimentos en suspensión. El Banco Ortiz y el Canal Principal son las principales características morfológicas de esta zona. En esta zona se advierte la influencia marina, el oleaje aumenta y el efecto de la marea es mayor.

El Río de la Plata exterior comprende el sector estuarino, se extiende desde el Codillo hasta el límite oceánico y es una zona de salinidad variable abierta hacia el océano. Es la zona más extensa y contiene el Canal Norte, el Banco Inglés, el Banco Arquímedes y la Bahía de Samborombón.

II-1.2. Batimetría y morfología

El Río de la Plata es poco profundo y aumenta su profundidad y su ancho desde su límite fluvial hacia su descarga en el océano. La batimetría de todo el Río de la Plata se observa en la Figura 3, en la cual se muestran las isóbatas a intervalos de 1 m en la zona interior e intermedia y cada 2 m en la zona exterior.

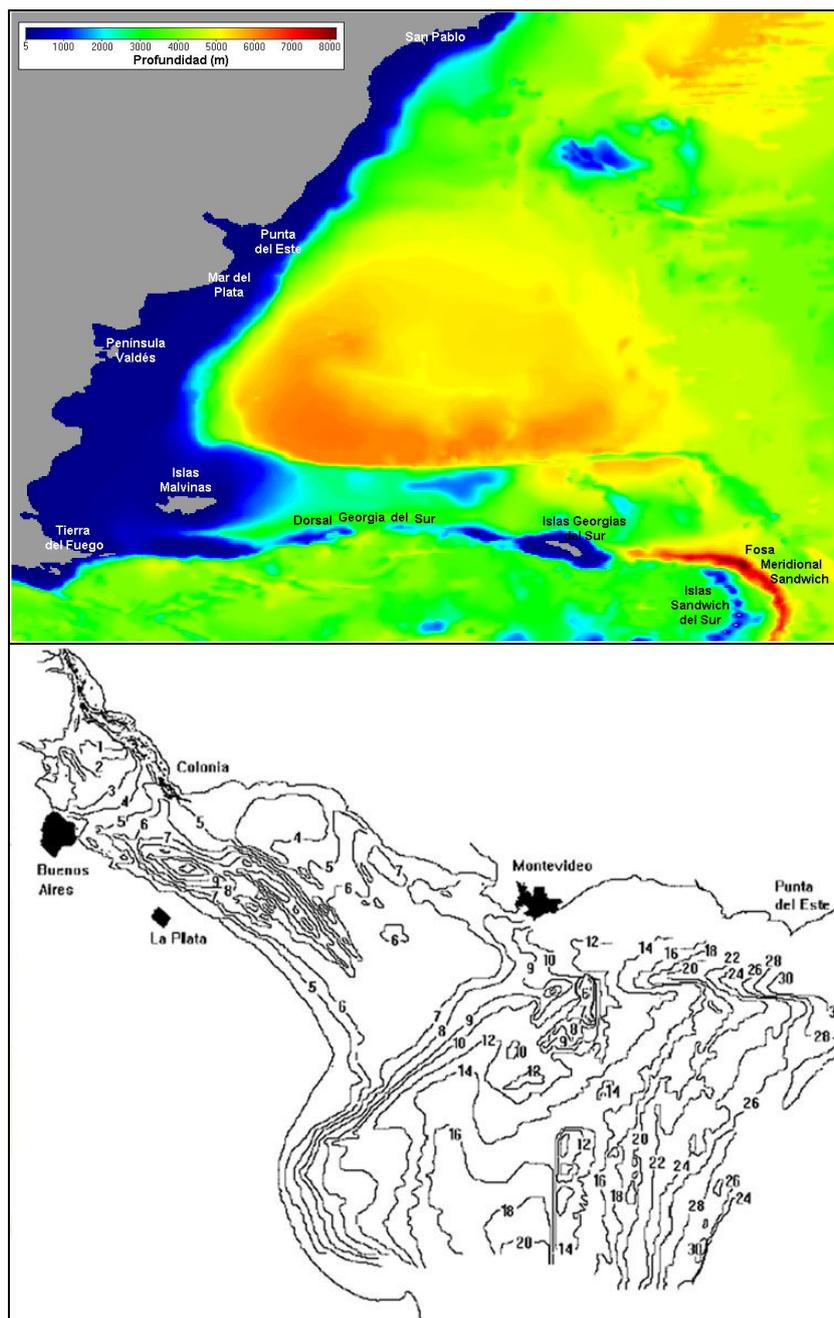


Figura 3: Batimetría general de la región oceánica Sur (arriba), detalle de la batimetría en el Río de la Plata (abajo), modificado de EcoPlata (1997).

La profundidad media en la zona interior del Río de la Plata es de 2,5 m. En la región intermedia las profundidades son mayores, aunque son menores a 10 m, siendo por ejemplo 5 m en la zona cercana a Montevideo. En la zona exterior las profundidades varían entre 10 y 20 m. Luego la plataforma continental se caracteriza por una pendiente suave hasta los 100 m de profundidad y luego se acentúa la pendiente hasta el borde del talud a 3000 m de profundidad. Las unidades morfológicas que se han identificado por sus rasgos particulares se muestran en la Figura 4:

- Playa Honda, es una prolongación subacuática del delta del Río Paraná que está limitada por la isóbata de 6 m aproximadamente.
- El sistema Fluvial Norte, un sistema que incluye todos los canales que se extienden desde las cuencas de drenaje del Río de la Plata hasta Colonia; incluye canales, bancos longitudinales y dunas subacuáticas arenosas y asimétricas.
- El Banco Ortiz, se desarrolla entre el Canal Norte, cerca de la costa Uruguaya y la Gran Hoya del Canal Intermedio y es una gran meseta con una pendiente pronunciada hacia el sur limitada por la isóbata de 6 m.
- La Gran Hoya del Canal Intermedio, es una extensa fosa existente al Sur del Banco Ortiz.
- El Canal Norte, se extiende entre la costa uruguaya y el Banco Ortiz, con una profundidad de 5 m.
- El Canal Oriental, es una depresión alargada que se extiende en sentido Este-Oeste desde el Canal Norte hasta las proximidades de Punta del Este, donde cambia su dirección hacia el Noreste y aumenta abruptamente.
- Barra del Indio, es una planicie suave y amplia que se desprende en dirección Noreste de la costa Argentina entre Punta Indio y Punta Piedras.
- La Franja Costera Sur, es el sector costero argentino entre río Lujan y el Cabo San Antonio que se extiende entre la costa y las isóbatas de 6 a 9 m.
- El Alto Marítimo, es el sector exterior del Río de la Plata, y contiene los Bancos Inglés, Arquímedes y Rouen.
- El Umbral de Samborombón, es una superficie triangular entre el centro de la Bahía de Samborombón y el canal Marítimo.
- El Canal Marítimo, es una depresión extensa con suave pendiente y un perfil asimétrico, que está entre la Barra del Indio, la Franja Costera Sur, el Umbral de Samborombón y el Alto Marítimo.

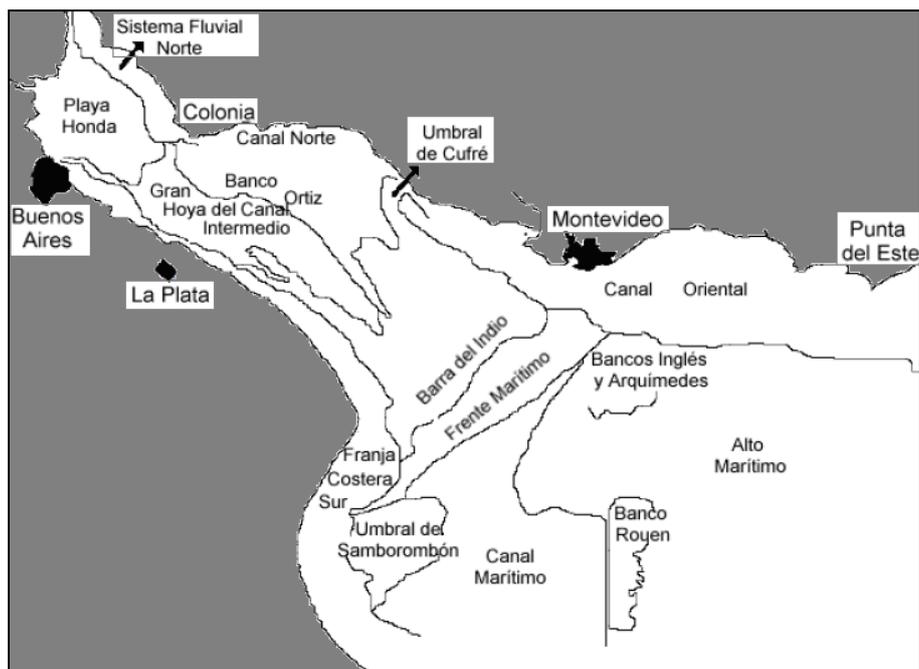


Figura 4: Morfología del Río de la Plata (Basado en EcoPlata 1997, tomado de Fossati 2005).

II-1.3. Mareas

Al Río de la Plata ingresan a través de su frontera oceánica ondas de marea que tienen origen tanto astronómico como atmosférico. La componente astronómica de la marea afecta todo el Río de la Plata incluso manifestándose aguas arriba en sus principales tributarios, alcanzando las costas de la ciudad de San Pedro al norte de la provincia de Buenos Aires sobre el Río Paraná y la ciudad de Gualeguaychú ubicada sobre el Río Uruguay (Boschi, 1988). Su régimen es semidiurno con desigualdades diurnas, siendo la principal componente la M_2 (componente lunar principal semidiurna) con un 65% del total de la energía de marea (D'Onofrio et al., 1999). A esta componente le siguen en importancia otras como son O_1 , S_2 , N_2 , K_1 y en algunas zonas M_4 . Debido a los efectos batimétricos, de contorno y el efecto Coriolis, la amplitud de las mareas es mayor en la costa Sur alcanzando valores de 1 m, mientras en la costa Norte se alcanzan valores máximos de 0,4 m. Una descripción detallada de la dinámica de marea astronómica en el Río de la Plata fue realizada por Gagliardini (1984), sin embargo ya Balay (1956) presentaba mapas de isofase e isoamplitud para las principales componentes en toda la región oceánica adyacente a la plataforma Argentina. Dichos resultados para la componente M_2 dentro el Río de la Plata fueron reproducidos por O'Connor (1991) y se muestran en la Figura 5.

Teniendo en cuenta las amplitudes mencionadas el Río de la Plata se clasifica como una zona micromareal.

Sin embargo, las perturbaciones generadas por los forzantes atmosféricos superan largamente en amplitud a las astronómicas. Se han registrado durante tormentas severas algunos eventos extremos de niveles que superan los 3 m en las zonas costeras. Sobre este tipo de perturbaciones se centra esta tesis y el siguiente punto presenta algunos aspectos básicos sobre la dinámica de las mareas meteorológicas como marco de referencia y a continuación se resumen los principales antecedentes de su estudio en la región.

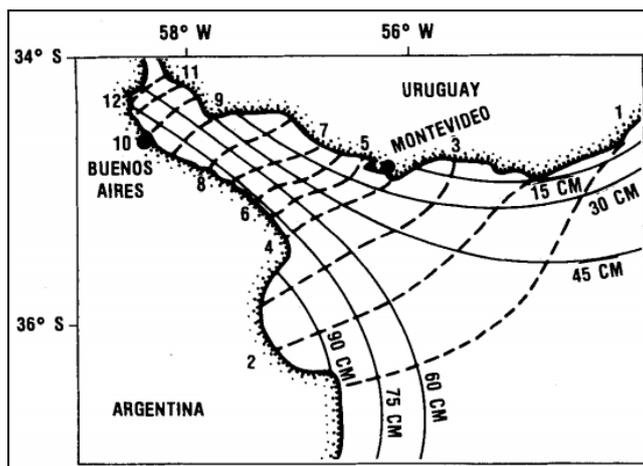


Figura 5: Líneas de isofase e isoamplitud para la Componente M_2 en el Río de la Plata (tomado de Balay, 1991).

II-2. La marea meteorológica y antecedentes de su estudio en la región

II-2.1. Aspectos generales de la marea meteorológica

Los efectos de los forzantes atmosféricos sobre las masas de agua hacen que su comportamiento se aparte significativamente del esperado teniendo en cuenta únicamente el forzante astronómico.

En el primer punto de este apartado se presenta una versión simplificada de las ecuaciones de balance que gobiernan la hidrodinámica de un fluido no estratificado sobre una esfera en rotación. En los puntos siguientes se presentan algunos conceptos básicos a cerca de la respuesta a los forzantes atmosféricos basados en versiones aún más simplificadas de estas ecuaciones. Por último se hará mención a las denominadas ondas de Kelvin, por tener especial aplicación al tipo de oscilación que se estudia en esta tesis.

II-2.1.1. Ecuaciones que gobiernan el sistema

La dinámica y cinemática de un fluido están regidas por las ecuaciones de balance de cantidad de movimiento, balance de masa, de energía y de sal. Este sistema de ecuaciones permite describir cuantitativamente el movimiento de las masas de agua en el océano. Sin embargo, sobre estas ecuaciones se suelen realizar distintas aproximaciones y simplificaciones dependiendo de la escala y naturaleza de los fenómenos de interés. En primer lugar para el estudio de mareas y movimientos con períodos largos es usual despreciar los movimientos verticales y las aceleraciones en dicha dirección, e ignorar la variación de la densidad en el espacio y tiempo. Bajo estas hipótesis y en un sistema de coordenadas como el de la Figura 6 el sistema de ecuaciones es el siguiente:

- Ecuación de conservación de masa

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + D \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = 0$$

Ecuación 1

- Ecuación de balance mecánico proyectada en las direcciones horizontales

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -\frac{\partial \Omega}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial F}{\partial z} \right)$$

Ecuación 2

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = -\frac{\partial \Omega}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\partial G}{\partial z} \right)$$

Ecuación 3

- Ecuación de balance mecánico en la dirección vertical

$$P(z) = P_{atm} - \rho g(z - \zeta)$$

Ecuación 4

Siendo (u, v) las componentes zonal y meridional de la velocidad horizontal respectivamente, f el parámetro de Coriolis ($f = 2\omega_T \sin \varphi$ siendo ω_T la velocidad angular de rotación terrestre y φ la latitud), Ω es el potencial generador de marea astronómica, y por último (F, G) son los esfuerzos rasantes en las direcciones zonal y meridional respectivamente.

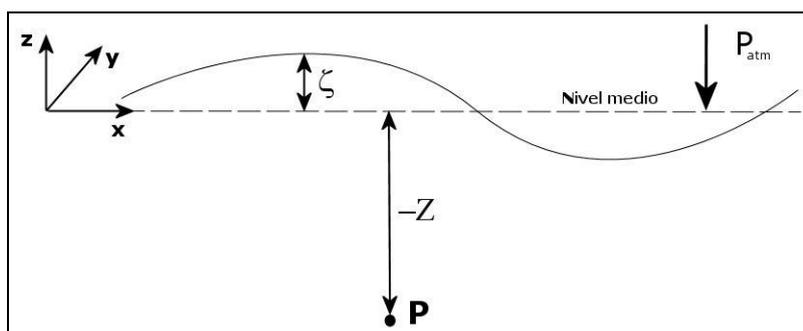


Figura 6: Sistema de coordenadas utilizado en la derivación de las ecuaciones hidrodinámicas.

II-2.1.2. Respuesta a la presión atmosférica

Es claro que existe una relación inversa entre la elevación de la superficie libre y la presión atmosférica. Un modelo muy sencillo que muestra esta relación se puede obtener suponiendo que el cuerpo de agua alcanzó una situación de reposo bajo la acción de cierto campo de presiones. En ese caso el sistema de ecuaciones presentado en el punto anterior se reduce a:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) = 0, \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0$$

Ecuación 5

$$P(z) = P_{atm} - \rho g(z - \zeta)$$

Ecuación 6

La Ecuación 6 implica que en respuesta a un cambio en la presión atmosférica ΔP_{atm} respecto a la presión atmosférica media a nivel del mar, la superficie libre presentará la siguiente variación respecto al nivel medio:

$$\Delta \zeta = -\frac{\Delta P_{atm}}{\rho g}$$

Ecuación 7

Para una densidad típica de aguas saladas $\rho \sim 1026 \text{ kg/m}^3$ y siendo $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ se tiene que:

$$\Delta \zeta \sim -0.01 \Delta P_{atm}$$

Ecuación 8

De esta forma un incremento de 1 hPa en la presión atmosférica producirá un descenso del nivel del mar de 1 cm. Esta respuesta es bien conocida y se denomina "efecto de barómetro inverso". Típicamente la presión a nivel del mar en extra trópicos se encuentra en el rango de 980 hPa a 1030 hPa, lo cual implica un rango de variación estática de los niveles de +33 cm a -17 cm respecto al nivel medio.

Naturalmente esta respuesta estática no es la observada en la realidad, sobre todo en zonas de bajas profundidades. Un modelo sencillo que muestra las grandes diferencias que presenta la respuesta dinámica a un campo de presiones que se mueve en el espacio fue desarrollado por Proudman (1953), y aquí fue tomado de Pugh (1987). En este modelo sumamente simplificado, se considera una perturbación en el campo de presión en superficie que viaja en la dirección x , omitiendo en la ecuación de cantidad de movimiento los términos advectivos, de Coriolis, y las tensiones de fondo y superficie. Con todas estas hipótesis, la Ecuación 2 habiendo remplazado y derivado la Ecuación 4 se reduce a:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P_{atm}}{\partial x} \right) - g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$$

Ecuación 9

Si la perturbación atmosférica se desplaza en la dirección x con una velocidad C_A , se admite que es posible escribirla de la siguiente forma:

$$\Delta P_{atm} = A(x - C_A t)$$

Ecuación 10

siendo A una función físicamente posible. La superficie libre admitirá una solución del tipo:

$$\Delta \zeta = \alpha A(x - C_A t)$$

Ecuación 11

Esta solución debe cumplir tanto la ecuación de balance mecánico (Ecuación 9) como el balance de masa (Ecuación 1), a partir de esta última sustituyendo la solución propuesta se obtiene:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\alpha C_A}{D} A'(x - C_A t)$$

Ecuación 12

siendo $A'(x - C_A t)$ la derivada de la función A con respecto del argumento $(x - C_A t)$. Integrando esta última ecuación, e imponiendo una velocidad nula lejos de la perturbación se obtiene:

$$u = \frac{\alpha C_A}{D} A(x - C_A t)$$

Ecuación 13

Sustituyendo la Ecuación 10, la Ecuación 11 y la Ecuación 13 en la Ecuación 9, se obtiene la siguiente ecuación:

$$-\alpha \frac{C_A^2}{D} A'(x - C_A t) = -\frac{1}{\rho} A'(x - C_A t) - g\alpha A'(x - C_A t)$$

Ecuación 14

De donde se deduce que

$$\alpha = - \left[\rho g \left(1 - \frac{C_A^2}{gD} \right) \right]^{-1}$$

Ecuación 15

y por tanto se obtiene

$$\Delta \zeta = - \frac{\Delta P_{atm}}{\rho g \left(1 - \frac{C_A^2}{gD} \right)}$$

Ecuación 16

Escrito en otros términos:

$$\text{Respuesta dinámica del nivel del mar} = \frac{\text{Respuesta estática}}{\left(1 - \frac{C_A^2}{gD} \right)}$$

Por lo tanto la respuesta dinámica es igual a la respuesta estática dividida por un factor que obviamente vale uno si C_A es cero. En la medida que C_A se incrementa la respuesta de la superficie libre se ve amplificada, de hecho el término C_A^2 / gD no es más que el cociente de la velocidad de propagación de la perturbación y la velocidad de propagación de ondas libres. Cuando estas velocidades son iguales este modelo da una respuesta de amplitud infinita, lo cual no tiene sentido físico y en la realidad se ve atenuada por la fricción. Por último si la velocidad de propagación de la perturbación se vuelve muy grande la respuesta de la superficie libre vuelve a hacerse pequeña. A partir de este modelo Balay (1959) observa que con las profundidades del Río de la Plata exterior y la zona oceánica adyacente, las ondas libres se propagan aproximadamente con velocidades de 50 Km/h y

70 Km/h respectivamente. Por tanto perturbaciones atmosféricas viajando en esas zonas con velocidades de 40 a 50 Km/h generarán ondas libres de amplitud importante que se propagarán como ondas libres al interior del río.

Es muy difícil identificar aisladamente la respuesta de la superficie libre a la presión en superficie separándola de aquella generada por los vientos. Sin embargo, algunas campañas de medición en mares cubiertos de hielo han mostrado una respuesta de los niveles de superficie muy cercana a la del barómetro inverso.

II-2.1.3. Respuesta a los vientos

En el océano interior, lejos de las fronteras, la columna de agua se comporta de acuerdo al balance geostrófico. Sin embargo cerca de las fronteras la disipación vertical se vuelve importante, dando lugar a la aparición de una capa límite. Walfrid Ekman desarrolló un modelo para la capa límite oceánica superficial como parte de su tesis doctoral (Ekman, 1905). Para ello realizó varias hipótesis tales como la no influencia de costas cercanas, la acción de vientos constantes soplando sobre un océano homogéneo que ha alcanzado su estado estacionario, y que el océano interior se encuentra en balance geostrófico. La solución obtenida con este modelo es bien conocida y da lugar a la denominada "espiral de Ekman", la cual describe la variación del perfil de velocidades en la vertical. Interesa aquí únicamente destacar algunas de sus principales consecuencias. En primer lugar, el espesor de la capa de Ekman en la cual se presenta este perfil de velocidades viene dado por:

$$d \sim \sqrt{\frac{\nu_E}{\Omega}} \sim 10 \text{ m}$$

Ecuación 17

Donde ν_E es el coeficiente de viscosidad turbulenta vertical (aprox. $10^{-2} \text{ m}^2 / \text{s}$) y Ω la velocidad angular de rotación terrestre (aprox. 10^{-4} s^{-1}), con los valores mencionados se obtiene un espesor del orden de 10 m. Nótese que la rotación terrestre acota el efecto de la frontera a un espesor muy pequeño comparado con la altura de la columna de agua.

En segundo lugar, el perfil vertical de velocidades presenta una velocidad en superficie rotada 45° a la derecha (izquierda) respecto a la dirección del esfuerzo generado por el viento en el hemisferio norte (hemisferio sur). Y en tercer lugar, y siendo quizás la consecuencia de mayor interés, si se integra el perfil de velocidades en toda la capa obteniendo el denominado transporte de Ekman, resulta que el mismo se encuentra orientado a 90° de la dirección del esfuerzo del viento, a la derecha en el hemisferio Norte y a la izquierda en el Sur. Las expresiones que determinan este transporte son:

$$U = \frac{1}{\rho f} \tau_y, \quad V = \frac{1}{\rho f} \tau_x$$

Ecuación 18

La Figura 7 muestra en forma gráfica los comentarios mencionados anteriormente.

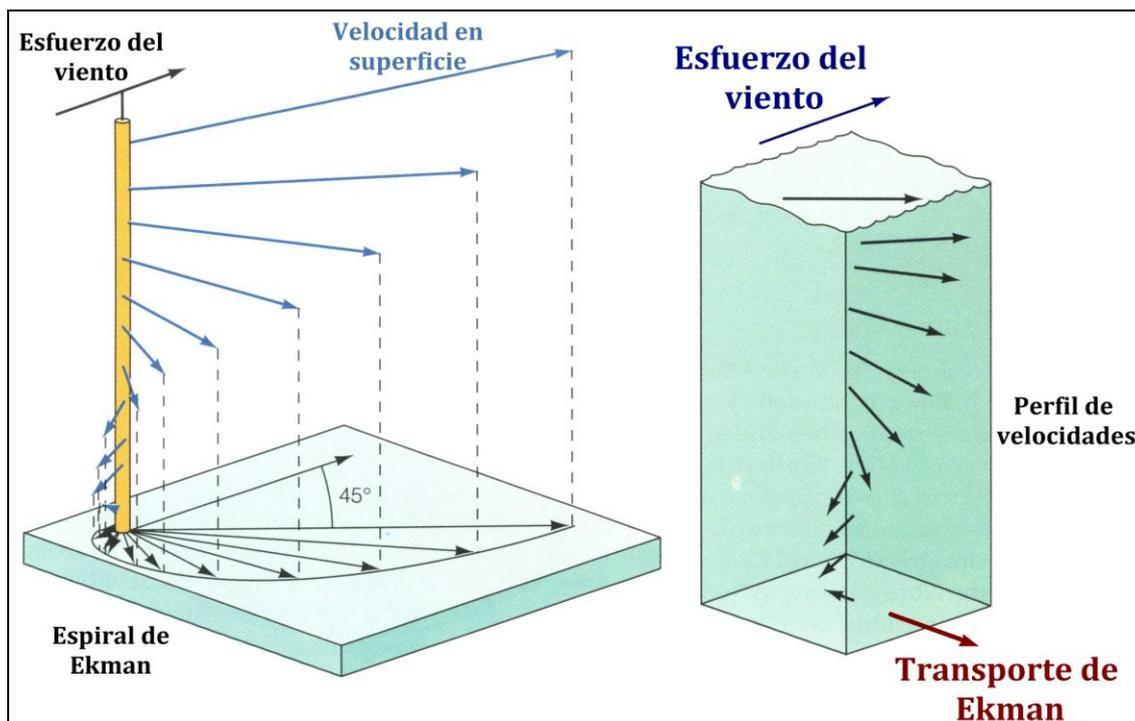


Figura 7: Solución de la capa de Ekman y su transporte integrado en vertical.
 (Modificado de "Oceanography: An Invitation to Marine Science". Tom Garrison, 1993)

Si bien este modelo proporciona ideas básicas muy importantes sobre la respuesta del océano a los vientos, en la realidad las fuertes hipótesis que supone hacen que la espiral de Ekman no sea observada. El tiempo necesario para alcanzar el equilibrio dinámico puede ser de varios días, mientras que el viento varía en pocas horas. Por otra parte existen gradientes verticales y horizontales de densidad, y sin duda sobre las plataformas continentales las hipótesis de no influencia de la costa y de la fricción de fondo no son válidas. En los siguientes párrafos se presenta un análisis muy simplificado de la respuesta de un cuerpo de agua adyacente a una costa bajo la acción de vientos paralelos a la misma (Pugh, 1987).

Supóngase un cuerpo de agua semi-infinito de profundidad D para $y > 0$, sometido a los esfuerzos F de un viento paralelo a la costa a partir del instante $t = 0$ (Figura 8). Al no existir variaciones en la dirección x , la Ecuación 2 y Ecuación 3 se reducen a:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \left(\frac{1}{\rho}\right) \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right) ; fu = -\left(\frac{1}{\rho}\right) \left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)$$

Ecuación 19

Integrando en la vertical desde el fondo a la superficie, asumiendo que u es constante en la profundidad, y utilizando la Ecuación 6 se obtiene:

$$D \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right) = \frac{F_s}{\rho} ; fu = -g \left(\frac{\partial \zeta}{\partial y}\right)$$

Ecuación 20

De esta forma se tiene:

$$u = \frac{F_s t}{\rho D}$$

Ecuación 21

$$\frac{\partial \zeta}{\partial y} = - \frac{fu}{g}$$

Ecuación 22

La primera de las relaciones muestra la aparición de una corriente paralela a la costa que se incrementa de forma lineal con el tiempo a una tasa inversamente proporcional a la profundidad; en la realidad su intensificación sería limitada por la fricción. La segunda ecuación muestra la presencia de un gradiente en la superficie libre normal a la costa que mantiene un equilibrio geostrófico con la corriente inducida u . En consecuencia la superficie libre ascenderá en forma lineal con el tiempo y en mayor medida cuanto menor sea la profundidad.

De esta forma, en este modelo muy simplificado al aplicar un viento paralelo a la costa, se establece una corriente en la misma dirección la cual implica un transporte de Ekman en dirección normal a la costa que por la condición de no atravesamiento induce un incremento en el nivel del mar el cual obedece el balance geostrófico.

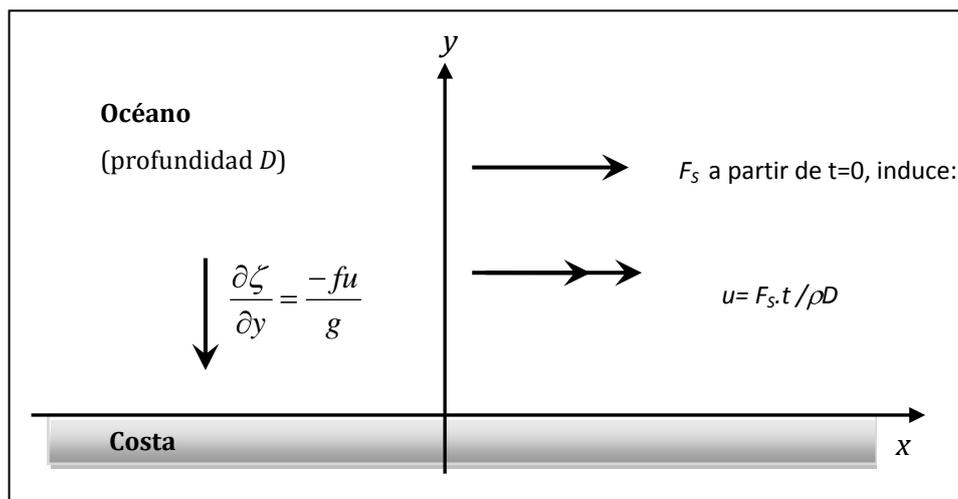


Figura 8: Sistema de coordenadas para un análisis simplificado de respuesta del océano a vientos paralelos a la costa (adaptado de Pugh, 1987).

El objetivo de este punto fue presentar mediante modelos muy simplificados algunos conceptos básicos que ayudarán a comprender la generación de las ondas de tormentas en las plataformas continentales. Buscando una descripción analítica no tan simplificada del fenómeno, en el siguiente apartado se presentan las denominadas ondas de Kelvin.

II-2.1.4. Ondas de Kelvin

Existen muchos tipos de ondas en el océano, con diferentes características y mecanismos restauradores. Este apartado trata de las ondas de Kelvin barotrópicas por su interés para la descripción de las ondas de tormenta que se forman en la plataforma continental argentina y luego se propagan al Río de la Plata.

Las Ecuaciones 1, 2 y 3, que constituyen el denominado modelo de aguas someras pueden ser linealizadas para el estudio de las ondas barotrópicas. Considérense movimientos con número de Rossby pequeño:

$$R_0 = \frac{U}{\Omega L} \ll 1$$

siendo U , Ω y L las escalas de velocidad, rotación terrestre y longitud horizontal respectivamente. Recordando que este número adimensionado compara los términos de advección con Coriolis, en este caso se está hablando de movimientos "lentos" de gran escala horizontal.

Por otra parte, considérese también que el número de Rossby temporal, el cual compara la escala temporal del movimiento con la razón de rotación terrestre es del orden de la unidad. De esta forma se mantendrán las aceleraciones locales en las ecuaciones de cantidad de movimiento. En definitiva con esta combinación de números de Rossby se está tratando con movimientos lentos de rápida evolución temporal ($L/T \gg U$), lo cual es propio de movimientos ondulatorios en los cuales la información se transmite mucho más rápidamente ($C = L/T$ velocidad de propagación de la onda) que el propio movimiento de las partículas (U).

En estas condiciones las Ecuaciones 1, 2, y 3 se reducen a:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + D \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = 0$$

Ecuación 23

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = -\frac{\partial \zeta}{\partial x}$$

Ecuación 24

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y}$$

Ecuación 25

(se ha reemplazado la ecuación vertical de cantidad de movimiento la cual no es más que la relación hidrostática).

Este sistema gobierna la dinámica lineal de ondas en un océano homogéneo, con fondo plano y sin fricción.

A continuación se verá la solución de interés para este sistema, las ondas de Kelvin, las cuales requieren para su existencia de la presencia de una frontera lateral como es la costa continental.

En forma idealizada, considérese un océano de forma rectangular con un continente en uno de sus lados. En esta frontera la velocidad normal debe ser nula pero la ausencia de fricción permite una velocidad tangencial. De esta forma si la costa se ubica en la frontera Oeste, a modo de ejemplo, sobre la misma se tendrá velocidad zonal nula ($u=0$) pero existirá una velocidad meridional (v). Asíumase que la velocidad zonal u , no sólo es nula en la frontera sino también en el resto de este océano idealizado.

Así las ecuaciones de aguas someras linealizadas son:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + D \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0$$

Ecuación 26

$$-fv = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$$

Ecuación 27

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y}$$

Ecuación 28

Nótese que estas ecuaciones son muy similares a las del apartado anterior, bien se puede pensar que aquellas mostraban el efecto del forzante viento y éstas gobiernan la dinámica de la perturbación generada por el mismo una vez que ha cesado el forzante y se propaga libremente.

Combinando la Ecuación 26 con la Ecuación 28 se obtiene la siguiente ecuación que gobierna la propagación de ondas no dispersivas unidimensionales:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}$$

Ecuación 29

siendo $c^2 = gD$. Una solución general para este tipo de ecuación consiste en la superposición de dos ondas no dispersivas viajando en direcciones opuestas:

$$v = V_1(x, y + ct) + V_2(x, y - ct)$$

Ecuación 30

Siendo por tanto la solución para la superficie libre de la forma:

$$\eta = - \frac{H}{g}^{1/2} V_1(x, y + ct) + \frac{H}{g}^{1/2} V_2(x, y - ct)$$

Ecuación 31

Sustituyendo estas soluciones en las ecuaciones y aplicando la condición de no atravesamiento en la costa se obtiene la solución general (por detalles de la derivación ver Gill, 1982 pp. 378 - 379):

$$u = 0$$

Ecuación 32

$$v = \sqrt{gD} F(y + ct) e^{-x/R}$$

Ecuación 33

$$\eta = -H F(y + ct) e^{-x/R}$$

Ecuación 34

Donde se ha definido la longitud R , denominada "radio de deformación de Rosbby barotrópico" y es igual a:

$$R = \frac{\sqrt{gD}}{f} = \frac{c}{f}$$

Ecuación 35

La primera observación es que la solución decae exponencialmente en la dirección perpendicular a la costa, y la escala espacial que determina ese decaimiento es precisamente el radio de deformación de Rosbby. Se puede pensar que la rotación terrestre confina la onda a una región cercana a la costa adyacente. En esta longitud R , la tendencia de la gravedad a horizontalizar la superficie es balanceada por la tendencia de la fuerza de Coriolis a deformar la superficie.

El sentido de propagación depende del hemisferio, se puede ver que para el hemisferio sur (norte) la onda se propaga teniendo la costa a su izquierda (derecha).

Este tipo de ondas pueden ser forzadas por tormentas o cualquier variación de los vientos a lo largo de la costa. Como se verá en el siguiente punto varios autores de la región identifican a los principales eventos asociados a la marea meteorológica como ondas de tormenta, las cuales pueden ser modeladas como ondas de Kelvin.

II-2.2. Antecedentes de su estudio en la región del Río de la Plata

Desde mediados de la década de 1950 el científico argentino M. Balay aborda en dos de sus publicaciones aspectos vinculados a la marea meteorológica en el Río de la Plata. En 1956 publicó un artículo titulado "Determination of mean sea level of argentine sea" en el *International Hydrographic Review*, en el cual a pesar de no ser el punto central del artículo, analiza un evento de onda de tormenta ocurrido en 1950. Llevó a cabo una descripción detallada de la situación sinóptica que desencadenó el evento y realizó ciertos comentarios en base al modelo presentando en el apartado II-2.1.2 de este documento sobre el efecto de una perturbación en movimiento del campo de presiones en superficie.

En 1959 publica en la misma revista el artículo titulado "Causes and periodicity of large floods in Rio de la Plata". En este artículo, centrado en el tema de interés de esta tesis, Balay comienza afirmando que las mayores inundaciones en el Río de la Plata se deben a la influencia de forzantes meteorológicos en el océano adyacente o zonas remotas, pues la influencia del forzante local es limitada por el "fetch" produciendo efectos secundarios. Observa que ocasionalmente en Buenos Aires son registrados valores inusuales de niveles en ausencia de una perturbación meteorológica local que los justifique. Atribuye esto a que las perturbaciones atmosféricas se mueven a una velocidad menor que las ondas de tormenta que generan y por tanto estas últimas aparecen en la costa 12 a 24 horas antes. En el

desarrollo del artículo comienza estudiando niveles máximos anuales en una serie de más de 50 años registrada en Buenos Aires, asociando los mayores máximos anuales con ciclos de marea largos (perigeo lunar, etc.).

Luego se centra en las causas de las ondas de tormenta en el Río de la Plata, definiendo la onda de tormenta como una oscilación en el nivel del mar de origen meteorológico, que obedece a efectos dinámicos más que estáticos. Comienza analizando el efecto de la presión en superficie, separando el efecto estático del dinámico. Afirma que el valor correspondiente al efecto estático dado por el efecto barómetro inverso es frecuentemente excedido mostrando que el efecto estático es una pequeña parte de la variación total. Nuevamente utiliza el modelo presentado en el apartado II-2.1.2 para la descripción de la respuesta del nivel del mar a un sistema de presión moviéndose a una velocidad específica. A partir de este modelo observa que en el Río de la Plata exterior una onda libre se propaga a una velocidad de aproximadamente 56 Km/h mientras que en la zona oceánica adyacente a 72 Km/h, por lo que perturbaciones atmosféricas que viajen a velocidades cercanas a esas pueden generar oscilaciones considerables que se propagarán al estuario como ondas libres excediendo los niveles normales esperados.

Posteriormente se centra en el efecto del viento, observando que debido a la forma alargada de los estuarios, vientos soplando hacia la costa a lo largo del eje incrementan el nivel del mar, y en la dirección opuesta lo disminuyen. Afirma que vientos del sureste soplando a 60 Km/h (17m/s) pueden incrementar el nivel del mar en más de un metro en el Río de la Plata. Sostiene que la acción del viento en el Río de la Plata es decisiva e inmediata debido a su extensa superficie y poca profundidad. Reconoce que los vientos que tienen mayor efecto en el Río de la Plata son del sector norte para niveles mínimos y del sector SSE para niveles máximos. Efectos mínimos ocurren para vientos de los sectores SW y ENE. Las mayores inundaciones siempre están asociadas a fuertes y persistentes vientos del SE, pero las intensidades de viento en Buenos Aires no alcanzan valores inusuales. Sin embargo, vientos huracanados han sido registrados en la zona externa del Río de la Plata (registros por ejemplo en Punta del Este), que provenían del SE y en algunos casos alcanzaron los 130 Km/h en el momento de mayor crecida.

Reconoce que debe analizar la circulación atmosférica en general, y en particular en la zona marítima que afecta al Río de la Plata. De esta manera revisa la formación y desplazamiento de depresiones y anticiclones en esta área. En este aspecto afirma que sobre la Patagonia central se forma comúnmente el frente polar Pacífico, que consiste en grandes masas de aires subtropical que vienen del anticiclón del Pacífico y masas de aire polar de las regiones Antárticas. Las depresiones que frecuentemente cruzan la Patagonia se forman en su mayoría a partir de este frente. De estos ciclones frontales, solo 5 u 8 por año alcanzan intensidades importantes, y ocurren con mayor frecuencia en invierno y verano.

Los anticiclones que se desprenden del anticiclón semipermanente del Pacífico, tiene una variada intensidad y una mayor extensión espacial. Si el centro del anticiclón pasa cerca de 45° sur, habrá vientos del SE en el Río de la Plata. Por otra parte si el anticiclón se mueve al norte, en general es de corta duración y el frente polar viene del sector SW, teniendo efectos similares al del Pampero (un viento con fuerza de tormenta soplando del SW a través de la Pampa Argentina y Uruguay).

Pero si el anticiclón continúa al ENE, los vientos rotarán del SE al NE, y pueden durar de 2 a 4 días. Vientos de este tipo pueden incrementar considerablemente el nivel del Río, pero no siempre tanto como para crear una inundación.

Luego de estos comentarios se enfocó en el estudio de la situación sinóptica que dio lugar a la crecida del 27 y 28 de julio de 1958. Esta crecida alcanzó 3.85 m en el puerto de Buenos Aires (referidos al cero de Riachuelo), y causó más de 100.000 evacuados en dicha ciudad. Vale la pena destacar que este evento no tuvo tal magnitud en las costas Uruguayas, en la publicación esto es atribuido a la incidencia del efecto de Coriolis, afirmándose que las ondas de marea que ingresan desde el océano presentan el doble de amplitud en la costa argentina respecto a la uruguaya.

Luego de presentar la serie residual de niveles (obtenida substrayendo la serie astronómica esperada) se centra en el análisis cuidadoso de la situación sinóptica que desencadenó el evento. Sin entrar en detalle en este análisis se pueden destacar las siguientes conclusiones. Atribuye las mayores crecidas en el Río de la Plata a la presencia de fuertes y persistentes vientos en la dirección SE (dos a cuatro días). En particular presenta como situación sinóptica "estándar" que da lugar a estas condiciones la que se muestra en la Figura 9.

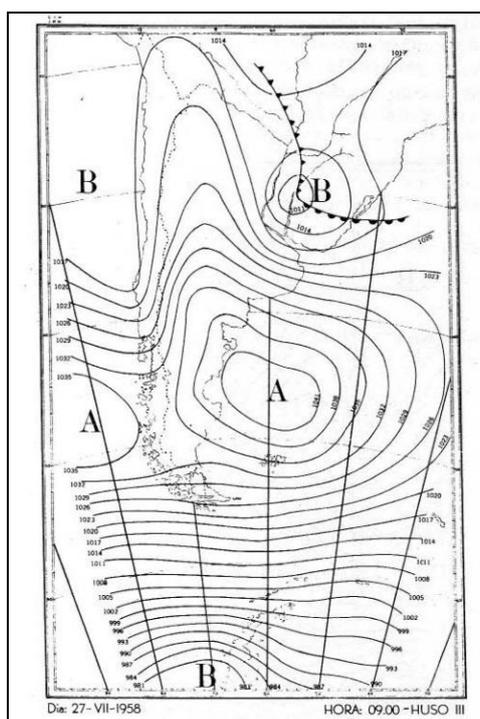


Figura 9: Situación sinóptica el 27 de julio de 1958, identificada por Balay como situación típica asociada a situaciones de crecida en el Río de la Plata (tomado de Balay, 1959).

A continuación se resumen los principales resultados del trabajo de W. O'Connor publicado en el Journal Continental Shelf Research en 1991, el cual se titula "A numerical model of tides and storm surges in the Rio de la Plata Estuary". En este trabajo, ya centrado en la modelación numérica de las ondas de tormenta en el Río de la Plata, comienza retomando varias de las ideas de Balay acerca de los forzantes que desencadenan estos eventos. Se centra en las ondas de tormenta asociadas a los mencionados eventos de "sudestadas", argumentando además que solo considerará el efecto del viento y no los gradientes espaciales de presión. Si

bien reconoce la incidencia que puede tener una anomalía de presión en superficie desplazándose, afirma que las situaciones sinópticas asociadas a eventos de sudestada se corresponden con ciclones alejándose lentamente del continente por tanto no alcanzan las velocidades necesarias para generar el efecto de resonancia antes mencionado en este capítulo. A su vez, simplifica las condiciones atmosféricas imponiendo un campo de presiones estacionario con isobaras rectas equiespaciadas, de esta forma genera vientos persistentes durante cuatro días en dos escenarios, uno con dirección SE-NW y el otro con vientos en la dirección E-W.

Sin entrar en los detalles de implementación respecto a las condiciones de borde e iniciales, los escenarios analizados fueron los descritos anteriormente para intensidades de viento de 10.6, 14.0 y 18.3 m/s, lo que corresponde a tensiones rasantes de 0.2, 0.4 y 0.8 N/m². Logra identificar en el caso de vientos en dirección SE un set-up en la dirección del eje del estuario, el cual expresa en términos de una ecuación asumiendo un balance entre la tensión de corte introducida por el viento y el gradiente horizontal de la superficie libre. En base a esto concluye que en la zona interior del Río de la Plata cada 0.1 N/m² de tensión rasante induce un set up de 0.4m.

Para el caso de vientos en la dirección E-W obtiene contornos de la superficie libre en la dirección N-S con los mayores valores sobre la costa argentina. Afirma que este resultado es consistente con la situación del 27 de julio de 1958 descrita por Balay (1959). Atribuye este comportamiento a la orientación de la costa Uruguaya respecto al transporte de Ekman, afirmando que por tener la costa Uruguaya en la zona externa del Río de la Plata una orientación E-W el transporte de Ekman en dirección sur genera un “set down” sobre la misma.

Las tres publicaciones hasta aquí resumidas muestran el interés que existe en el estudio de los eventos de ondas de tormenta en el Río de la Plata desde mediados del siglo pasado. En lo que sigue se presentan publicaciones recientes que abordan esta misma problemática, mostrando la vigencia actual de la necesidad de desarrollar herramientas que ayuden a su estudio y predicción.

A continuación se destacan tres artículos publicados recientemente, el primero de ellos se refiere a la descripción de las condiciones atmosféricas asociadas a eventos de crecida en el Río de la Plata y los otros dos describen los avances realizados en el desarrollo de un modelo operacional de predicción de ondas de tormenta realizado por el Servicio de Hidrografía Naval Argentino. Finalmente se mencionan algunos de los trabajos llevados a cabo en el IMFIA relativos al estudio de la hidrodinámica del Río de la Plata. Si bien no son trabajos específicos sobre la marea meteorológica, brindan un marco general acerca de la experiencia previa en el instituto en el estudio del Río de la Plata.

En el año 2004 Escobar G. publicó en el International Journal of Climatology el artículo titulado “Wind Tides the Rio de la Plata estuary: meteorological conditions”. El trabajo se centra en el estudio de eventos de sudestadas, identificando los mismos a partir de la serie residual de niveles en la estación de Buenos Aires. El criterio utilizado se basó en los niveles de alertas de evacuación, estableciendo que niveles superiores a 1.6m persistentes durante más de 24 horas se asocian a un evento de sudestada. De esta forma identificó 297 casos a lo largo de 50 años de datos que tenía disponibles.

Con respecto a la frecuencia y distribución anual de este tipo de eventos, concluye que los mismos se dan durante todo el año mostrando una menor frecuencia en invierno, siendo sin embargo éstos últimos los de mayor intensidad. Por otra parte en las dos últimas décadas identifica una tendencia positiva al incremento del número anual de sudestadas, siendo en la década de 1990-2000 de 79 casos.

Para cada uno de estos eventos, estudió la situación sinóptica utilizando como base de datos los campos de altura geopotencial a 1000hPa de Re-Analysis de NCEP. Los datos de Re-Analysis tienen una resolución temporal de 6 horas, por lo cual utilizó aquel más cercano al instante del máximo nivel registrado durante la sudestada. De esta forma, con los 297 campos de geopotencial seleccionados realizó un composite, el cual se muestra en la Figura 10 izquierda, a la derecha se muestra el campo medio de los 50 años. Identifica en el composite asociado a los eventos de sudestada un centro de alta presión al sur del Río de la Plata (40° S), al cual atribuye la presencia de vientos moderados del sureste en el estuario y un consecuente aumento de los niveles en el mismo.

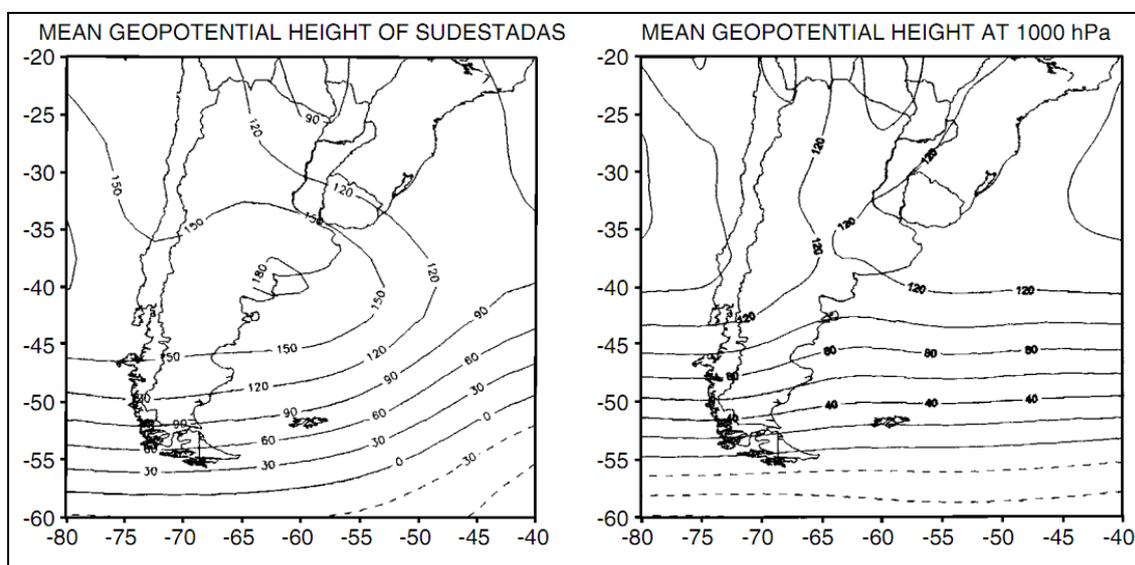


Figura 10: Composite de campos de geopotencial a 1000hPa asociado a eventos de sudestada (izq.), y campo medio de dicha variable durante 50 años (tomado de Escobar, 2004 p. 1165).

Por otra parte aplicó un análisis de componente principales (ACP) utilizando la matriz de correlación como entrada y luego realizó una rotación Varimax sobre los resultados. Las primeras dos componentes que encontró explican el 60% de la varianza total y se asocian con una circulación anticiclónica al sur del Río de la Plata. La tercer componente explica un 13% de la varianza y muestra una situación sinóptica que el autor asegura es bien conocida y consiste en un centro de baja presión al norte de Uruguay y sur de Brasil, típica durante la ciclogénesis. La Figura 11 muestra el composite de los casos asociados a cada una de estas tres componentes principales.

Resultados similares en lo que respecta a la situación sinóptica media asociada eventos de sudestadas fueron obtenidos por Alessandro (2005).

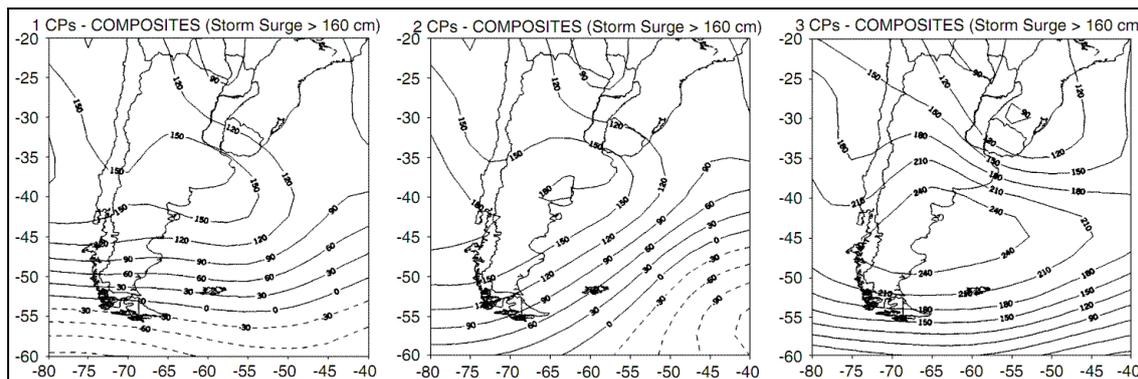


Figura 11: Composite de los eventos asociados a cada componente principal (modificado de Escobar, 2004 p. 1166)

En lo que sigue se resumen dos publicaciones que describen los avances más recientes sobre predicción de ondas de tormenta en la región. Los mismos fueron llevados a cabo por Paula Etala del Servicio Meteorológico de la Armada y fueron publicados en el año 2009 en la revista *Natural Hazards*.

El primero de ellos se titula “Dynamic issues in the SE South America storm surge modeling”. Desde la introducción se identifica como uno de los principales factores que inciden en la generación de las ondas de tormenta en sudamérica a la extensa plataforma continental adyacente.

En lo que respecta a las condiciones meteorológicas determinantes para las ondas de tormenta, destaca como característica principal en la zona de la costa norte del Atlántico y el Río de la Plata los centros de alta presión asociados a sistemas frontales moviéndose de SW a NE. Estos sistemas interactúan con las masas de aire subtropical del NE Argentino, N Uruguayo y SW Brasileño dando lugar a una ciclogénesis que hace de esta la región de mayor formación de ciclones en el hemisferio Sur. Vientos del SE asociados a las ondas de tormenta más importantes en el Río de la Plata son producidos por dos situaciones sinópticas típicas, un sistema de alta presión ubicado al sur, y una baja o un ciclón extratropical centrado en general al N de Uruguay. Afirma que la primera es la más frecuente pero la última genera eventos de mayor intensidad citando para ello el artículo de Escobar et al. (2004) descrito anteriormente.

Sostiene que usualmente durante el invierno se producen fuertes vientos paralelos a la costa en la plataforma marina abierta debido a la existencia de un intenso anticiclón sobre tierra y una profunda ciclogénesis sobre el Océano Atlántico alejándose del continente. De los resultados presentados en el artículo concluye que estos sistemas producen significativas y extensas ondas de tormenta sobre la costa Atlántica y también en los estuarios, las cuales no necesariamente están asociadas a los vientos locales. En la mayoría de los casos las ondas de tormenta son generadas en la plataforma continental y luego se propagan de Sur a Norte a lo largo de la costa como ondas de Kelvin. Se desarrolló un modelo operacional de predicción de crecidas (SMARA) cuyos resultados se encuentran disponibles online en la página web del Servicio Meteorológico Nacional Argentino. En el artículo se muestran sus resultados aplicados a una onda de tormenta que tuvo lugar el 26 - 28 de julio de 2007. En dicho evento tuvieron lugar fuertes vientos paralelos a la costa sobre la plataforma Argentina generados por un gran ciclón que continuó profundizándose mientras se alejaba de la costa. En la Figura 12 se muestran los

resultados del modelo y la evolución de la onda de tormenta registrada en varias estaciones mareográficas.

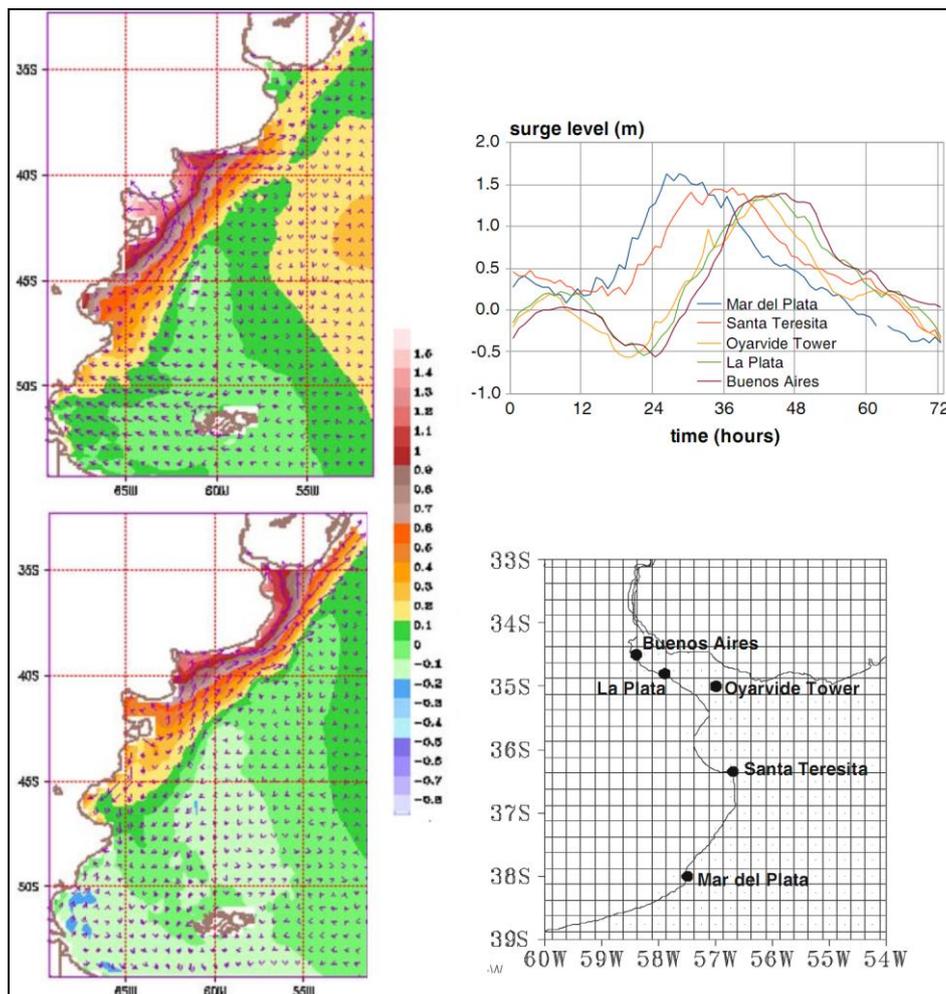


Figura 12: Resultados del modelo SMARA en dos instantes durante el evento del 26-28 de julio de 2007 (izquierda), evolución de los registros de niveles en cinco estaciones mareográficas (derecha). (Modificado de Etala P., 2009 pp. 88-89)

Como se desprende de la figura, en el artículo se pone de manifiesto la posibilidad de detectar la onda de tormenta en la estación mareográfica de Mar del Plata varias horas antes de que la misma ingrese al Río del Plata. Además afirma que no existe una correlación significativa con los vientos locales.

Por otra parte, el segundo artículo publicado por Etala en el mismo Journal se titula "On the accuracy of atmospheric forcing for extra-tropical storm surge prediction". Este artículo muestra resultados relativos a la mejora del modelo afinando ciertos aspectos vinculados al forzamiento de la atmosfera. Se destaca la identificación de una gran mejora en los resultados al acoplar un modelo de oleaje el cual permite refinar el intercambio de cantidad de movimiento aire-agua incluyendo una rugosidad por el oleaje. Los resultados de validación presentados son sumamente satisfactorios.

Finalmente se mencionan a continuación algunos de los trabajos más relevantes llevados a cabo en el IMFIA acerca de la hidrodinámica del Río de la Plata. En el año 1992 se publicó un trabajo llevado a cabo en conjunto con la Comisión Administradora del Río de la Plata (CARP) titulado "Corrientes y Sedimentos en el

Río de la Plata”. En ese trabajo se implementó un modelo numérico bidimensional integrado en vertical basado en el método de diferencias finitas. Vale la pena mencionar que este fue el primer paso que se dio en nuestro país en la temática de modelación numérica de la hidrodinámica del Río de la Plata, sin embargo investigadores de la República Argentina ya venían trabajando en la misma desde algunos años atrás (Molinari, 1986). En lo que respecta específicamente a la marea meteorológica, durante el estudio de los períodos simulados se realizan afirmaciones interesantes tales como la siguiente: “La onda creada por la tormenta en ambos casos es observada ya en la frontera oceánica del Río de la Plata como se deduce de los registros en La Paloma y Pinamar. Esta se ha generado en la plataforma continental, donde es posible la sobre elevación de la superficie, debido a la presencia de la costa y profundidades relativamente bajas”. De manera que ya en estos primeros trabajos se sugería la importancia del forzante remoto en la generación de la marea meteorológica en el Río de la Plata.

En los años siguientes se avanzó mucho en lo que respecta a la modelación numérica de la hidrodinámica del Río de la Plata. Gran parte de la experiencia generada se realizó durante el estudio de problemas de ingeniería tales como el estudio de descargas de emisarios (Fossati et al., 2009), emplazamiento y modificación de obras marítimas, costeras y portuarias (Piedra Cueva et al., 2008). Pero también se han realizado trabajos y proyectos de investigación con el objetivos de comprender la dinámica del río, su frente salino y sedimentología (Piedra-Cueva et al., 2007; Fossati et al., 2008; Santoro et al., 2008). Todos estos trabajos fueron abordados con un enfoque de modelación retrospectiva, siendo los resultados obtenidos sumamente satisfactorios. En el año 2008 se comenzó a trabajar en el desarrollo un modelo operacional de predicción de niveles y corrientes para el Río de la Plata, como una herramienta de apoyo a la gestión del mismo. Bajo este enfoque surgieron varias líneas de investigación, una de las cuales motivó precisamente este trabajo de tesis.

De esta forma se han presentado en este capítulo las bases teóricas para la comprensión del fenómeno en estudio y una revisión de los antecedentes regionales más relevantes. Estos últimos muestran la importancia y el interés que existe en esta temática, y serán contrastados con los resultados obtenidos en esta tesis.

-- Capítulo III --

Análisis de series de niveles

III-1. Introducción	37
III-1.1. Información disponible.....	38
III-2. Análisis exploratorio de las series de niveles.....	43
III-2.1. Metodología.....	43
III-2.2. Resultados.....	43
III-3. Obtención de las series de niveles residuales.....	76
III-3.1. Metodología.....	76
III-3.2. Resultados.....	76

III-1. Introducción

Se presenta en este capítulo un análisis de los registros de niveles en varias estaciones en el Río de la Plata y su frente marítimo.

Para este análisis se utilizaron registros en diez estaciones mareográficas, a saber, Mar del Plata, La Paloma, Punta del Este, San Clemente, Montevideo, Torre Oyarvide, Pilote Norden, Colonia, Buenos Aires y Conchillas. En la Figura 13 se muestra la ubicación geográfica de cada una de estas estaciones. La mayor parte de la información utilizada fue recopilada durante varios años por el IMFIA y suministrada por diversos organismos e instituciones tanto uruguayas como argentinas. Durante la etapa de recopilación de información de este estudio se logró extender algunas de las series de datos y se realizó un arduo trabajo de sistematización de toda la información obtenida. Las dificultades de intercambio de información hacen que los datos utilizados seguramente no sean todos los existentes, pero se entiende que conforman un volumen suficiente a los efectos de este estudio.

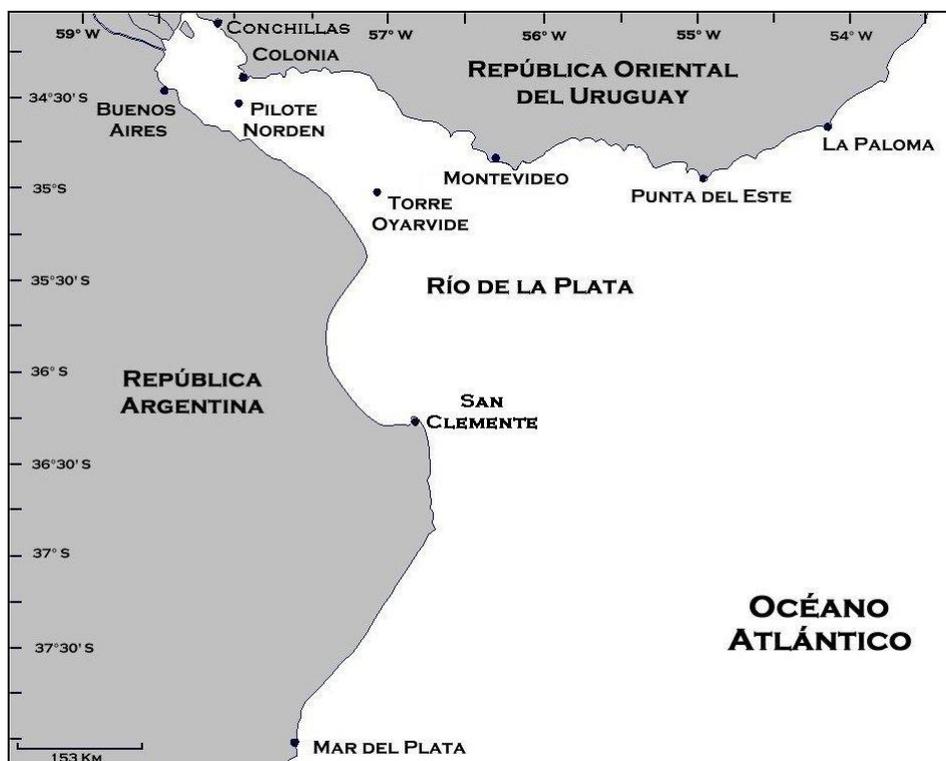


Figura 13: Ubicación de las estaciones mareográficas utilizadas.

Se realizaron sobre las series de niveles disponibles en dichas estaciones diversos análisis con el objetivo de caracterizar y comprender el comportamiento hidrodinámico del Río de la Plata. A continuación se describe la información disponible para cada estación, luego la metodología utilizada en un análisis exploratorio de las mismas, y finalmente se presentan los resultados para cada estación.

III-1.1. Información disponible

III-1.1.1. Estación Mar del Plata

La estación Mar del Plata se encuentra ubicada en la Base Naval, 38°02'8 S, 57°31'5 W. Los datos fueron suministrados por el Servicio de Hidrografía Naval de la República Argentina (SHN). El cero de la escala en dicha estación se encuentra 25 cm por debajo del Plano Hidrométrico Provisorio (Ex - Wharton). En la Tabla 1 se presenta la cantidad de datos disponibles en cada mes de cada año, además se muestra el porcentaje de datos faltantes en cada período.

Se puede ver que los años con mayor cantidad de datos son 1998, 2004, 2005, 2006 y 2008, siendo este último el único año completo.

Mes\Año	1982	1983	1987	1991	1992	1993	1997	1998	2000	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Enero	0	100,0	100,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	78,8	100,0	79,8	0,0	100,0
Febrero	0	54	0	0	100	0	0	100	100	0	100	100	100	0	0	100
Marzo	0	0	0	0	0	0	0	100	100	0	100	100	100	0	0	100
Abril	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	100	100	86	0	100
Mayo	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	100	100	100	100	100
Junio	0	0	0	0	0	100	94	100	0	0	0	100	100	90	100	100
Julio	0	0	0	0	0	100	100	100	0	0	0	100	100	100	0	100
Agosto	0	0	0	0	0	100	100	100	0	0	0	100	100	100	0	100
Septiembre	0	0	0	0	0	100	100	100	0	0	0	0	100	100	0	100
Octubre	0	0	0	100	0	100	100	100	0	0	0	100	100	100	0	100
Noviembre	0	0	0	100	0	100	100	100	0	0	0	100	0	100	0	100
Diciembre	55	0	0	100	0	100	100	100	0	92	100	0	100	0	0	100
Total	5	13	8	25	17	58	58	92	17	8	33	82	92	71	17	100



Tabla 1: Cantidad de datos disponibles en la estación Mar del Plata.

III-1.1.2. Estación La Paloma

En dicha localidad se cuenta con datos tomados tanto por el SOHMA como la DNH, ambas estaciones se encuentran ubicadas en el Puerto de La Paloma (34°39'.2 S, 54°08'.5 W). Los datos correspondientes a junio-julio de 1997 y enero a junio de 1998 fueron provistos por la DNH, mientras que el resto de los datos disponibles fueron brindados por el SOHMA. Los registros del SOHMA están referidos al cero de la escala del Puerto el cual coincide con el Plano Hidrométrico Provisorio (Ex - Wharton), mientras que el cero al que se refieren los de la DNH se encuentra 1 cm por debajo del cero Wharton.

En la Tabla 2 se presenta la cantidad de datos disponible y su fuente, se puede ver que el único año casi completo es el año 2005. Para el caso del año 2007 los dos meses disponibles tienen datos cada media hora.

Mes	1982	1983	1991	1992	1993	1997	1998	1999	2000	2002	2003	2004	2005	2007
Enero	0	100,0	0,0	87,4	0,0	0,0	100,0	99,1	0,0	0,0	100,0	67,9	100,0	0,0
Febrero	0	54	0	0	0	0	99	100	84	0	100	45	100	0
Marzo	0	0	0	0	0	0	100	0	94	0	56	100	100	0
Abril	0	0	0	0	0	0	100	0	3	0	0	100	100	0
Mayo	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	100	100	100
Junio	0	0	0	0	88	100	100	0	0	0	0	37	100	85
Julio	0	0	0	0	100	97	0	0	0	0	0	100	100	0
Agosto	0	0	0	0	99	99	0	0	0	0	0	100	87	0
Septiembre	0	0	0	0	91	99	0	0	0	0	0	100	86	0
Octubre	0	0	0	0	79	99	0	0	0	0	0	100	98	0
Noviembre	0	0	82	0	94	100	0	0	0	100	0	100	100	0
Diciembre	55	0	44	0	75	100	0	0	0	100	100	100	93	0
Total	5	13	10	7	52	58	50	17	15	17	30	87	97	15
Fuente	SOHMA	SOHMA	SOHMA	SOHMA	SOHMA	SOHMA - DNH	DNH	SOHMA	SOHMA	SOHMA	SOHMA - DNH	DNH	DNH	SOHMA



Tabla 2: Cantidad de datos disponibles en la estación La Paloma.

III-1.1.3. Estación Punta del Este

Los datos disponibles en la estación Punta del Este fueron suministrados por la DNH, la estación se encuentra ubicada en el puerto de Punta del Este, coordenadas (34° 57.7' S, 54° 57.1' W) y el cero de la escala se encuentra 2 cm por debajo del Plano Hidrométrico Provisorio (Ex - Wharton).

Los períodos en los cuales se tiene datos se muestran en la Tabla 3, los mismos tienen una frecuencia horaria. El período más extenso de datos, con escasos datos faltantes, es el año 2005.

Mes	1987	1991	1992	1993	1998	2002	2002	2003	2004	2005
Enero	100	0	100	0	0	0	0	94	61	78
Febrero	100	0	0	0	97	84	0	93	79	82
Marzo	100	0	0	0	0	88	0	74	100	100
Abril	100	0	0	0	0	0	0	0	100	100
Mayo	100	0	0	0	0	0	0	0	100	100
Junio	100	0	0	100	0	0	0	0	100	100
Julio	0	0	0	90	0	0	0	0	100	100
Agosto	0	0	0	91	0	0	0	0	100	100
Septiembre	0	0	0	82	0	0	0	0	27	100
Octubre	0	0	0	64	0	0	0	0	100	100
Noviembre	0	99	0	43	0	0	0	0	85	87
Diciembre	0	100	0	100	0	0	87	98	100	97
Total	50	17	8	47	8	7	30	88	95	
Fuente	DNH	DNH	DNH	SOHMA	DNH	DNH	DNH	DNH	DNH	DNH

% de datos disponibles	10 - 50 %	50 - 75 %	75 - 100 %
------------------------	-----------	-----------	------------

Tabla 3: Cantidad de datos disponibles en la estación Punta del Este.

III-1.1.4. Estación San Clemente

Esta estación del Servicio de Hidrografía Naval de la República Argentina se encuentra ubicada en el Muelle San Clemente del Tuyú provincia de Buenos Aires, más precisamente en las coordenadas (36° 21' 18" S , 56° 42' 52" W).

En la Tabla 4 se presenta la cantidad de datos disponible, se puede ver que el período más largo en el cual se tiene datos es el año 2000. Luego se tienen meses aislados de distintos años, pero no más de seis de continuo.

Mes	1987	1991	1993	1999	2000
Enero	0	0	0	100	100
Febrero	0	0	0	100	100
Marzo	0	0	0	0	100
Abril	0	0	0	0	100
Mayo	0	0	0	0	100
Junio	0	0	100	0	100
Julio	0	0	100	0	100
Agosto	0	0	100	0	100
Septiembre	0	0	100	0	100
Octubre	100	100	100	0	100
Noviembre	100	100	100	0	100
Diciembre	100	100	100	0	100
Total	25	25	58	17	100

% de datos disponibles	10 - 50 %	50 - 75 %	75 - 100 %
------------------------	-----------	-----------	------------

Tabla 4: Cantidad de datos disponibles en la estación San Clemente.

III-1.1.5. Estación Montevideo

Los datos disponibles fueron brindados por el SOHMA y corresponden a la estación de Punta Lobos (34°54,2 S, 56° 15.4' W), cuyo cero de escala coincide con el Plano Hidrométrico Provisorio (Ex - Wharton). Los datos tienen una resolución temporal de una hora, salvo los años comprendidos entre 2006 y 2008 que tienen una resolución de tres horas.

En la Tabla 5 se presenta la cantidad de datos disponibles, el año 2004 constituye el período más extenso con datos horarios ininterrumpidos.

Mes	1986	1987	1991	1992	1993	1998	2000	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Enero	0	95,6	0,0	38,4	0,0	0,0	0,0	0,0	71,0	100	99,1	100	100,0	100,0
Febrero	0	95	0	0	0	99	100	0	62	100	0	100	100	100
Marzo	0	100	0	0	0	0	100	0	19	100	72	100	100	35
Abril	0	50	0	0	0	0	0	0	0	100	99	100	99	70
Mayo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	77	100	100	100
Junio	0	0	0	0	100	0	0	0	0	100	97	100	98	100
Julio	0	0	0	0	100	0	0	0	0	100	100	100	100	100
Agosto	100	0	0	0	100	0	0	0	0	100	100	100	52	100
Septiembre	89	0	0	0	100	0	0	0	0	100	100	100	68	100
Octubre	88	0	0	0	100	0	0	0	0	100	100	100	100	100
Noviembre	93	0	100	0	76	0	0	0	0	100	100	100	100	100
Diciembre	100	0	85	0	41	0	0	100	100	100	100	100	100	100
Total	39	28	15	3	51	8	17	8	21	100	87	100	93	92



Tabla 5: Cantidad de datos disponibles en la estación Montevideo.

III-1.1.6. Estación Torre Oyarvide

Esta estación del Servicio de Hidrografía Naval de la República Argentina se encuentra ubicada en el Canal Punta Indio, más precisamente en las coordenadas (35° 06' 00.87" S, 57° 07' 39.38" W).

En la Tabla 6 se presenta la cantidad de datos disponible, se puede ver que el único año casi completo es el año 2004. Luego se tienen meses aislados de distintos años, pero no más de cinco de continuo.

Mes	1982	1983	1987	1991	1992	1993	1998	1999	2000	2002	2003	2004
Enero	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	100
Febrero	0	54	0	0	0	0	66	100	100	0	100	100
Marzo	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	100	100
Abril	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	100	100
Mayo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100
Junio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Julio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Agosto	0	0	0	0	0	79	0	0	0	0	0	100
Septiembre	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	100
Octubre	0	0	100	100	0	100	0	0	0	0	0	100
Noviembre	0	0	100	100	0	100	0	0	0	0	0	100
Diciembre	55	0	100	100	0	100	100	0	0	100	0	100
Total	5	13	25	25	8	40	14	17	17	8	42	100



Tabla 6: Cantidad de datos disponibles en la estación Torre Oyarvide.

III-1.1.7. Estación Pilote Norden

Esta estación es administrada por la empresa Riovía S.A., se encuentra ubicada en el propio curso de agua, precisamente en las coordenadas (34° 37' 43" .7 S, 57° 55' 29" .5 W). Los datos disponibles tienen una resolución temporal de 5 minutos, y se encuentran referidos al cero de la escala que pasa 45 cm por encima del Plano Hidrométrico Provisorio (Ex - Wharton).

En la Tabla 7 se presenta la cantidad de datos disponible en esta estación; a excepción de los últimos meses de 2005 se cuenta con una serie muy completa entre los años 2003 y 2009. A los efectos de ser consistente con los datos manejados en el resto de las estaciones se trabajó con la serie de datos cada una hora en esta estación.

Mes	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Enero	100	100	100	100	100	100	97
Febrero	100	100	100	100	100	100	100
Marzo	100	100	99	100	100	100	94
Abril	100	100	94	100	100	100	98
Mayo	100	100	97	100	100	100	100
Junio	100	100	100	100	100	100	100
Julio	100	100	99	100	100	100	100
Agosto	100	100	100	100	100	100	100
Septiembre	99	100	76	100	100	100	100
Octubre	100	100	0	100	100	100	100
Noviembre	100	100	0	100	100	97	100
Diciembre	99	99	0	100	90	100	98
Total	100	100	72	100	99	100	99

% de datos disponibles	10 - 50 %	50 - 75 %	75 - 100 %

Tabla 7: Cantidad de datos disponibles en la estación Pilote Norden.

III-1.1.8. Estación Colonia

Los datos de esta estación fueron suministrados por la DNH y también por el SOHMA, la estación se encuentra ubicada en el puerto de la ciudad de Colonia, coordenadas (34° 28.5' S, 57° 50.6' W). El cero de la escala se encuentra en ambos casos 37 cm por encima del Plano Hidrométrico Provisorio (Ex - Wharton).

La Tabla 8 muestra la cantidad de datos disponible en esta estación, como se puede ver únicamente el año 2004 y los primeros cinco meses de 2005 se encuentran completos.

Año \ Mes	1991	1992	1993	1997	1998	2000	2002	2003	2004	2005
Enero	0	50,5	0	100	0	87	0	100	100	100
Febrero	0	0	0	100	100	100	0	100	100	100
Marzo	0	0	0	0	0	100	0	100	100	100
Abril	0	0	0	0	0	84	0	0	100	100
Mayo	0	0	0	0	0	86	0	0	100	100
Junio	0	0	25	0	0	85	0	0	100	0
Julio	0	0	80	0	0	0	0	0	100	0
Agosto	1	0	86	0	0	0	0	0	100	0
Septiembre	0	0	96	0	0	0	0	0	100	0
Octubre	0	0	89	0	0	0	0	0	100	0
Noviembre	37	0	15	0	0	0	0	0	100	0
Diciembre	57	0	0	0	0	0	100	100	100	0
Total	8	4	33	8	0	34	8	33	100	42

% de datos disponibles	10 - 50 %	50 - 75 %	75 - 100 %

Tabla 8: Cantidad de datos disponibles en la estación Colonia.

III-1.1.9. Estación Buenos Aires

Esta estación del Servicio de Hidrografía Naval de la República Argentina se encuentra ubicada en el extremo del muelle Club de Pescadores de la ciudad de Buenos Aires, coordenadas (34°33' 41.20" S , 58° 23' 59.47" W). Los datos se encuentran referidos al cero de la escala que coincide con el cero de Riachuelo, estando este 13,64 cm por encima del Plano Hidrométrico Provisorio (Ex - Wharton).

En la Tabla 9 se presenta la cantidad de datos disponible en esta estación, los años 2003 y 2004 no presentan datos faltantes y constituyen el período más extenso disponible.

Mes\Año	1991	1992	1993	1997	1998	2000	2002	2003	2004
Enero	0	98,9	0,0	100	0	100	0	100	100
Febrero	0	100	0	100	100	100	0	100	100
Marzo	0	0	0	0	0	100	0	100	100
Abril	0	0	0	0	0	0	0	100	100
Mayo	0	0	0	0	0	100	0	100	100
Junio	0	0	99	0	0	0	0	100	100
Julio	0	0	100	0	0	0	0	100	100
Agosto	0	0	100	0	0	0	0	100	100
Septiembre	0	0	100	0	0	0	0	100	100
Octubre	100	0	100	0	0	0	0	100	100
Noviembre	100	0	100	0	0	0	0	100	100
Diciembre	100	0	100	0	0	0	100	100	100
Total	25	17	58	17	8	33	8	100	100

% de datos disponibles	10 - 50 %	50 - 75 %	75 - 100 %
------------------------	-----------	-----------	------------

Tabla 9: Cantidad de datos disponibles en la estación Buenos Aires.

III-1.1.10. Estación Conchillas

Esta estación es administrada por la empresa Riovia S.A., se encuentra ubicada en las coordenadas (34° 12' 22" .8 S, 58° 04' 37" .9 W). Al igual que la estación Pilote Norden, la resolución temporal de los datos es de 5 minutos. El cero al cual se refieren estos datos pasa 60 cm por encima del Plano Hidrométrico Provisorio (Ex - Wharton).

La Tabla 10 muestra la disponibilidad de datos en esta estación, los años 2008 y 2009 presentan muy pocos datos faltantes.

Mes\Año	2007	2008	2009
Enero	0	99,7	96
Febrero	0	99	100
Marzo	0	100	99
Abril	91	100	64
Mayo	100	100	80
Junio	100	100	100
Julio	100	100	100
Agosto	100	99	100
Septiembre	48	97	100
Octubre	0	100	100
Noviembre	37	100	100
Diciembre	100	99	100
Total	56	99	95

% de datos disponibles	10 - 50 %	50 - 75 %	75 - 100 %
------------------------	-----------	-----------	------------

Tabla 10: Cantidad de datos disponibles en la estación Conchillas.

III-2. Análisis exploratorio de las series de niveles

III-2.1. Metodología

Se sistematizó la información disponible en cada una de las estaciones mareográficas antes mencionadas, realizando un análisis básico de calidad de los mismos y cuantificando la cantidad de datos faltantes.

Sobre la totalidad de los datos fueron calculados parámetros básicos como el nivel medio, y su varianza. Gráficos de la propia serie temporal son presentados a los efectos de tener una noción general del comportamiento de la variable en estudio.

A los efectos de visualizar la variación anual de los niveles, se consideraron las series de datos correspondientes a cada mes (niveles de todos los enero, todos los febrero, etc.) por separado y se realizó un gráfico tipo boxplot de las mismas así como uno de barras. El primero de ellos muestra la mediana asociada a cada mes, sus percentiles 75 y 25, y valores extraordinarios (valores mayores que $p_{75} + 1.5*(p_{75} - p_{25})$ y menores que $p_{25} - 1.5*(p_{75} - p_{25})$), mientras que en el gráfico de barras se muestra el valor medio para cada mes y su desviación estándar.

A los efectos de visualizar la distribución de los niveles entorno del nivel medio, se presenta un histograma de frecuencias de la serie extrayendo dicho nivel. Así mismo se muestra la curva de excedencia de la serie de niveles a los efectos de visualizar fácilmente que porcentaje de los registros observados superan determinado valor.

Se realizó un análisis espectral de las series de niveles en cada estación. Si bien la observación de los gráficos de las series temporales permite visualizar oscilaciones de distintas escalas temporales, la herramienta adecuada para identificar las frecuencias asociadas a dichas oscilaciones y su magnitud es el análisis espectral.

Por último, se utilizó la herramienta Ttide (Pawlowicz et al., 2002) para ajustar las componentes teóricas de la marea astronómica a partir de una serie de niveles medidos.

III-2.2. Resultados

III-2.2.1. Estación Mar del Plata

III-2.2.1.1. Análisis exploratorio

Un análisis exploratorio básico de la serie de datos muestra que la serie tiene un nivel medio de 0,70 mWh, y una varianza de 0,18 m.

En la Figura 14 se presentan los gráficos de la serie de niveles en Mar del Plata durante todo el año 2008 y durante la primera quincena del mes de junio del mismo año. En éste último período con una resolución de un día, se aprecian las oscilaciones semidiurnas con desigualdades diurnas que caracteriza el régimen de marea astronómica en el Río de la Plata.

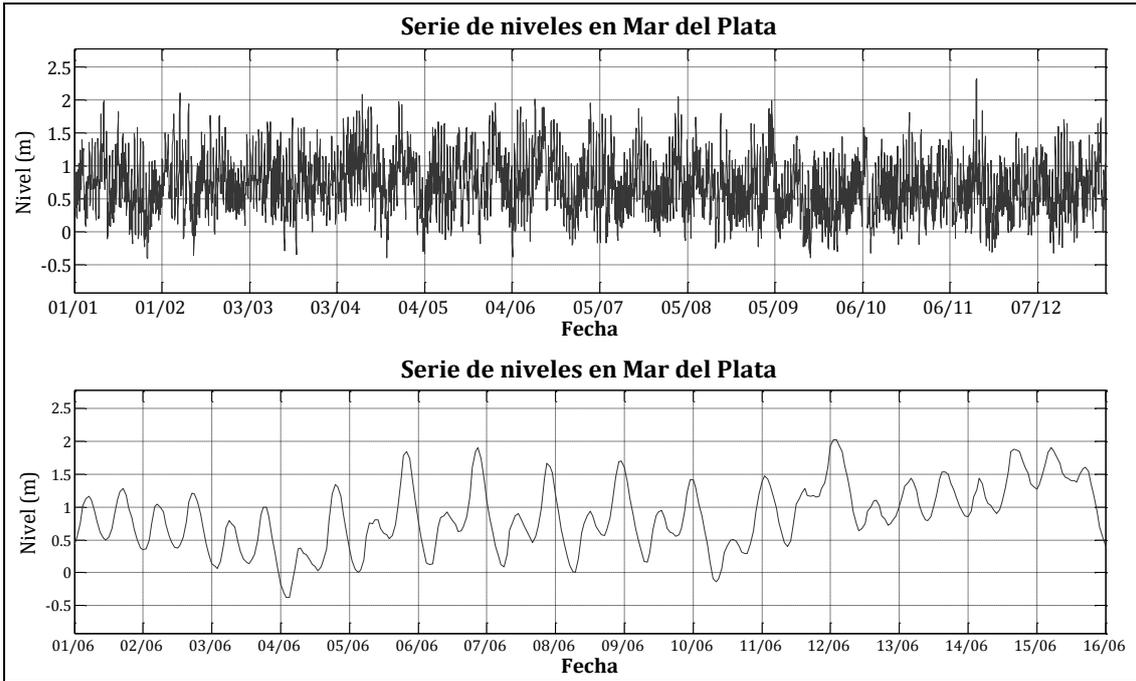


Figura 14: Serie de niveles en la estación de Mar del Plata durante el año 2008 (arriba), y durante junio de 2008 (abajo).

En la Figura 15 se muestra un gráfico tipo boxplots con ciclo anual de la serie, mientras que en la Figura 16 se graficaron los valores de nivel medio y varianza asociados a cada mes. Se puede ver que los niveles medios mensuales no se apartan del nivel medio de toda la serie en más de 8 cm.

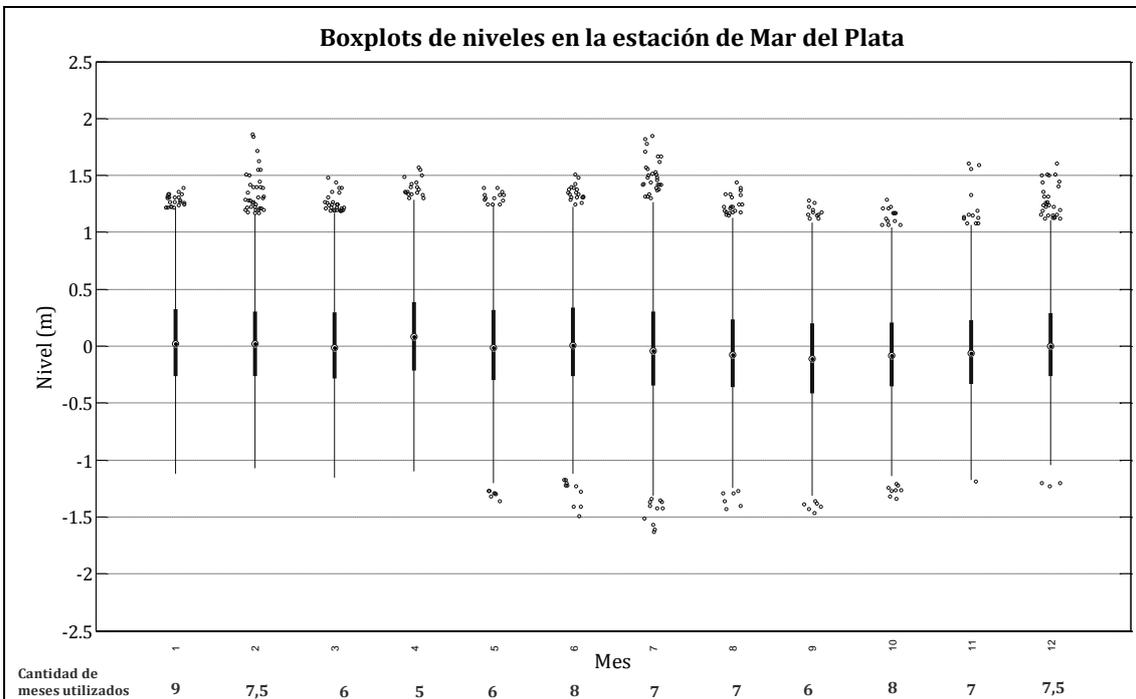


Figura 15: Boxplots de las series de niveles mensuales en la estación Mar del Plata.

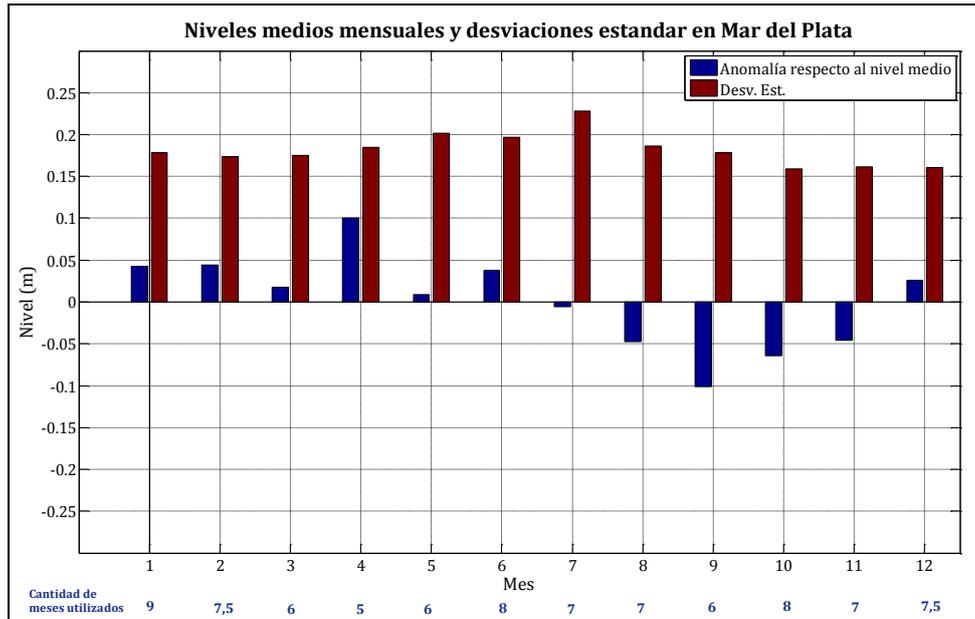


Figura 16: Gráfico de niveles medios mensuales y desviaciones estándar en la estación Mar del Plata.

En la Figura 17 se presenta el histograma correspondiente a la totalidad de los datos disponibles, habiendo extraído el nivel medio. Se muestra también la curva de excedencia de la serie de niveles, la cual permite observar que el 50% del tiempo los registros no exceden los 0,7m aproximadamente, mientras que menos de 10% de los registros superan 1,2 m.

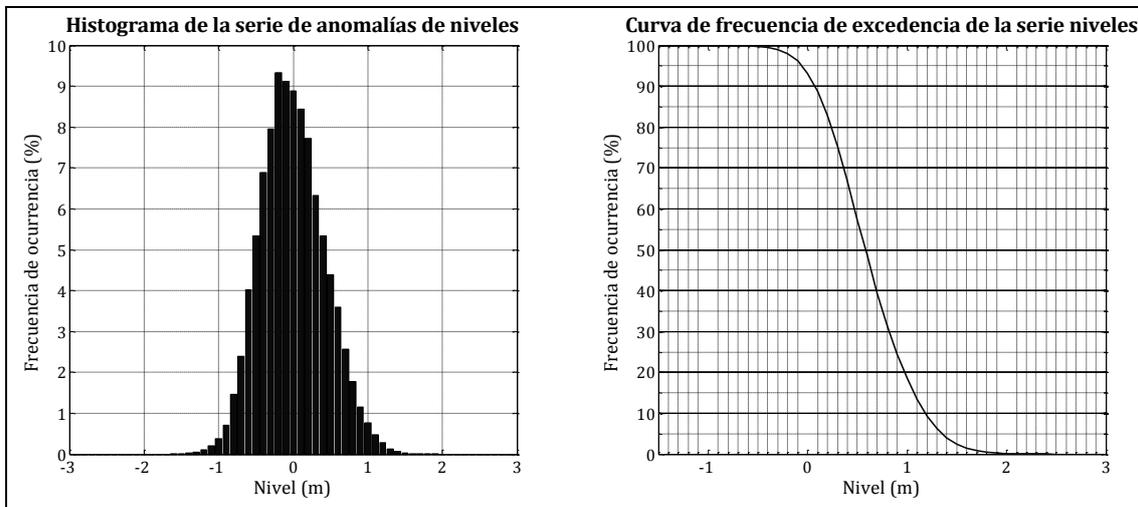


Figura 17: Histograma de la serie de anomalías de niveles (izq.) y curva de frecuencia de excedencia de niveles (derecha) en la estación de Mar del Plata.

III.2.2.1.2. Análisis espectral

En la Figura 18 se presenta el espectro asociado a la serie de niveles en la estación de Mar del Plata durante el año 2008, por ser el período más largo sin datos faltantes. Se puede ver que los períodos de mayor energía coinciden muy bien con las componentes teóricas de la marea astronómica M2 (12,42 h), O1 (25,82 h), K1 (23,93 h), S2 (12,0 h) y N2 (12,66 h).

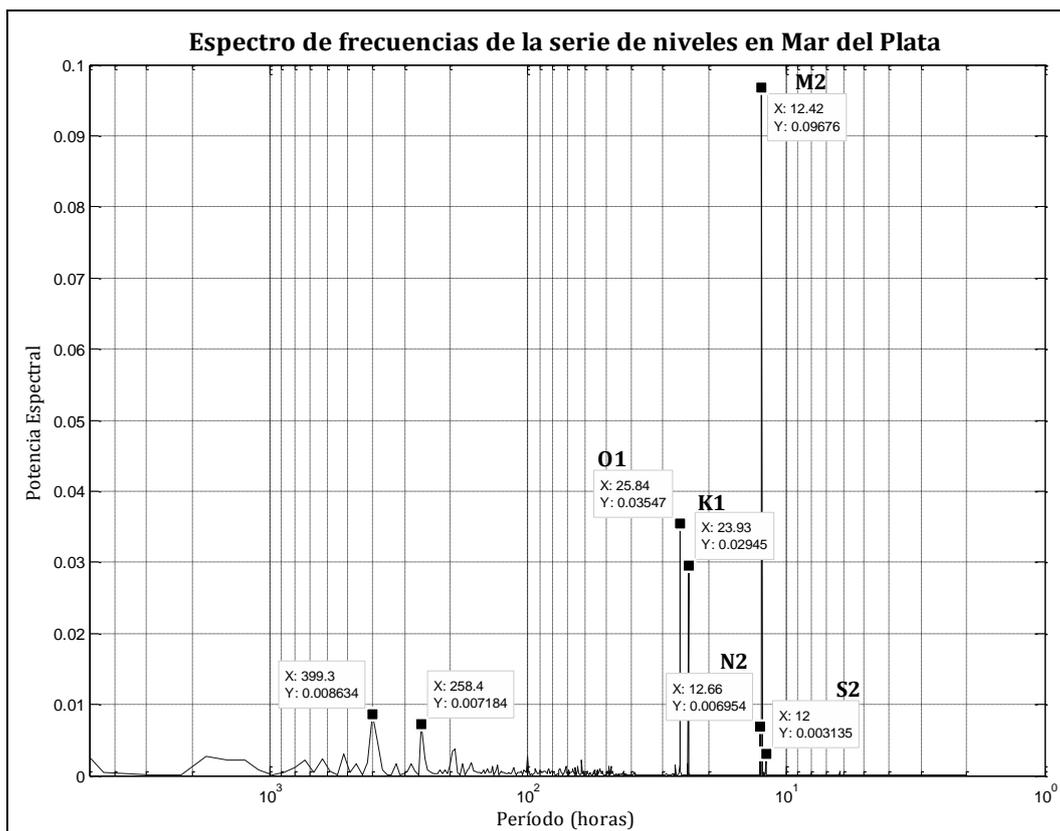


Figura 18: Espectro de la serie de niveles en la estación de Mar del Plata.

III.2.2.1.3. Ajuste de las componentes astronómicas de marea

Utilizando la herramienta Ttide se ajustaron las componentes teóricas de la marea astronómica obteniendo los siguientes resultados:

Estación Mar del Plata

Componente	Período (h)	Amplitud (m)	Amp_err (m)	Fase (°)	Fas_err (°)	SNR
M2	12,42	0,35	0,01	218,69	0,94	3900,00
O1	25,82	0,17	0,01	34,14	3,68	250,00
K1	23,93	0,16	0,01	125,41	4,51	150,00
N2	12,66	0,09	0,01	180,81	3,42	250,00
S2	12,00	0,06	0,01	287,80	5,28	130,00
P1	24,07	0,04	0,01	104,12	17,24	14,00
Q1	26,87	0,04	0,01	9,52	19,63	14,00
M4	6,21	0,04	0,00	4,78	4,76	130,00
NU2	12,63	0,02	0,01	173,71	13,36	20,00
2N2	12,91	0,02	0,01	136,23	14,41	13,00
K2	11,97	0,02	0,00	301,70	12,10	26,00
MN4	6,27	0,02	0,00	337,39	10,36	29,00
L2	12,19	0,02	0,00	262,01	12,35	24,00
MS4	6,10	0,02	0,00	63,53	10,75	29,00
SK3	7,99	0,02	0,00	39,62	14,21	21,00
M3	8,28	0,02	0,00	205,39	16,87	14,00
MK3	8,18	0,01	0,00	284,44	16,79	12,00
2MS6	4,09	0,01	0,00	198,45	9,80	32,00
M6	4,14	0,01	0,00	127,59	12,85	18,00
2MN6	4,17	0,01	0,00	91,79	15,00	12,00
M8	3,11	0,01	0,00	280,48	14,12	18,00

Tabla 11: Componentes teóricas de la marea astronómica en la estación Mar del Plata.

Para realizar este ajuste se utilizaron al igual que en el análisis espectral los datos correspondientes al año 2008. Tal como es de esperar, se puede ver que las componentes de mayor amplitud coinciden exactamente con los resultados obtenidos en el análisis espectral. La componente de mayor amplitud es la M2 con un valor de 35 cm seguida de las componentes O1 con 17 cm, K1 con 16 cm, N2 con 9 cm y S2 con 6 cm.

III-2.2.2. Estación La Paloma

III2.2.2.1. Análisis exploratorio

La totalidad de los datos de niveles disponibles en La Paloma tienen un valor medio de 0,95 mWh y una varianza de 0,098 m.

La Figura 19 muestra los gráficos de la serie de niveles durante todo el año 2005 y durante la primera quincena del mes de mayo del mismo año. Este último gráfico muestra una curva que no es tan suave como la obtenida en otras estaciones, sin embargo aún se evidencian las oscilaciones semidiurnas con desigualdades diurnas que caracteriza el régimen de marea astronómica en el Río de la Plata.

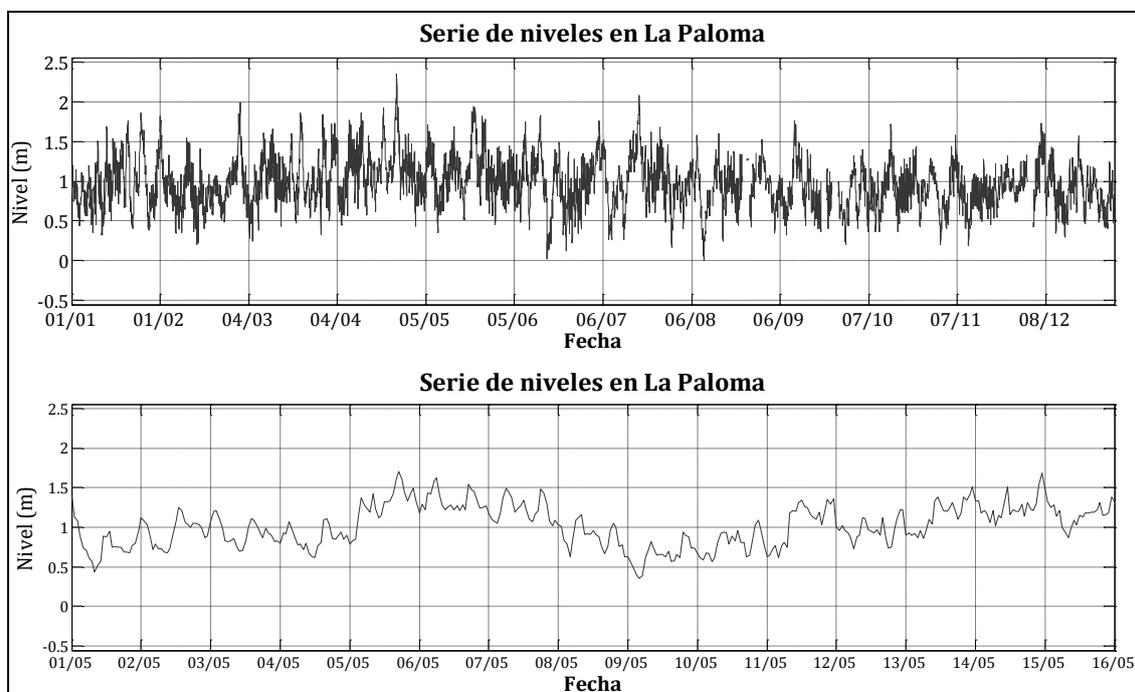


Figura 19: Serie de niveles en la estación de La Paloma durante el año 2005 (arriba), y durante la primera quincena de mayo de 2005 (abajo).

La Figura 20 muestra un gráfico tipo boxplots con ciclo anual de la serie, y la Figura 21 los valores de nivel medio y varianza asociados a cada mes. Se puede ver que en esta estación los niveles medios mensuales son superiores al nivel medio en los meses de febrero a junio con un nivel medio mensual máximo en abril que supero en más de 15 cm al nivel medio. El resto de los meses del año el nivel medio mensual es menor al nivel medio siendo la mayor diferencia de aproximadamente 12 cm. Se debe tener presente como se muestra en la Tabla 2 que existen meses con menor cantidad de datos, por ejemplo el mes con menor cantidad de datos es justamente el mes de abril (datos correspondientes a cuatro años).

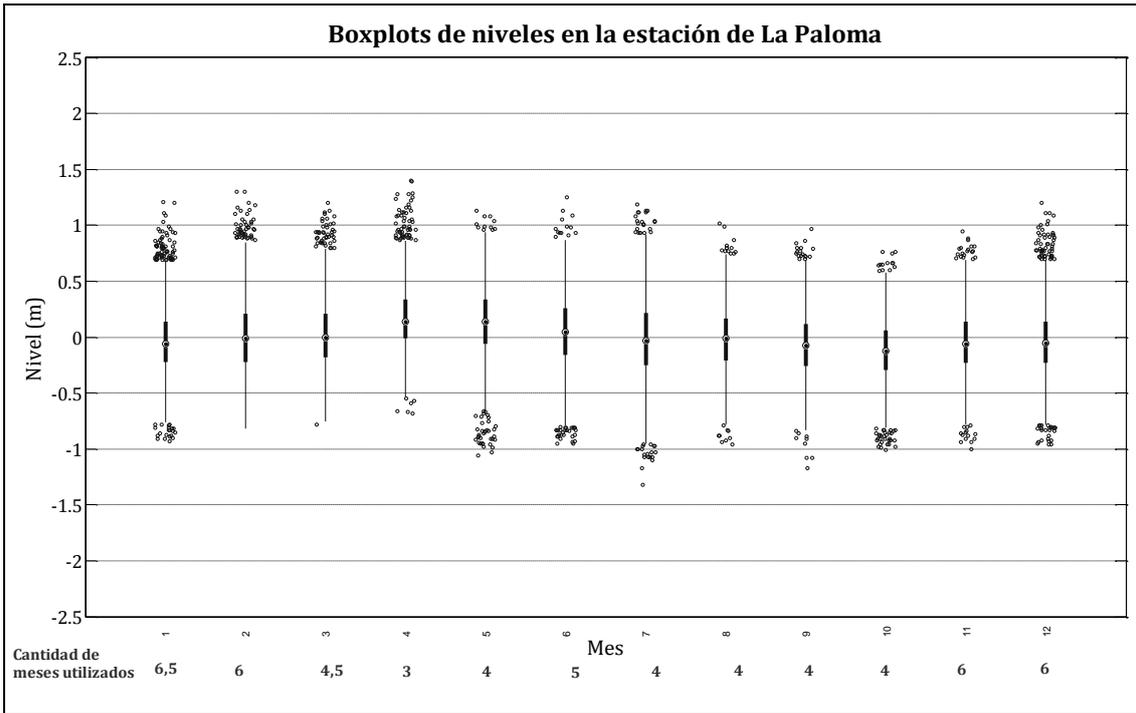


Figura 20: Boxplots de las series de niveles mensuales en la estación La Paloma.

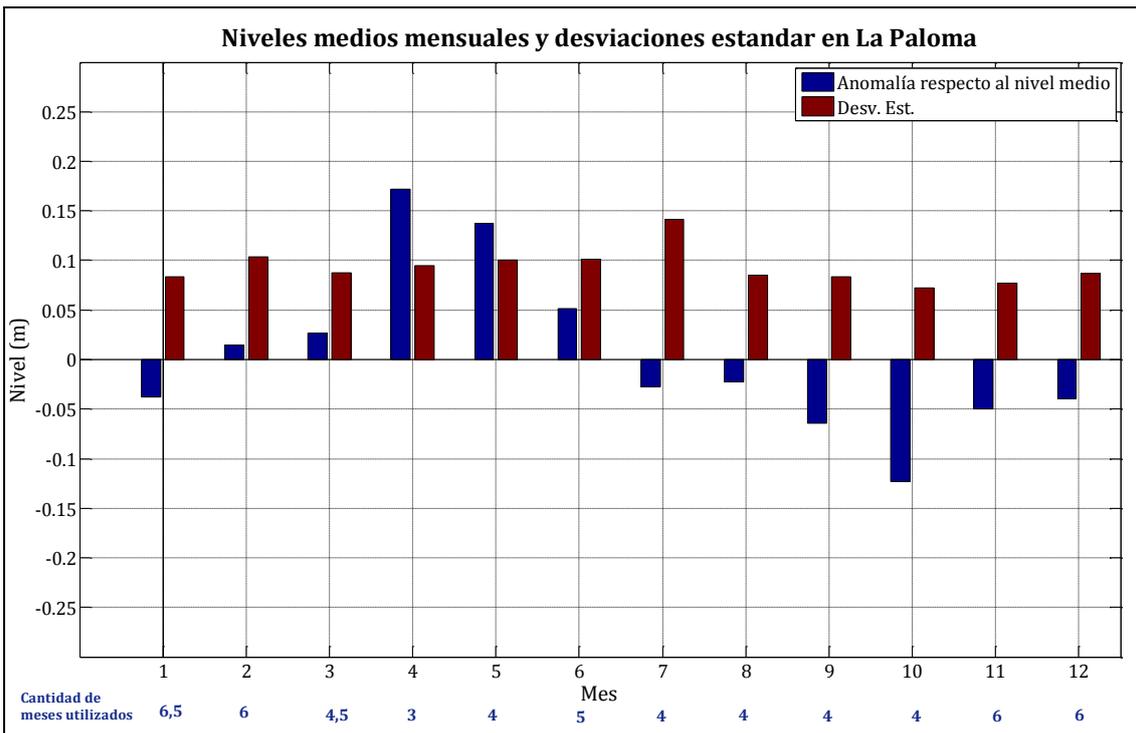


Figura 21: Gráfico de niveles medios mensuales y desviaciones estándar en la estación La Paloma.

En la Figura 22 se presenta el histograma correspondiente a la totalidad de los datos disponibles. La curva de excedencia de la serie de niveles permite observar que el 50% del tiempo los registros no exceden los 0,85m aproximadamente, mientras que menos de 10% de los registros superan 1,25 m.

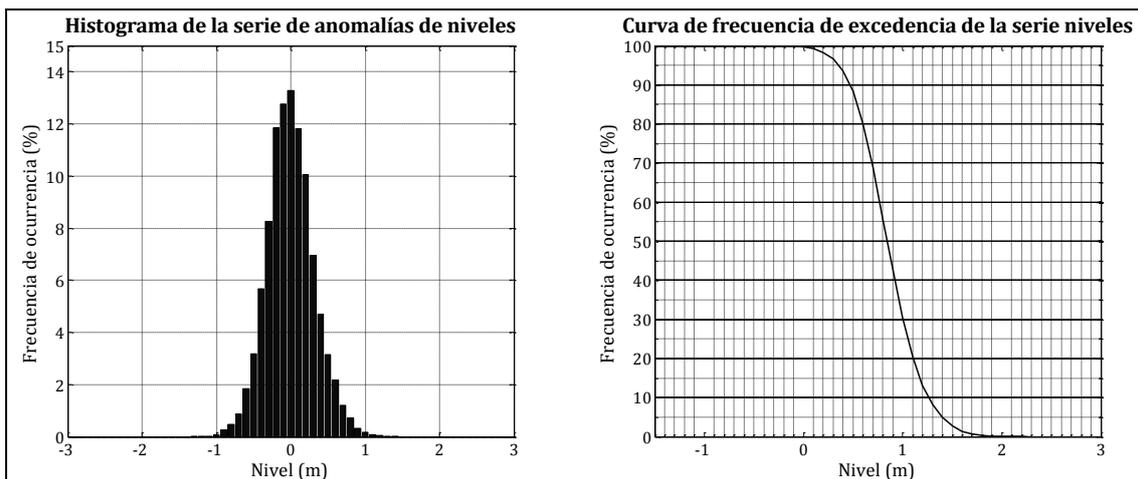


Figura 22: Histograma de la serie de anomalías de niveles (izq.) y curva de frecuencia de excedencia de niveles (derecha) en la estación de La Paloma.

III.2.2.2. Análisis espectral

El espectro obtenido a partir de la serie de niveles disponibles en la estación de La Paloma se presenta en la Figura 23. Este espectro no muestra valores significativos comprado a los obtenidos en otras estaciones, aún así se identifica la componente principal M2. Para su determinación fueron utilizados los datos correspondientes al período enero-julio de 2005.

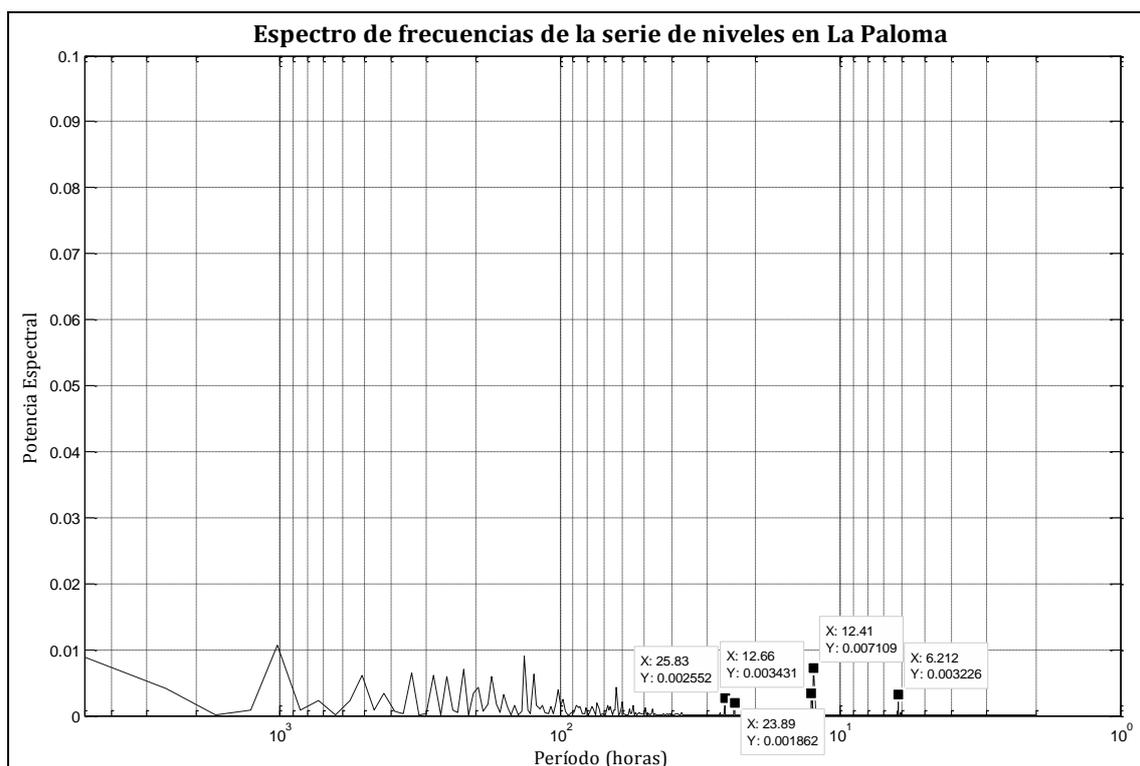


Figura 23: Espectro de la serie de niveles en la estación de La Paloma.

III.2.2.3. Ajuste de las componentes astronómicas de marea

Utilizando la herramienta Ttide se ajustaron las componentes teóricas de la marea astronómica obteniendo los siguientes resultados:

Estación La Paloma						
Componente	Período (h)	Amplitud (m)	Amp_err (m)	Fase (°)	Fas_err (°)	SNR
M2	12,42	0,1125	0,005	212,29	2,41	550,00
M4	6,21	0,0632	0,006	23,6	5,77	100,00
N2	12,66	0,0577	0,005	191,92	5,25	140,00
K1	23,93	0,0552	0,009	51,56	9,43	35,00
O1	25,82	0,0433	0,009	29,5	13,86	22,00
MN4	6,27	0,0322	0,006	340,66	11,11	29,00
MS4	6,10	0,0238	0,007	96,76	15,03	13,00
S2	12,00	0,0172	0,005	333,09	13,84	12,00
K2	11,97	0,0138	0,003	335,37	13,37	18,00

Tabla 12: Componentes teóricas de la marea astronómica en la estación La Paloma.

Para realizar este ajuste se utilizaron al igual que en el análisis espectral los datos correspondientes a los primeros siete meses de 2005. Se puede ver que la componente principal (M2) apenas supera los 10 cm de amplitud, mientras que las restantes componentes tienen amplitudes de algunos pocos centímetros.

III-2.2.3. Estación Punta del Este

III.2.2.3.1. Análisis exploratorio

El valor de nivel medio obtenido a partir de la totalidad de los datos de niveles disponibles en Punta del Este es de 0,97 mWh y una varianza de 0,099 m. El valor reportado por el SHOMA para el nivel medio es de 0,92 mWh.

En la Figura 24 se muestran los gráficos de la serie de niveles durante todo el año 2005 y durante la primera quincena del mes de julio de dicho año. Se puede ver que el comportamiento de estos datos es distinto al observado en otras estaciones, no identificándose las oscilaciones semidiurnas típicas de la marea astronómica.

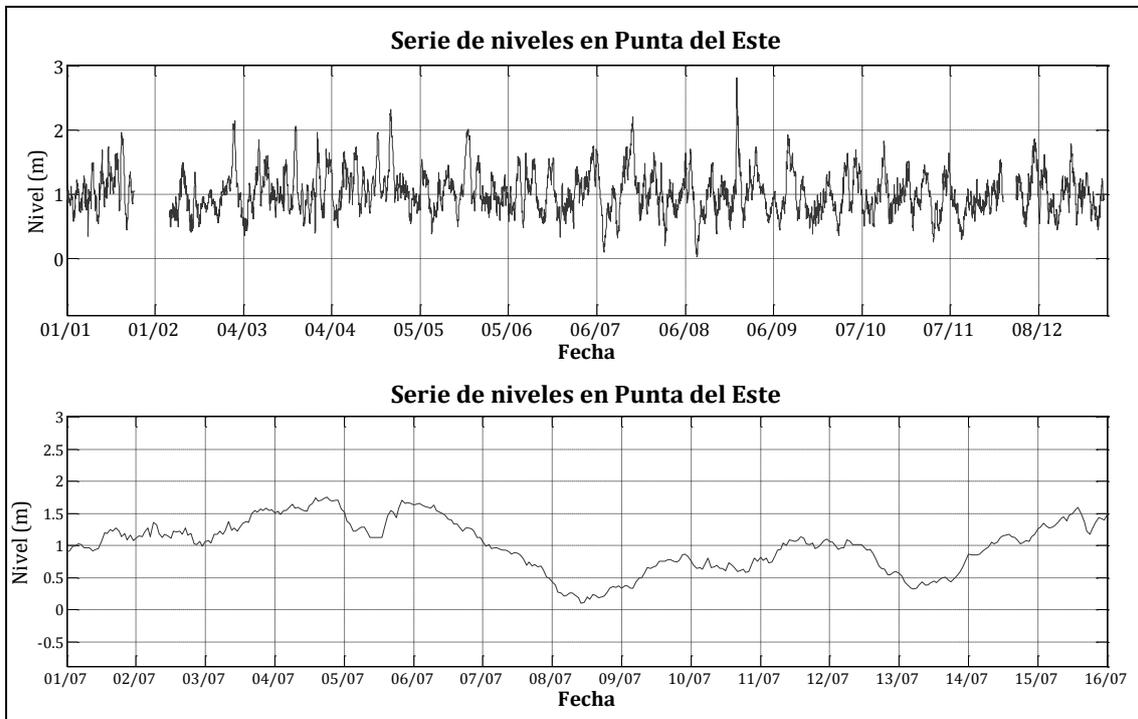


Figura 24: Serie de niveles en la estación de Punta del Este durante el año 2005 (arriba), y durante la primera quincena de julio de 2005 (abajo).

La Figura 25 muestra un gráfico tipo boxplots con ciclo anual de la serie, y la Figura 26 los valores de nivel medio y varianza asociados a cada mes. Se puede ver en esta última figura que la varianza es cercana a los 10cm, mientras que los niveles medios mensuales presentan sus máximos apartamientos del nivel medio en abril y setiembre siendo ambos menores a 10cm.

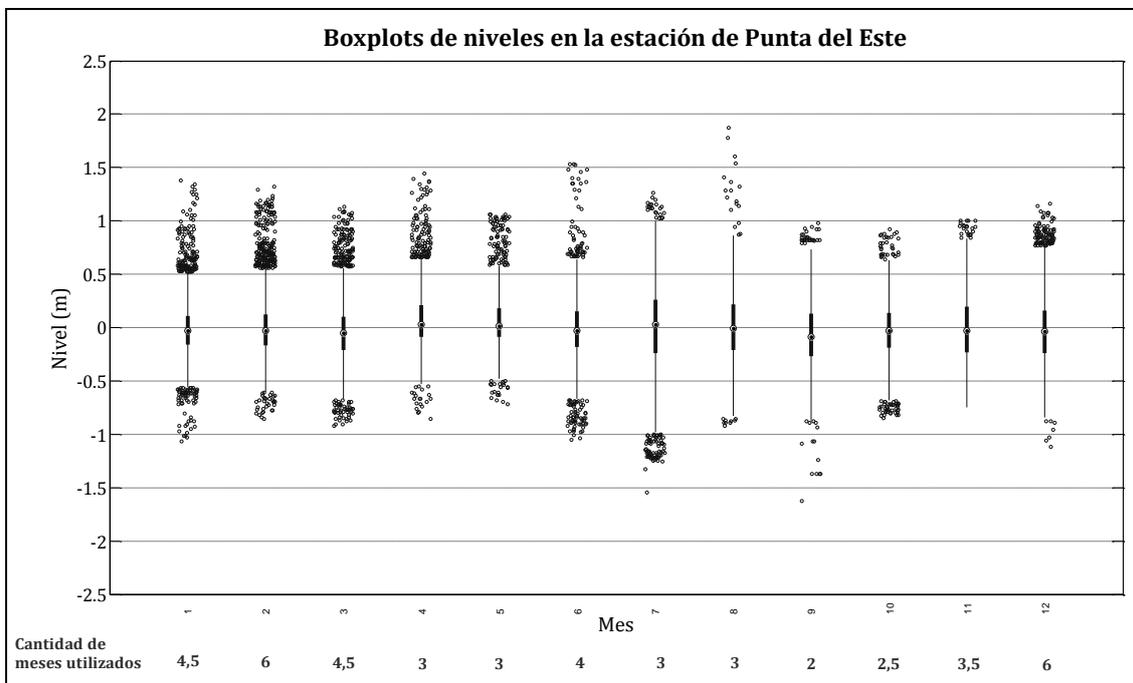


Figura 25: Boxplots de las series de niveles mensuales en la estación Punta del Este.

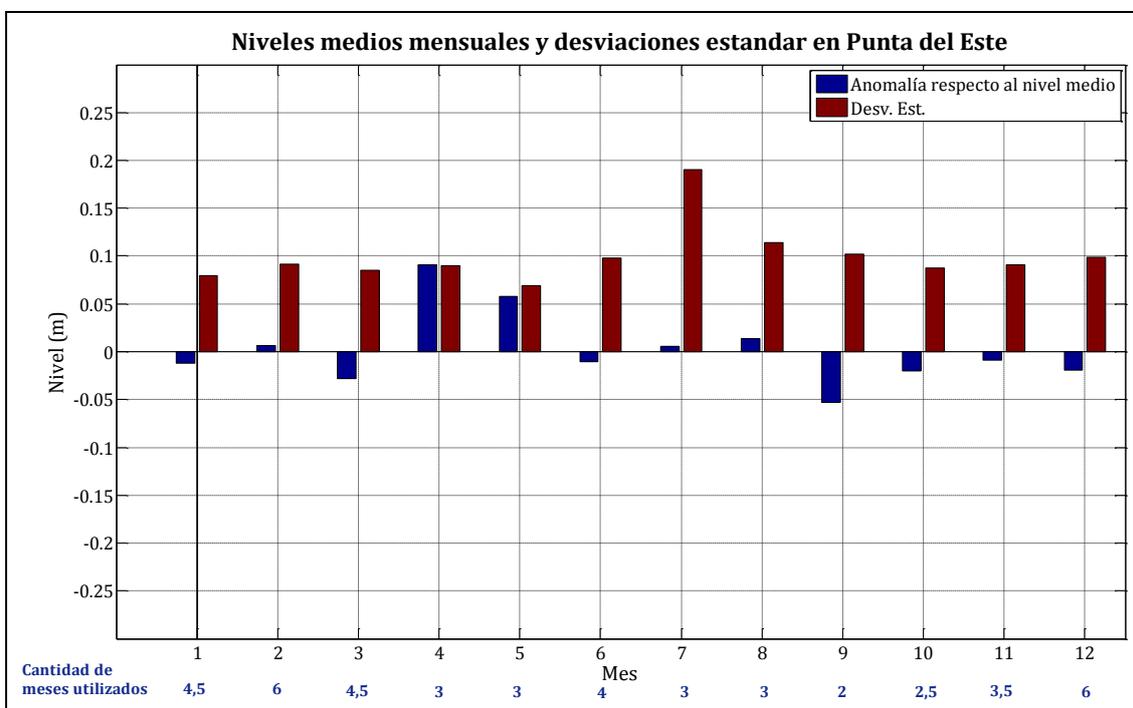


Figura 26: Gráfico de niveles medios mensuales y desviaciones estándar en la estación Punta del Este.

En la Figura 27 se presenta el histograma correspondiente a la totalidad de los datos disponibles. Se muestra también la curva de excedencia de la serie de

niveles, la cual permite observar que el 50% del tiempo los registros no exceden los 0,85 m aproximadamente, mientras que menos de 10% de los registros superan 1,25 m.

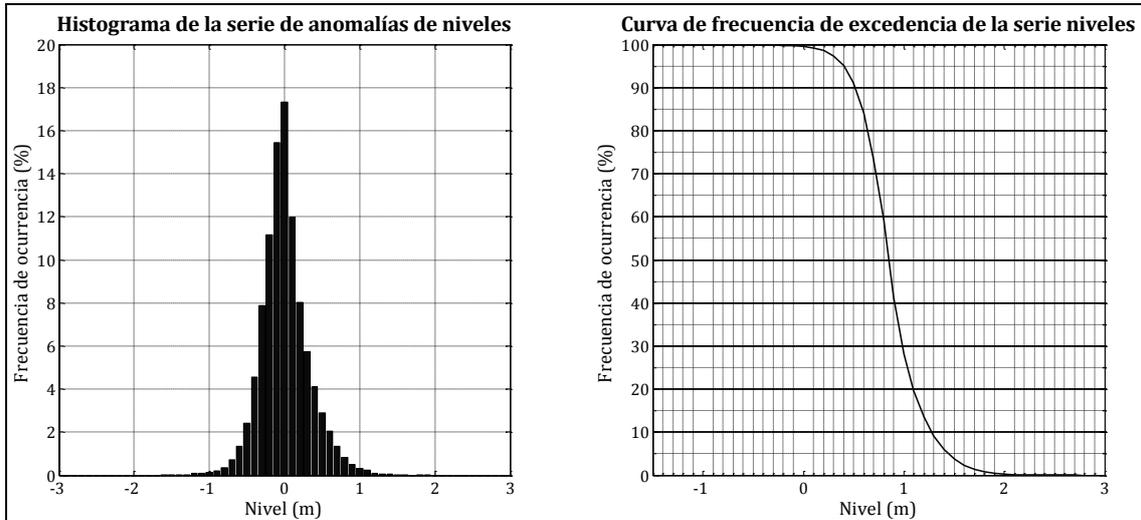


Figura 27: Histograma de la serie de anomalías de niveles disponibles (izq.) y curva de frecuencia de excedencia de la serie de niveles en la estación de Punta del Este.

III.2.3.2. Análisis espectral

El espectro obtenido a partir de la serie de niveles disponibles en la estación de Punta del Este se presenta en la Figura 28. Los datos utilizados para su cálculo son los correspondientes al período marzo a octubre de 2005. No se identifican períodos con energías predominantes; las componentes de marea astronómica M2 y O1 apenas presentan máximos relativos.

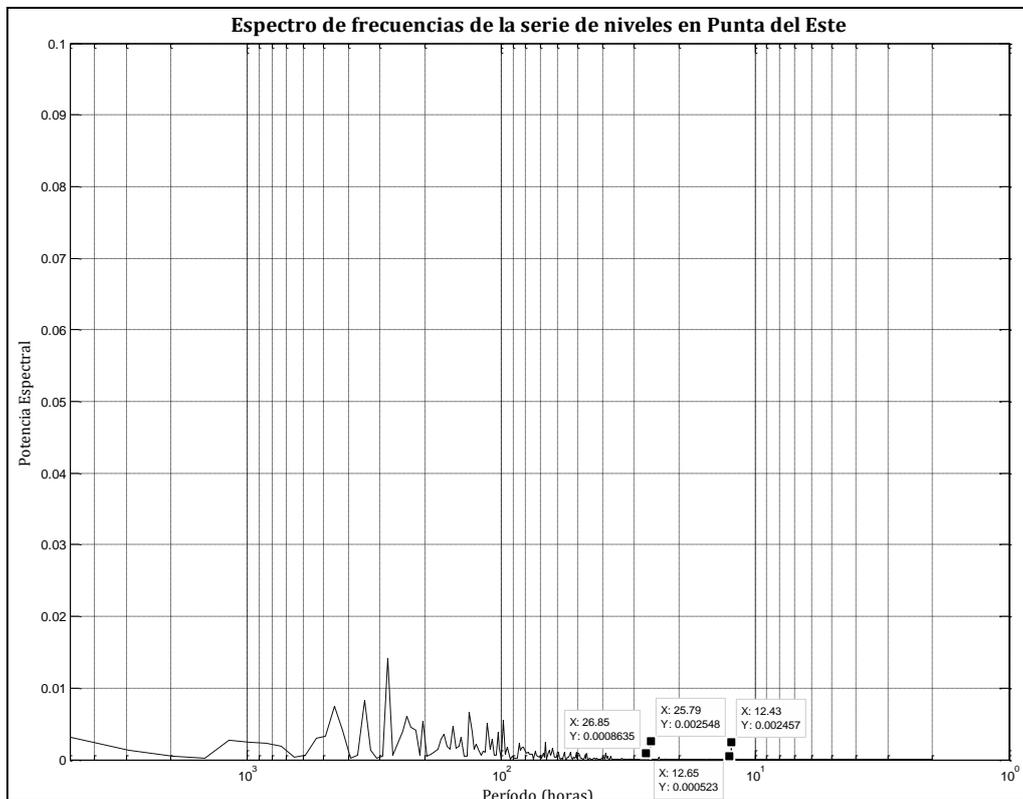


Figura 28: Espectro de la serie de niveles en la estación de Punta del Este.

III.2.3.3. Ajuste de las componentes astronómicas de marea

Utilizando la herramienta Ttide se ajustaron las componentes teóricas de la marea astronómica obteniendo los siguientes resultados:

Estación Punta del Este						
Componente	Período (h)	Amplitud (m)	Amp_err (m)	Fase (°)	Fas_err (°)	SNR
M2	12,42	0,0653	0,004	236,27	3,23	250,00
O1	25,82	0,0479	0,009	113,49	9,79	26,00
N2	12,66	0,0351	0,004	208,94	5,62	91,00
2MS6	4,09	0,0113	0,002	316,84	11,92	22,00

Tabla 13: Componentes teóricas de la marea astronómica en la estación Punta del Este.

Para realizar este ajuste se utilizaron al igual que en el análisis espectral los datos correspondientes a los meses comprendidos entre marzo y octubre de 2005. Así como en el espectro no se visualizaban períodos con una clara concentración de energía, el ajuste muestra amplitudes muy pequeñas (la mayor apenas supera los 5 cm) en todas la componentes.

III-2.2.4. *Estación San Clemente*

III.2.4.1. Análisis exploratorio

La totalidad de los datos de niveles disponibles en la estación San Clemente tienen un valor medio de 0,95 mWh y una varianza de 0,20 m. Estos niveles están referidos al cero de la escala de dicha estación, cuya relación con el Plano Hidrométrico Provisorio (Ex - Wharton) lamentablemente no pudo ser establecida.

Los gráficos de la serie de niveles durante todo el año 2000 y durante la primera quincena del mes de noviembre del mismo año se presentan en la Figura 29. Este último gráfico permite observar al igual que varias de las otras estaciones presentadas las variaciones semidiurnas típicas de la marea astronómicas, las cuales se superponen a oscilaciones de mayor período tal como se observa entorno al día 14 de noviembre.

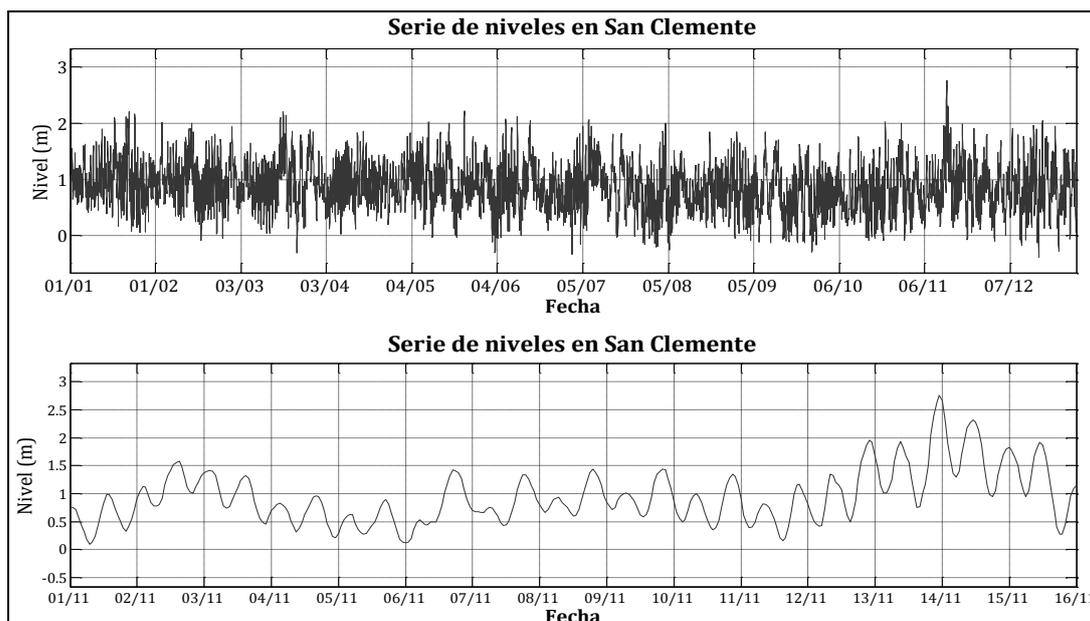


Figura 29: Serie de niveles en la estación de San Clemente durante el año 2000 (arriba), y durante la primera quincena de noviembre de 2000 (abajo).

La Figura 30 muestra un gráfico tipo boxplots con ciclo anual de la serie, y la Figura 31 los valores de nivel medio y varianza asociados a cada mes. El mes de setiembre presenta la mayor diferencia respecto al nivel medio de la totalidad de la serie. Es importante tener en cuenta que la cantidad de meses disponibles para este análisis es muy poca en esta estación.

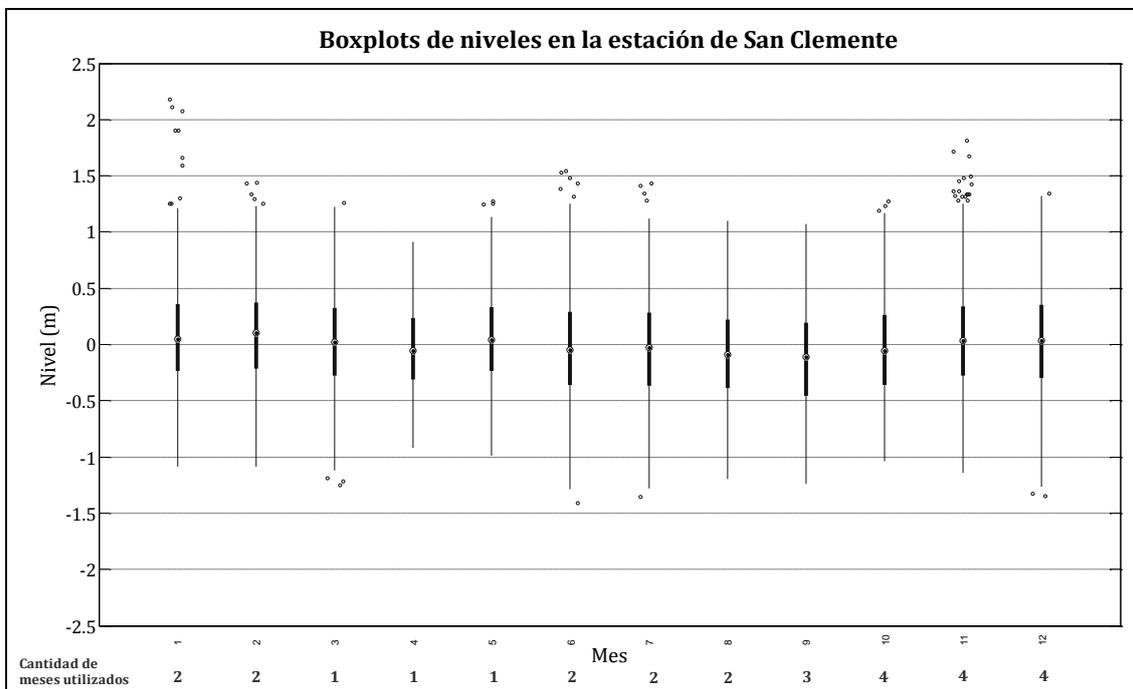


Figura 30: Boxplots de las series de niveles mensuales en la estación San Clemente.

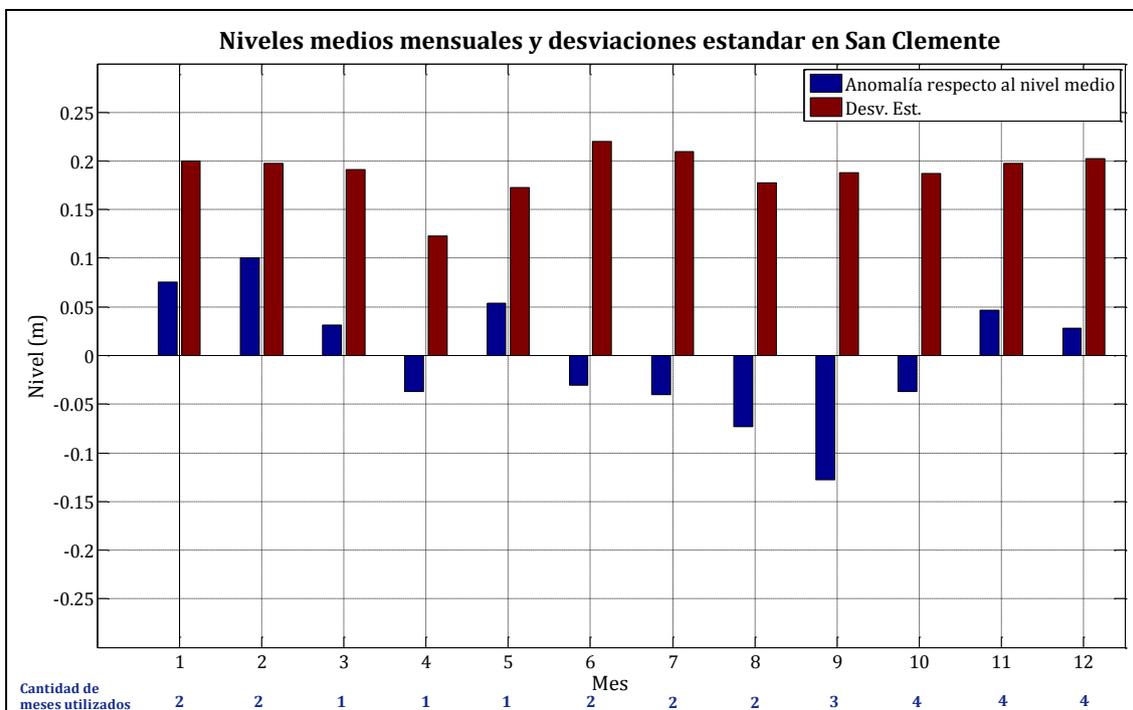


Figura 31: Gráfico de niveles medios mensuales y desviaciones estándar en la estación San Clemente.

En la Figura 32 se presenta el histograma correspondiente a la totalidad de los datos disponibles, se puede ver una leve asimetría hacia los valores inferiores al

nivel medio. Se muestra también la curva de excedencia de la serie de niveles, la cual permite observar que el 50% del tiempo los registros no exceden los 0,85m aproximadamente, mientras que menos de 10% de los registros superan 1,45 m.

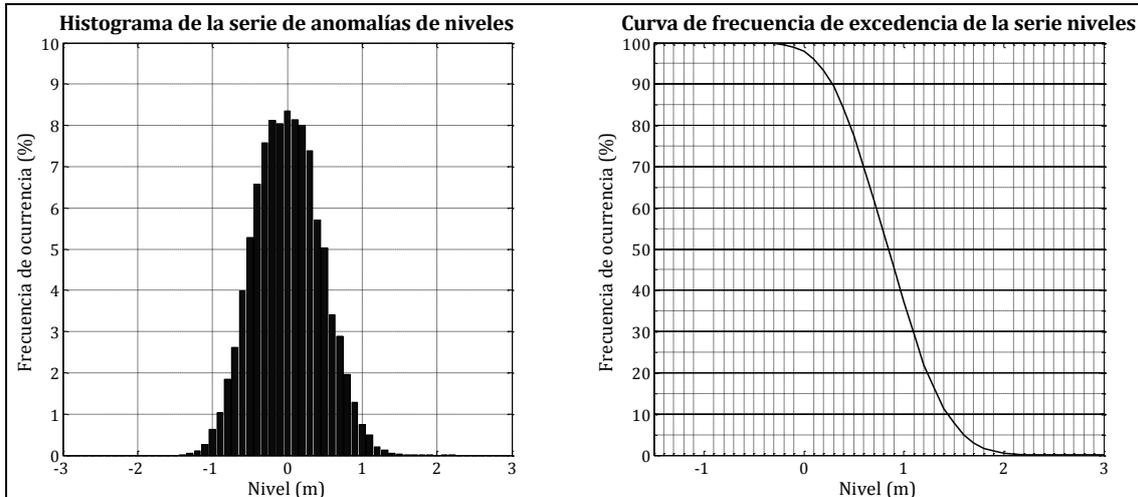


Figura 32: Histograma de la serie de anomalías de niveles (izq.) y curva de excedencia de frecuencia de niveles (derecha) en la estación de San Clemente.

III.2.4.2. Análisis espectral

El espectro obtenido a partir de la serie de niveles disponibles en la estación San Clemente se presenta en la Figura 33. Los períodos de mayor energía se corresponden con las componentes teóricas de la marea astronómica M2 (12,42 h), O1 (25,82 h), N2 (12,66 h), K1 (23,93 h) y S2 (12,0 h).

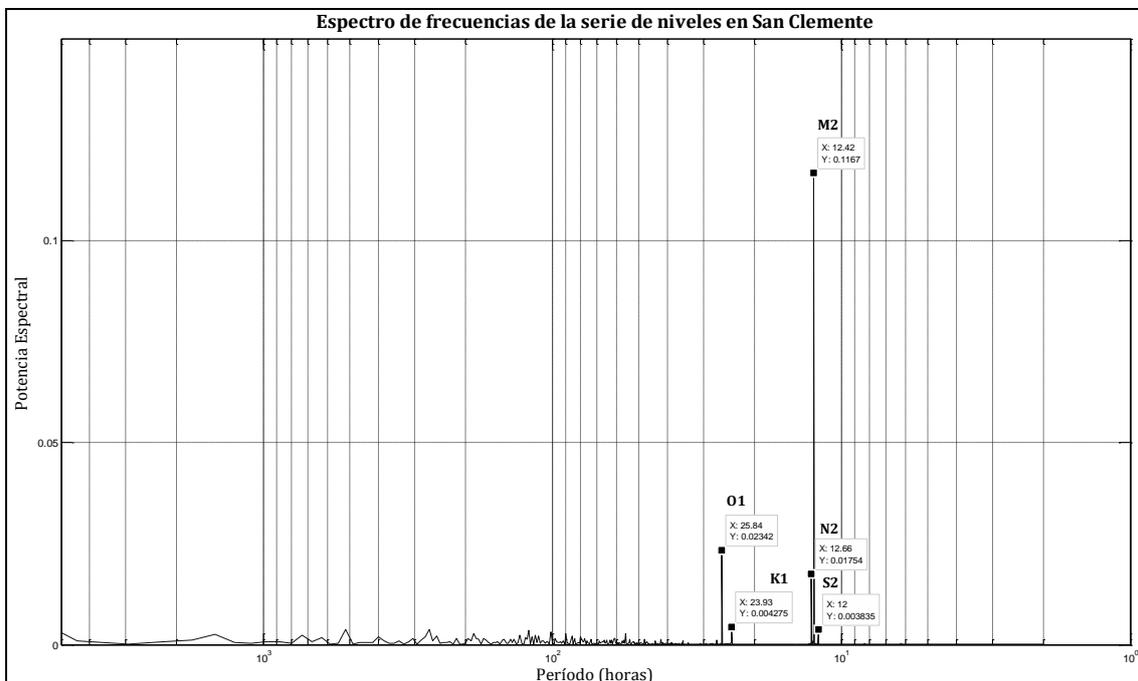


Figura 33: Espectro de la serie de niveles en la estación de San Clemente.

III.2.4.3. Ajuste de las componentes astronómicas de marea

Utilizando la herramienta Ttide se ajustaron las componentes teóricas de la marea astronómica obteniendo los siguientes resultados:

Estación San Clemente						
Componente	Período (h)	Amplitud (m)	Amp_err (m)	Fase (°)	Fas_err (°)	SNR
M2	12,42	0,3659	0,008	280,31	1,42	2200,00
O1	25,82	0,178	0,016	76,27	5,19	120,00
N2	12,66	0,1425	0,008	246,97	3,24	280,00
K1	23,93	0,0686	0,015	211,8	14,22	20,00
S2	12,00	0,06	0,008	356,33	8,24	58,00
NU2	12,63	0,0332	0,008	251,1	14,29	18,00
M4	6,21	0,0212	0,003	21,49	9	39,00
M3	8,28	0,0159	0,003	316,79	11,19	30,00
MS4	6,10	0,0119	0,003	110,69	14,81	13,00
2MS6	4,09	0,0068	0,002	329,86	12,8	18,00
M6	4,14	0,0049	0,001	255,54	17,53	15,00

Tabla 14: Componentes teóricas de la marea astronómica en la estación San Clemente.

Para realizar este ajuste se utilizaron al igual que en el análisis espectral los datos correspondientes a los meses comprendidos entre marzo y octubre de 2005. Las componentes de mayor energía en el espectro se reflejan en este análisis presentando la componente M2 la mayor amplitud cercana a 37 cm, mientras que le siguen las componentes O1 con una amplitud de 18 cm, la componente N2 con 14 cm y la componente K1 con 7 cm, las restantes son del orden de algunos pocos centímetros.

III-2.2.5. Estación Montevideo

III.2.2.5.1. Análisis exploratorio

A partir de los datos disponibles se obtuvo un nivel medio igual a 0,975 mWh y la varianza de 0,18 m. El nivel medio reportado por el SOHMA en sus tablas de marea para esta estación es de 0,91 mWh.

Los gráficos de la serie de niveles durante todo el año 2004 y durante la primera quincena del mes de febrero del mismo año se presentan en la Figura 34.

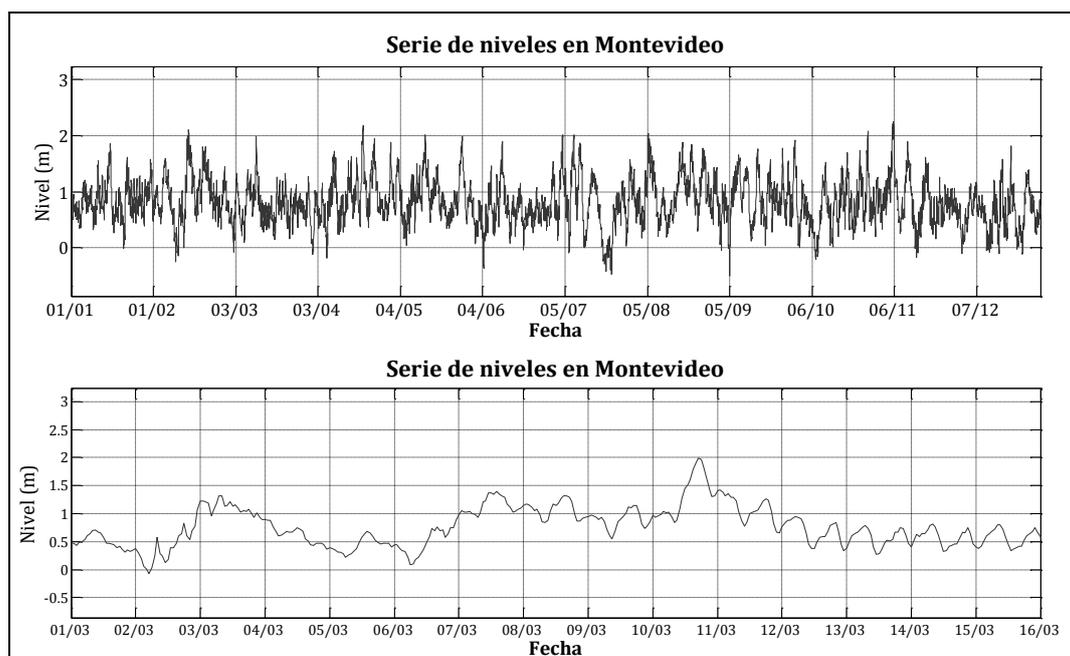


Figura 34: Serie de niveles en la estación Montevideo durante el año 2004 (arriba), y durante la primera quincena de febrero de 2004 (abajo).

La Figura 35 muestra un gráfico tipo boxplots con ciclo anual de la serie, y la Figura 36 los valores de nivel medio y varianza asociados a cada mes. Los niveles medios mensuales no se apartan del nivel medio en más de 9 cm.

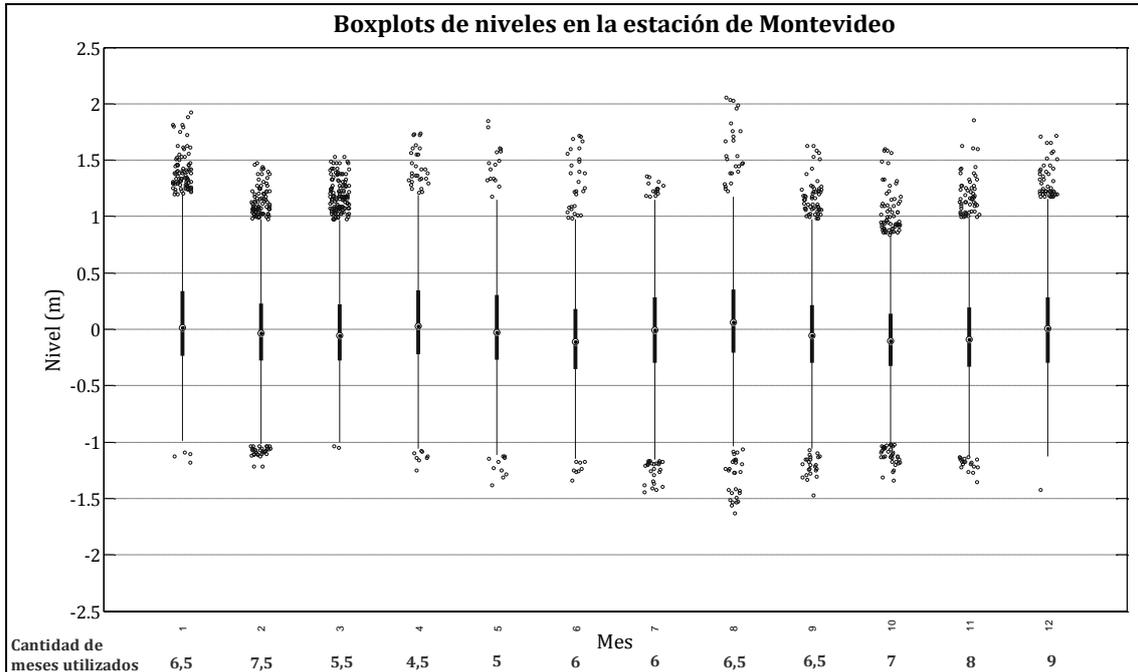


Figura 35: Boxplots de las series de niveles mensuales en la estación Montevideo.

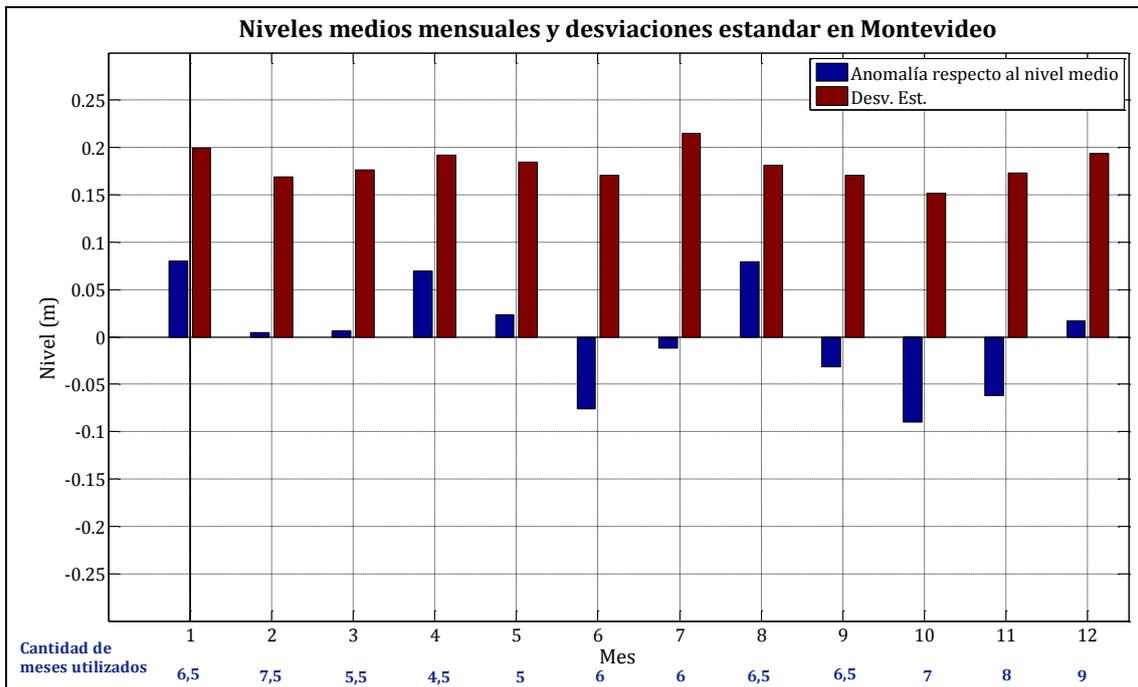


Figura 36: Gráfico de niveles medios mensuales y desviaciones estándar en la estación Montevideo.

En la Figura 37 se presenta el histograma correspondiente a la totalidad de los datos disponibles. Se muestra también la curva de excedencia de la serie de niveles, la cual permite observar que el 50% del tiempo los registros no exceden los 0,85 m aproximadamente, mientras que menos de 10% de los registros superan 1,45 m.

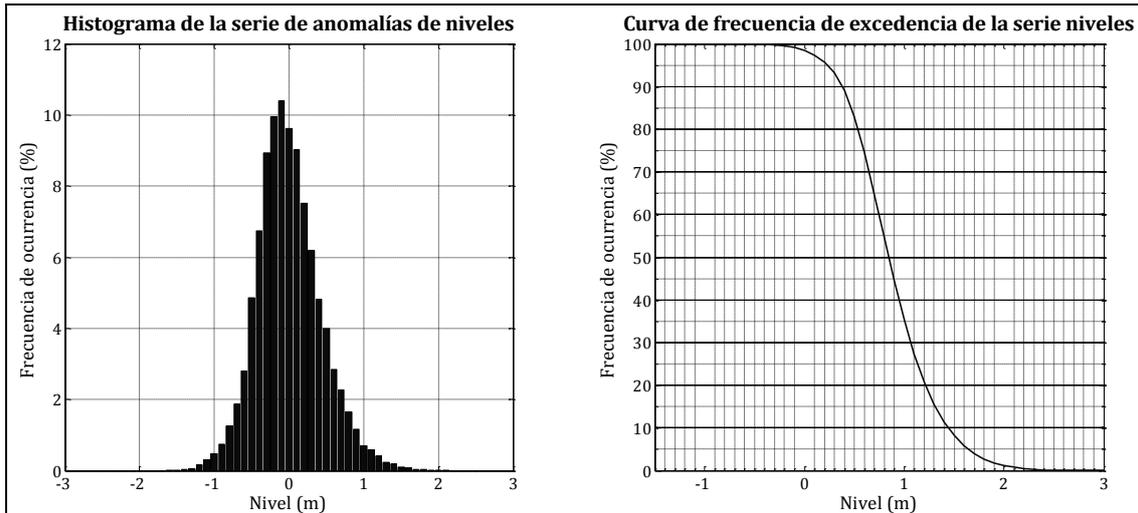


Figura 37: Histograma de la serie de anomalías de niveles (izq.) y curva de frecuencia de excedencia de niveles (derecha) en la estación de Montevideo.

III.2.5.2. Análisis espectral

El espectro obtenido a partir de la serie de niveles durante el año 2004 en la estación Montevideo se presenta en la Figura 38. Los períodos de mayor energía se corresponden con las componentes teóricas de la marea astronómica M2 (12,42 h), O1 (25,82 h) y N2. Sin embargo, comparando con los resultados en estaciones de la costa Argentina como San Clemente o Mar del Plata la energía asociada a las principales componentes es menor, en particular la componente M2.

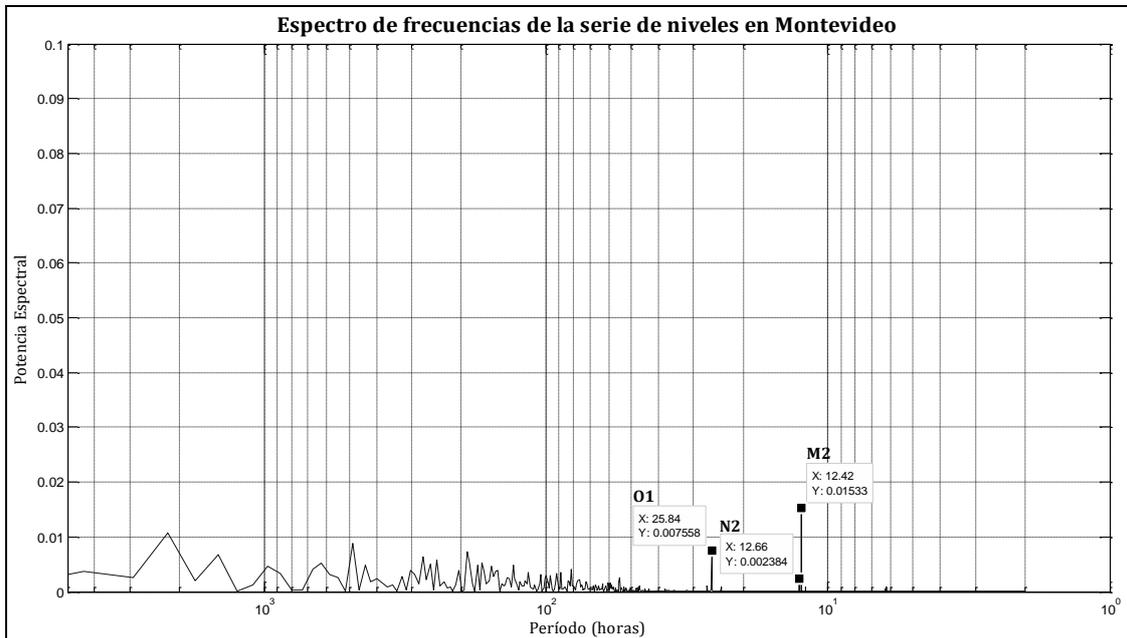


Figura 38: Espectro de la serie de niveles en la estación de Montevideo.

III.2.5.3. Ajuste de las componentes astronómicas de marea

Utilizando la herramienta Ttide se ajustaron las componentes teóricas de la marea astronómica obteniendo los siguientes resultados:

Estación Montevideo						
Componente	Período (h)	Amplitud (m)	Amp_err (m)	Fase (°)	Fas_err (°)	SNR
M2	12,42	0,136	0,004	35,8	1,96	960
O1	25,82	0,082	0,009	142,1	5,65	91
N2	12,66	0,054	0,004	349,8	5,1	160
M4	6,21	0,032	0,004	146,0	6,53	63
Q1	26,87	0,030	0,008	96,1	15,11	16
M4	6,21	0,029	0,004	236,0	7,71	53
S2	12,00	0,028	0,004	116,8	8,92	46
MN4	6,27	0,022	0,003	138,0	8,04	43
MS4	6,10	0,017	0,004	260,0	12,37	22
2MS6	4,09	0,009	0,002	104,6	10,47	33
M6	4,14	0,008	0,002	48,3	11,69	21
2MN6	4,17	0,006	0,001	37,8	15,34	17

Tabla 15: Componentes teóricas de la marea astronómica en la estación Montevideo.

Para realizar este ajuste se utilizaron al igual que en el análisis espectral los datos correspondientes a los meses comprendidos entre marzo y octubre de 2005. Al igual que en anteriores estaciones la principal componente es la M2 con una amplitud de aproximadamente 14 cm, la cual es notoriamente menor a la amplitud de la misma componente en las estaciones ubicadas en la costa Argentina. Las componentes que le siguen tienen amplitudes menores a 10 cm, siendo las más significativas las componentes O1 y N2. La componente M4 se hace presente con una amplitud de aproximadamente 3 cm.

III-2.2.6. Estación Torre Oyarvide

III2.2.6.1. Análisis exploratorio

La totalidad de los datos de niveles disponibles en Torre Oyarvide tienen un valor medio de 1,00 m y una varianza de 0,227 m. Estos niveles están referidos al cero de la escala de dicha estación, cuya relación con el Plano Hidrométrico Provisorio (Ex - Wharton) lamentablemente no pudo ser establecida.

Los gráficos de la serie de niveles durante todo el año 2004 y durante la primera quincena del mes de febrero del mismo año se presentan en la Figura 39. Este último gráfico permite observar al igual que en las otras estaciones presentadas las variaciones semidiurnas típicas de la marea astronómicas, sin embargo se ve que las mismas se encuentran superpuestas sobre oscilaciones de mayor período (varios días) por ejemplo la que presenta su máximo el día 14 de febrero.

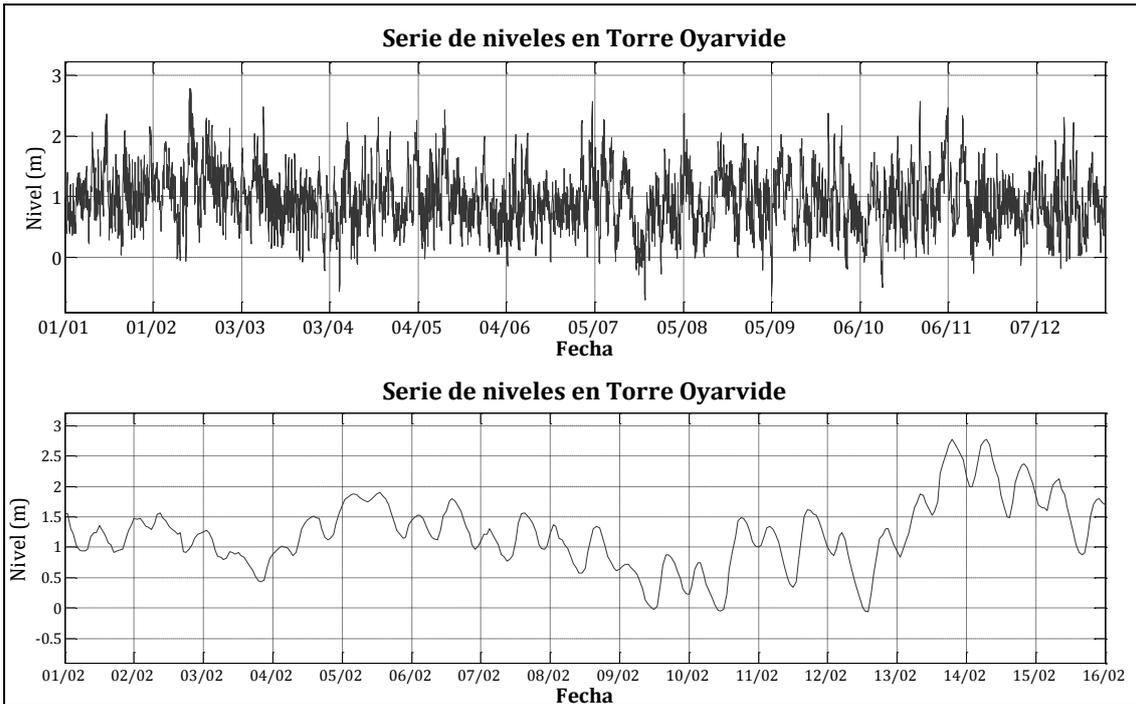


Figura 39: Serie de niveles en la estación de Torre Oyarvide durante el año 2004 (arriba), y durante la primera quincena de febrero de 2004 (abajo).

La Figura 40 muestra un gráfico tipo boxplots con ciclo anual de la serie, y la Figura 41 los valores de nivel medio y varianza asociados a cada mes. Los meses cuyo nivel medio presenta mayor diferencia con el nivel medio son mayo y junio, sin embargo se debe tener en cuenta que se tienen muy pocos datos en dichos meses (solo se poseen datos de junio en el año 2004).

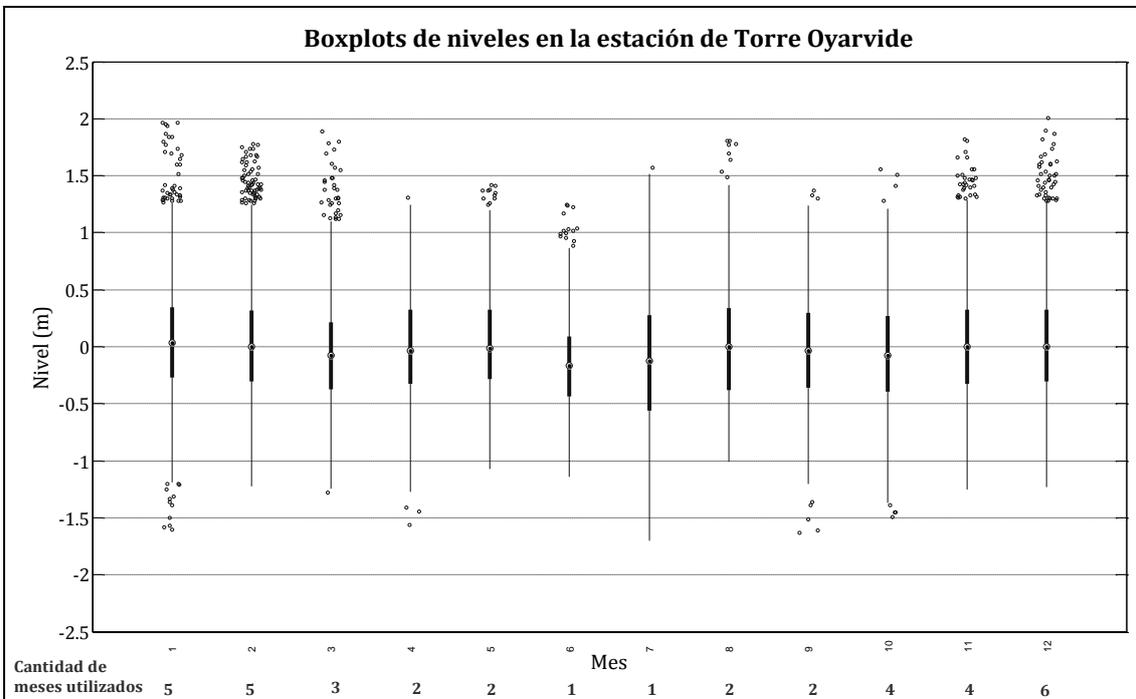


Figura 40: Boxplots de las series de niveles mensuales en la estación Torre Oyarvide.

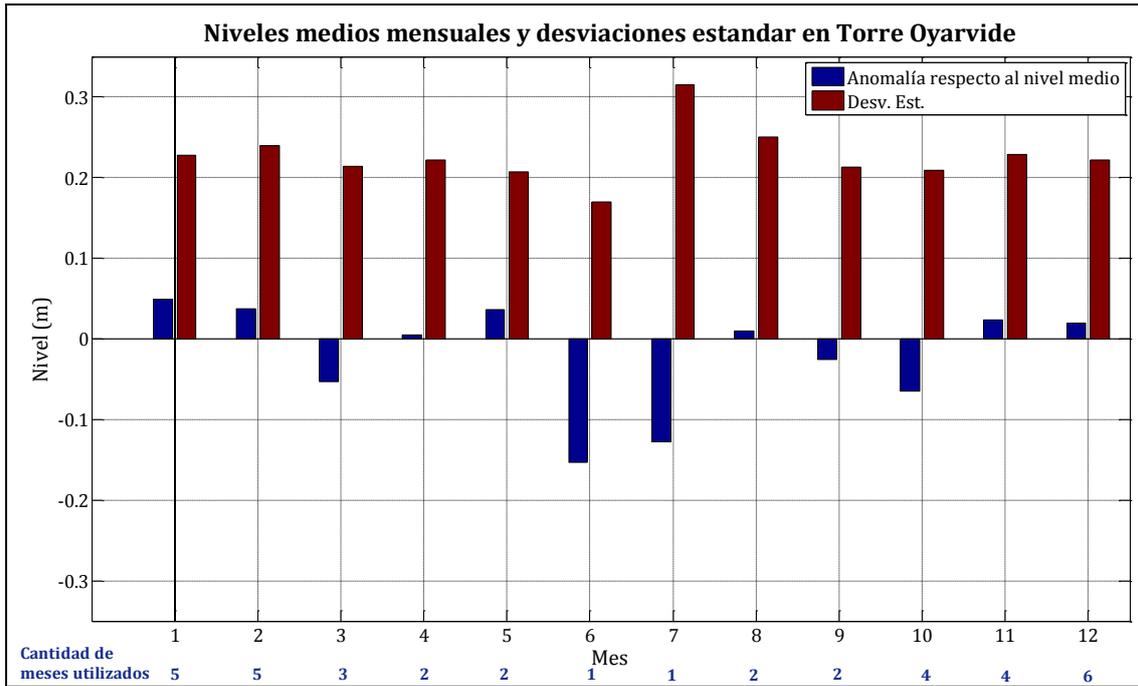


Figura 41: Gráfico de niveles medios mensuales y desviaciones estándar en la estación Torre Oyarvide.

En la Figura 42 se presenta el histograma correspondiente a la totalidad de los datos disponibles. La curva de excedencia de la serie de niveles muestra que el 50% del tiempo los registros no exceden los 0,9 m aproximadamente, mientras que menos de 10% de los registros superan 1,55 m. Sin embargo, se debe tener en cuenta que estos valores se encuentran referidos al cero de la escala de dicha estación por lo que no son comparables con los obtenidos en otras estaciones que fueron referidos al Plano Hidrométrico Provisorio (Ex - Wharton).

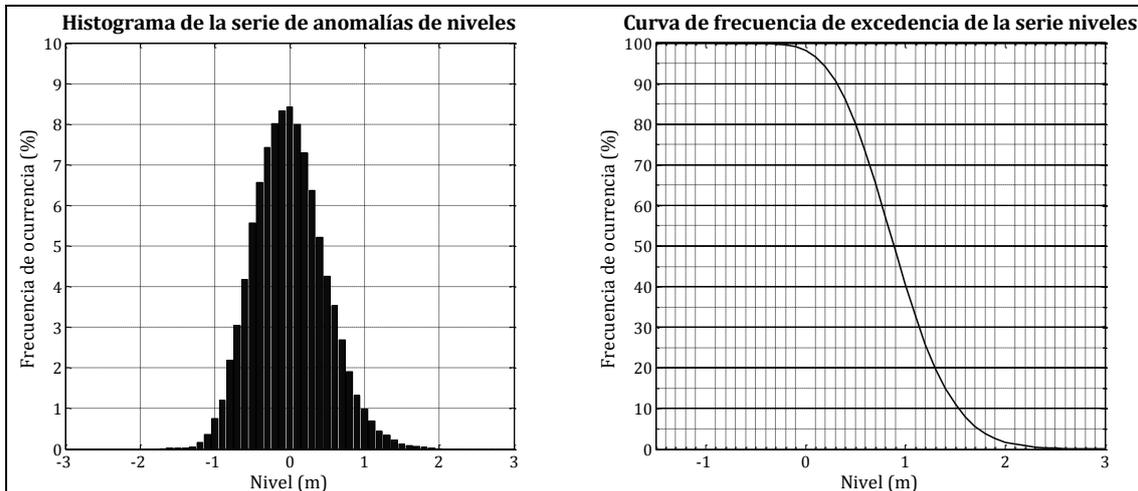


Figura 42: Histograma de la serie de anomalías de niveles (izq.) y curva de excedencia de frecuencia (derecha) en la estación de Torre Oyarvide.

III.2.2.6.2. Análisis espectral

El espectro obtenido a partir de la serie de niveles durante el año 2004 en la estación de La Torre Oyarvide se presenta en la Figura 43. Los períodos de mayor

energía se corresponden con las componentes teóricas de la marea astronómica M2 (12,42 h), O1 (25,82 h), N2 (12,66 h), K1 (23,93 h) y S2 (12,0 h).

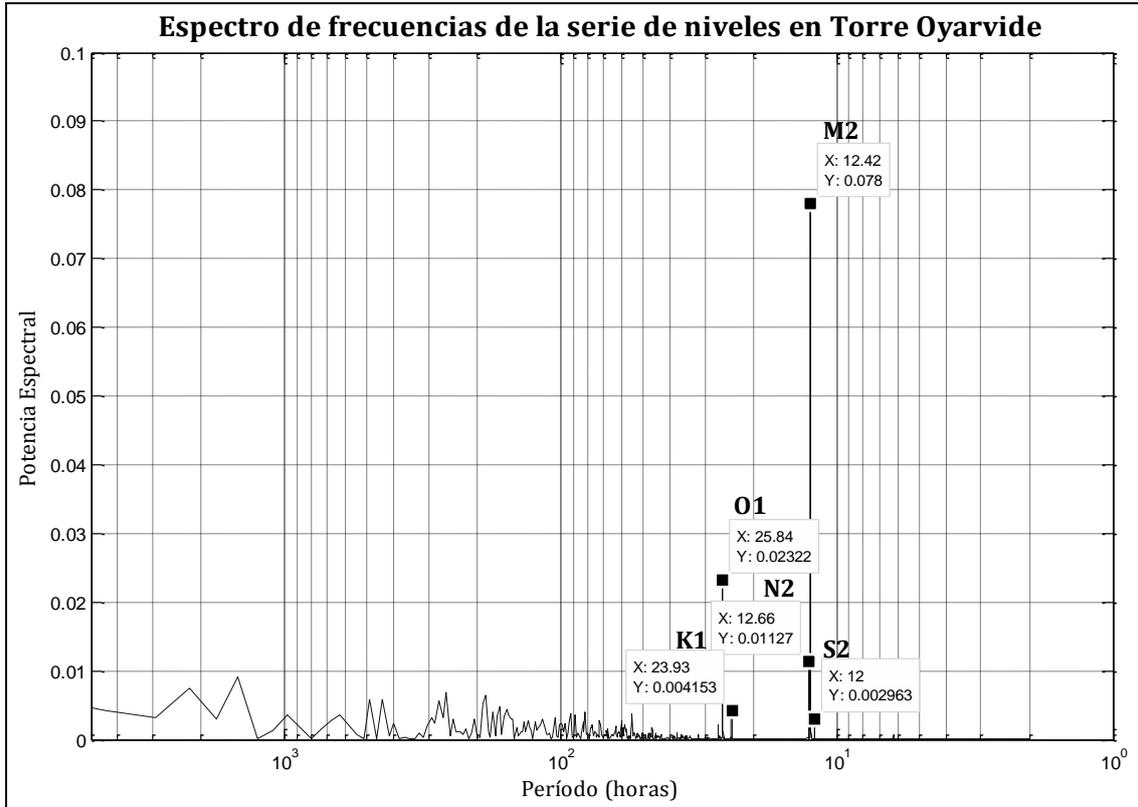


Figura 43: Espectro de la serie de niveles en la estación de Torre Oyarvide.

III.2.6.3. Ajuste de las componentes astronómicas de marea

Utilizando la herramienta Ttide se ajustaron las componentes teóricas de la marea astronómica obteniendo los siguientes resultados:

Estación Torre Oyarvide						
Componente	Período (h)	Amplitud (m)	Amp_err (m)	Fase (°)	Fas_err (°)	SNR
M2	12,42	0,309	0,008	57,4	1,49	1400
O1	25,82	0,141	0,014	148,8	5,73	110
N2	12,66	0,118	0,008	16,9	3,7	240
S1	24,00	0,093	0,024	26,2	14,56	15
K1	23,93	0,060	0,015	320,2	14,64	15
S2	12,00	0,054	0,008	145,9	7,65	43
M4	6,21	0,037	0,004	326,0	4,99	86
MN4	6,27	0,020	0,004	306,7	12,69	24
M4	6,21	0,014	0,004	56,0	15,96	12
M6	4,14	0,009	0,002	338,7	11,53	29
2MN6	4,17	0,008	0,002	281,6	11,81	24

Tabla 16: Componentes teóricas de la marea astronómica en la estación Torre Oyarvide.

Para realizar este ajuste se utilizaron al igual que en el análisis espectral los datos correspondientes a los meses comprendidos entre marzo y octubre de 2005. Al igual que en anteriores estaciones la principal componente es la M2 con una amplitud de aproximadamente 14 cm, la cual es notoriamente menor a la amplitud de la misma componente en las estaciones ubicadas en la costa Argentina. Las componentes que le siguen tienen amplitudes menores a 10 cm, siendo las más

significativas las componentes O1 y N2. La componente M4 se hace presente con una amplitud de aproximadamente 3 cm.

III-2.2.7. Estación Pilote Norden

III.2.2.7.1. Análisis exploratorio

El nivel medio calculado a partir de los datos disponibles es de 1,13 mWh y la varianza de 0,227 m.

Los gráficos de la serie de niveles durante todo el año 2004 y durante la primera quincena del mes de julio del mismo año se presentan en la Figura 44. Al igual que en la estación Buenos Aires, es clara la superposición de las oscilaciones astronómicas con ondas de mayor período.

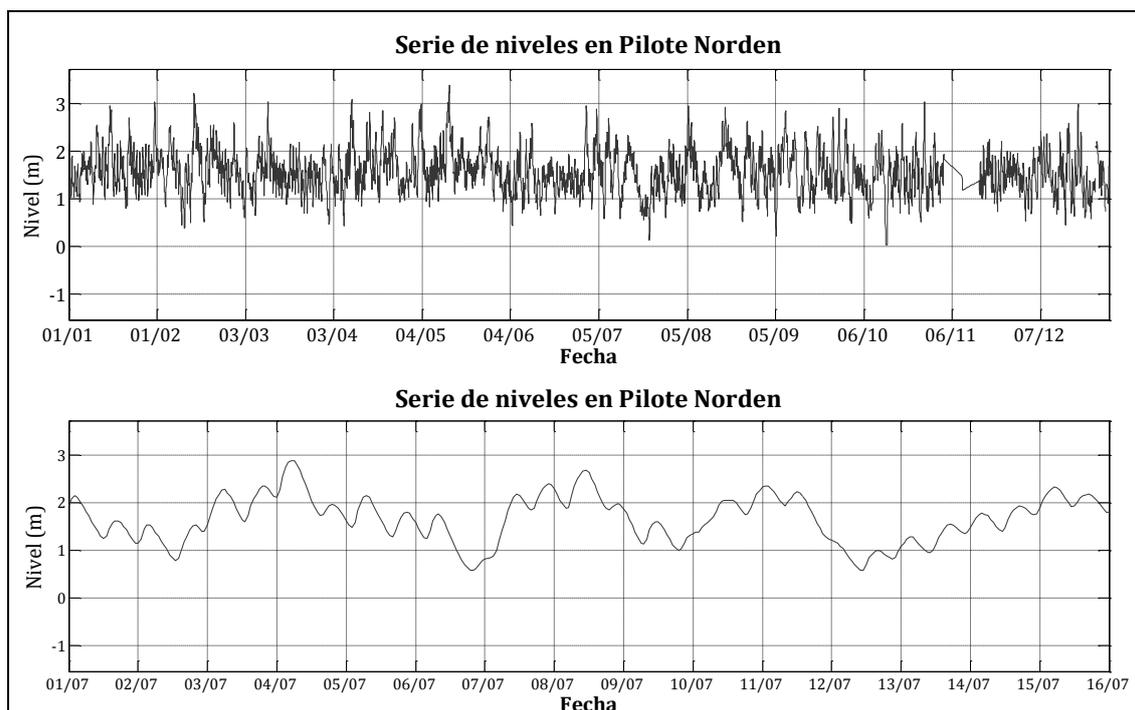


Figura 44: Serie de niveles en la estación de Pilote Norden durante el año 2004 (arriba), y durante la primera quincena de julio de 2004 (abajo).

La Figura 45 muestra un gráfico tipo boxplots con ciclo anual de la serie, y la Figura 46 los valores de nivel medio y varianza asociados a cada mes. El apartamiento respecto al nivel medio se da en el mes de abril cuyo nivel medio mensual es 8 cm superior al total, por otra parte en el mes de agosto se tiene un nivel medio 9 cm inferior al total. La máxima varianza se da en el mes de enero y es de aproximadamente 33 cm, mientras que la mínima se tiene en junio y es igual a 24 cm.

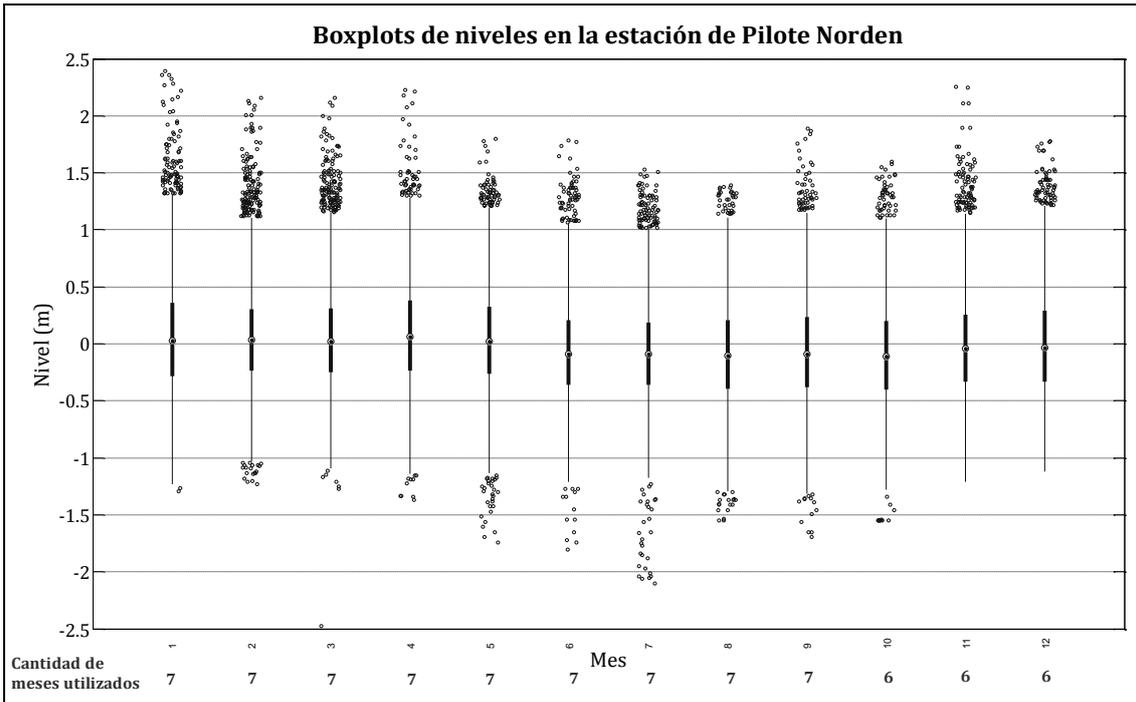


Figura 45: Boxplots de las series de niveles mensuales en la estación Pilote Norden.

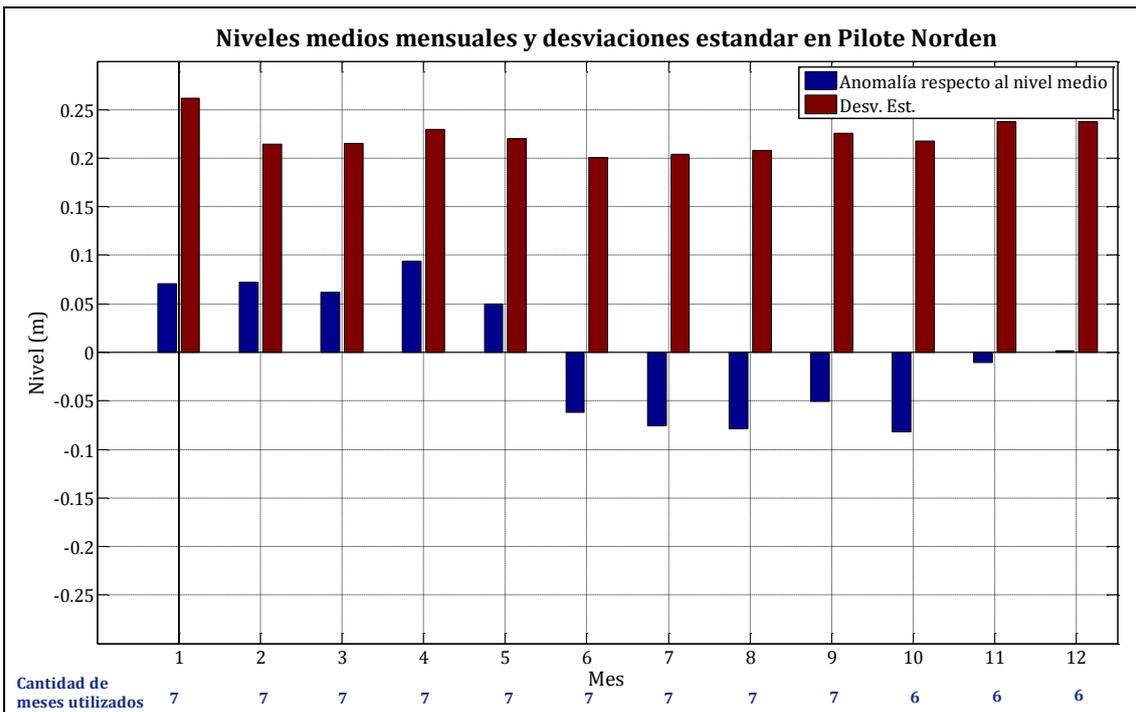


Figura 46: Gráfico de niveles medios mensuales y desviaciones estándar en la estación Pilote Norden.

En la Figura 47 se presenta el histograma correspondiente a la totalidad de los datos disponibles. Se muestra también la curva de excedencia de la serie de niveles, la cual permite observar que el 50% del tiempo los registros no exceden los 1 m aproximadamente, mientras que menos de 10% de los registros superan 1,65 m.

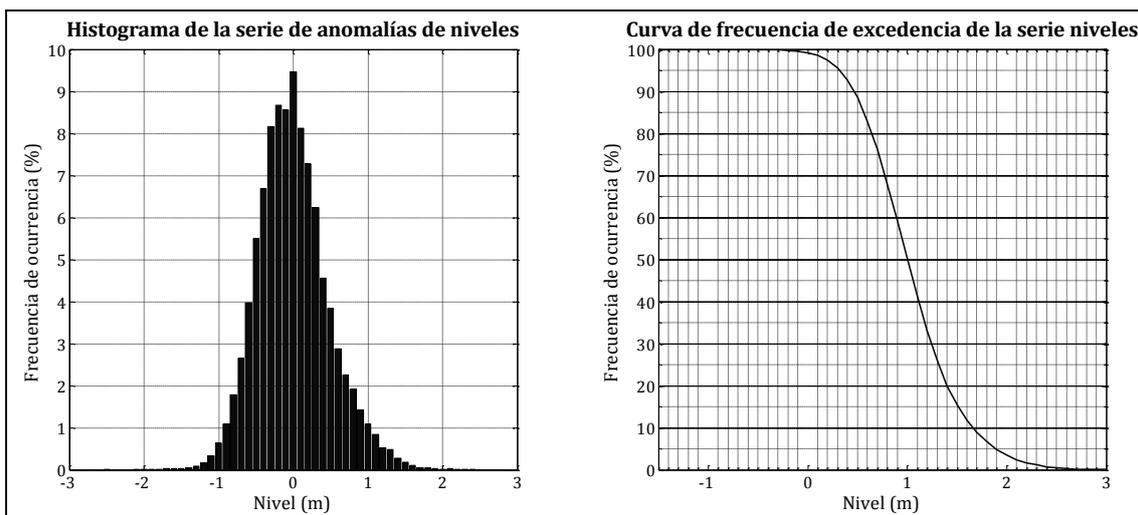


Figura 47: Histograma de la serie de anomalías de niveles (izq.) y curva de frecuencia de excedencia de niveles (derecha) en la estación de Pilote Norden.

III.2.7.2. Análisis espectral

El espectro obtenido a partir de la serie de niveles correspondiente al año 2006 en la estación Pilote Norden se presenta en la Figura 48. Los períodos de mayor energía se corresponden con las componentes teóricas de la marea astronómica M2 (12,42 h), O1 (25,82 h), K1 (23,93 h) y N2 (12,66 h).

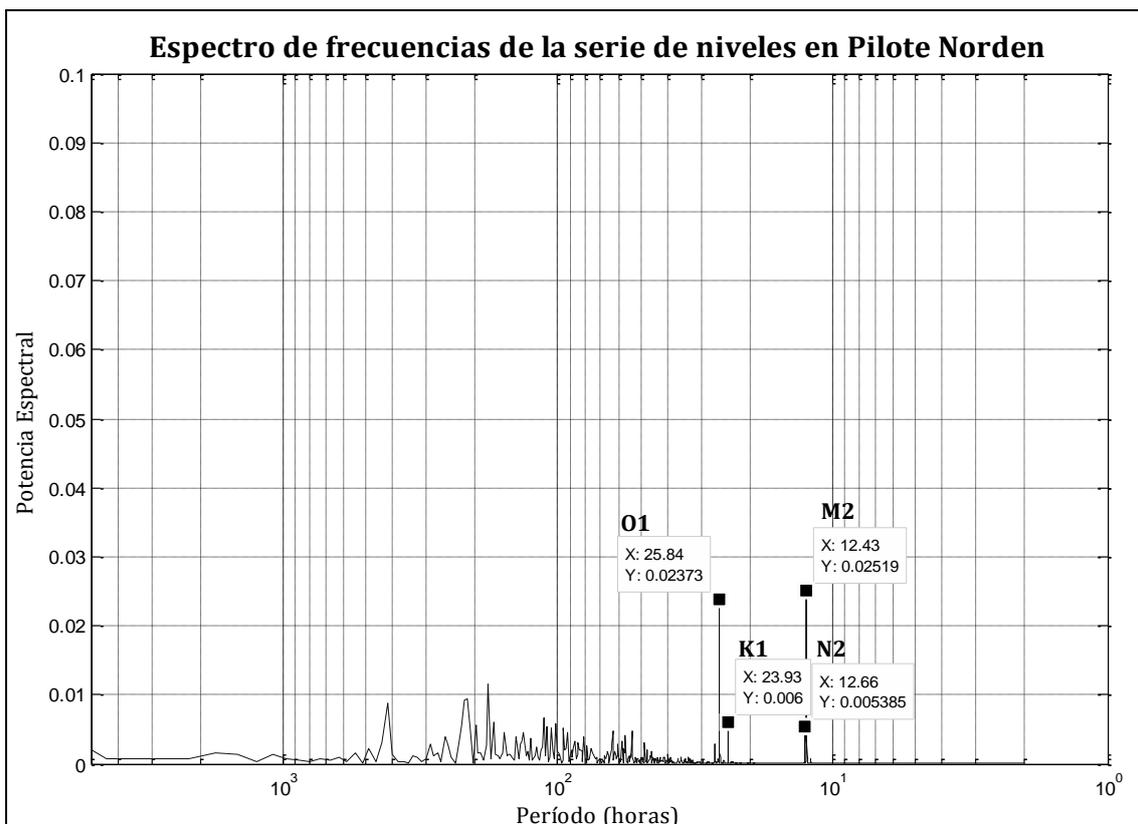


Figura 48: Espectro de la serie de niveles en la estación de Pilote Norden.

III2.2.7.3. Ajuste de las componentes astronómicas de marea

Utilizando la herramienta Ttide se ajustaron las componentes teóricas de la marea astronómica obteniendo los siguientes resultados:

Estación Pilote Norden						
Componente	Período (h)	Amplitud (m)	Amp_err (m)	Fase (°)	Fas_err (°)	SNR
M2	12,42	0,186	0,01	191,0	3,31	370
O1	25,82	0,143	0,018	216,9	7,34	65
N2	12,66	0,072	0,012	155,4	7,71	38
K1	23,93	0,069	0,018	32,5	15,58	14
M4	6,21	0,018	0,003	227,9	8,85	27
MN4	6,27	0,011	0,003	214,0	15,84	17
MO3	8,39	0,008	0,002	304,3	17,97	11
2MN6	4,17	0,005	0,001	238,1	20,97	11

Tabla 17: Componentes teóricas de la marea astronómica en la estación Pilote Norden.

Para realizar este ajuste se utilizaron al igual que en el análisis espectral los datos correspondientes al año 2006. La componente más importante es la M2 con una amplitud de casi 19 cm, seguida por la componente O1 con aproximadamente 14 cm de amplitud y luego las componentes N2 y K1 con amplitudes cercanas a 7 cm. La componente M4 se hace presente con una amplitud de 1,8 cm.

III-2.2.8. *Estación Colonia*

III2.2.8.1. Análisis exploratorio

El nivel medio calculado a partir de los datos disponibles es de 1,20 mWh y la varianza de 0,23 m. El nivel medio reportado por el SHOMA es de 1,10 mWh.

Los gráficos de la serie de niveles durante todo el año 2004 y durante la primera quincena del mes de julio del mismo año se presentan en la Figura 49. Este último gráfico permite observar al igual que en las otras estaciones presentadas las variaciones semidiurnas típicas de la marea astronómicas, sin embargo se aprecia para este período una marcada oscilación con un período aproximado de cuatro días sobre la cual se superponen las mencionadas oscilaciones astronómicas.

La Figura 50 muestra un gráfico tipo boxplots con ciclo anual de la serie, y la Figura 51 los valores de nivel medio y varianza asociados a cada mes. En el mes de mayo se tiene el mayor nivel mensual (casi 15 cm por encima del nivel medio), mientras que en el mes de julio se tiene el mínimo (12 cm por debajo del nivel medio). La máxima varianza se da en el mes de agosto y es de aproximadamente 29 cm, mientras que la mínima se tiene en abril igual a 17 cm.

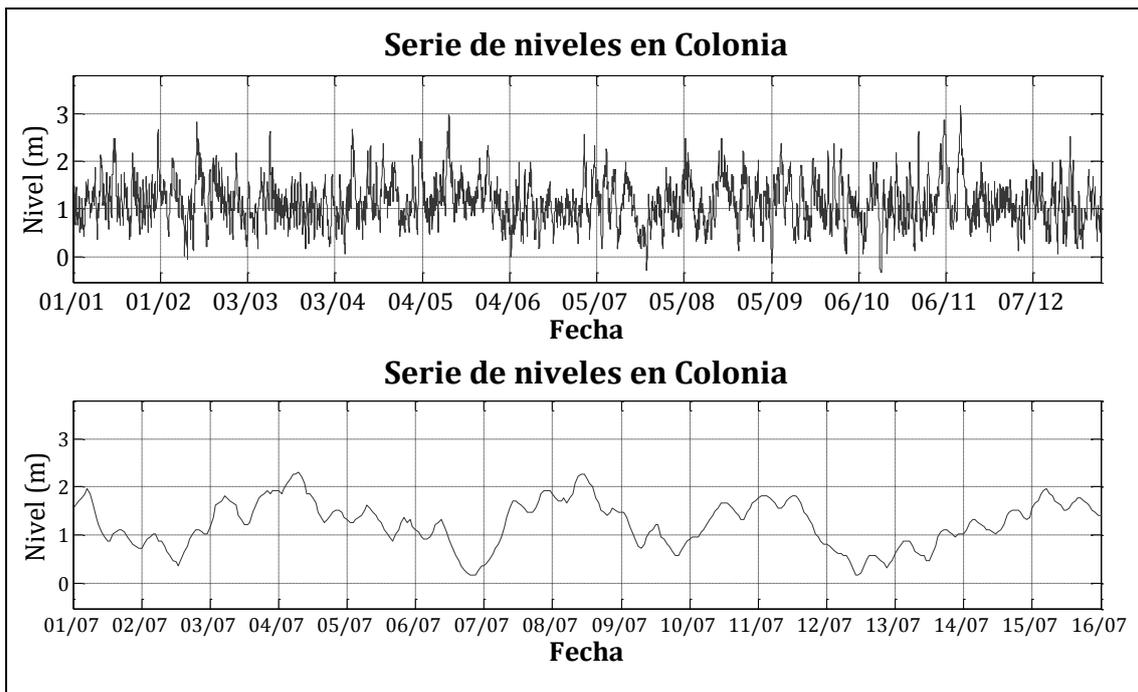


Figura 49: Serie de niveles en la estación de Colonia durante el año 2004 (arriba), y durante la primera quincena de julio de 2004 (abajo).

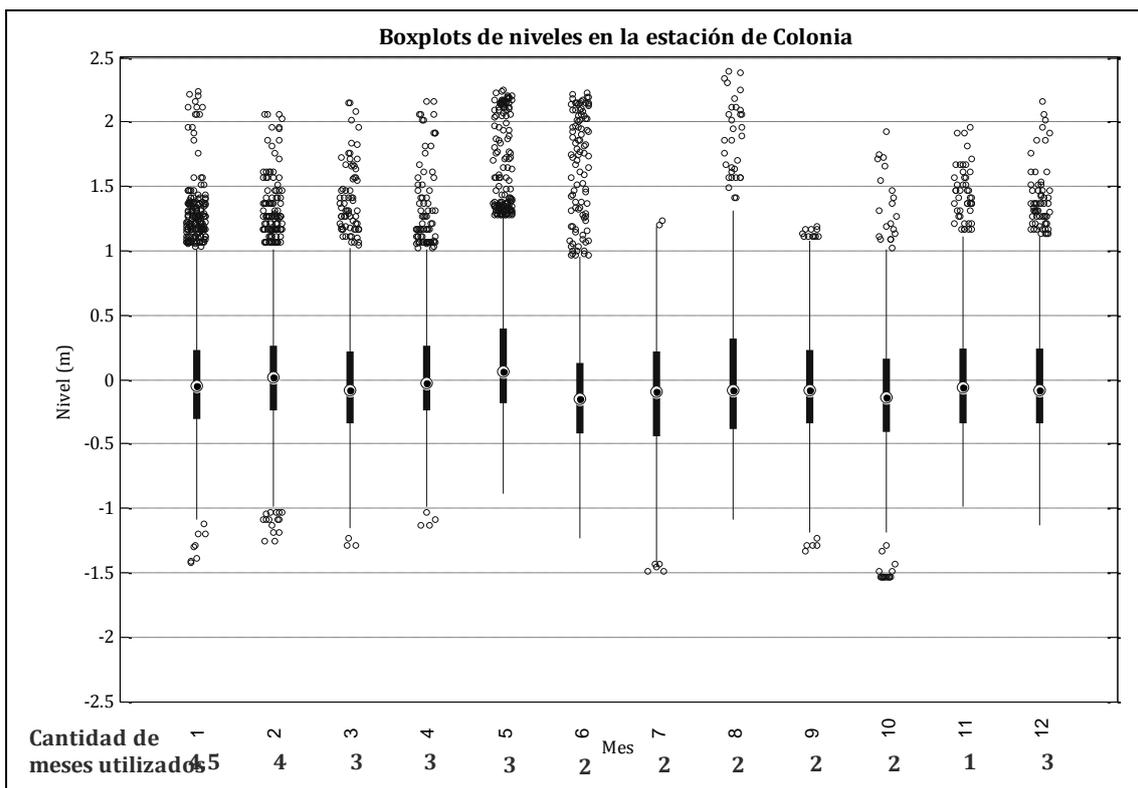


Figura 50: Boxplots de las series de niveles mensuales en la estación Colonia.

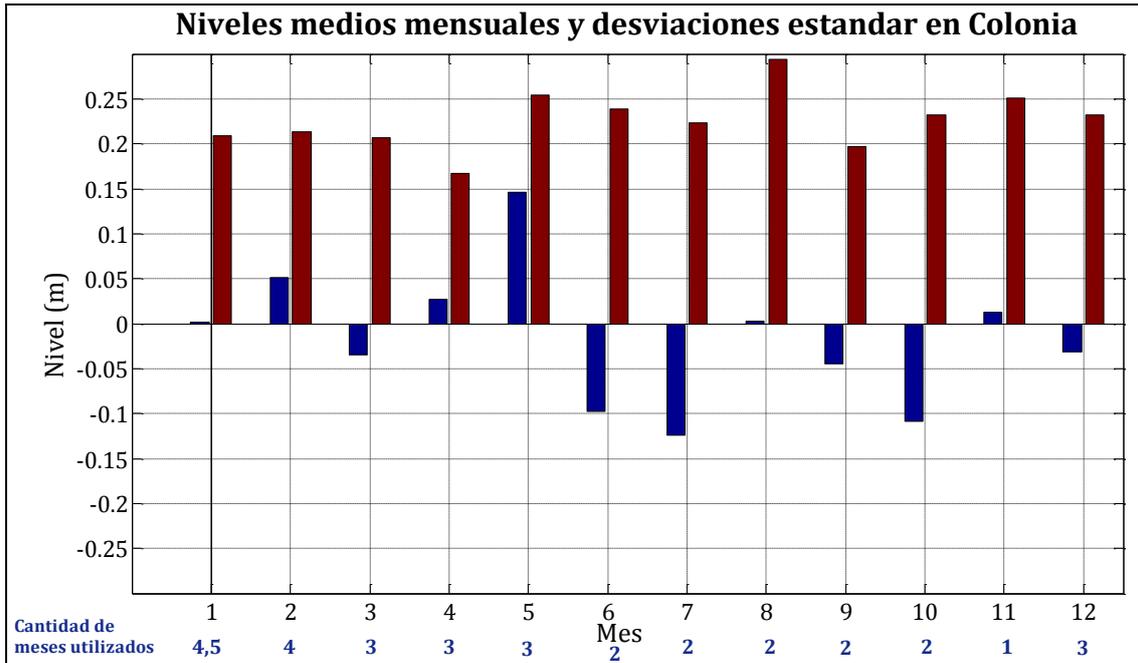


Figura 51: Gráfico de niveles medios mensuales y desviaciones estándar en la estación Colonia.

En la Figura 52 se presenta el histograma correspondiente a la totalidad de los datos disponibles. Se muestra también la curva de excedencia de la serie de niveles, la cual permite observar que el 50% del tiempo los registros no exceden los 1,05 m aproximadamente, mientras que menos de 10% de los registros superan 1,7 m.

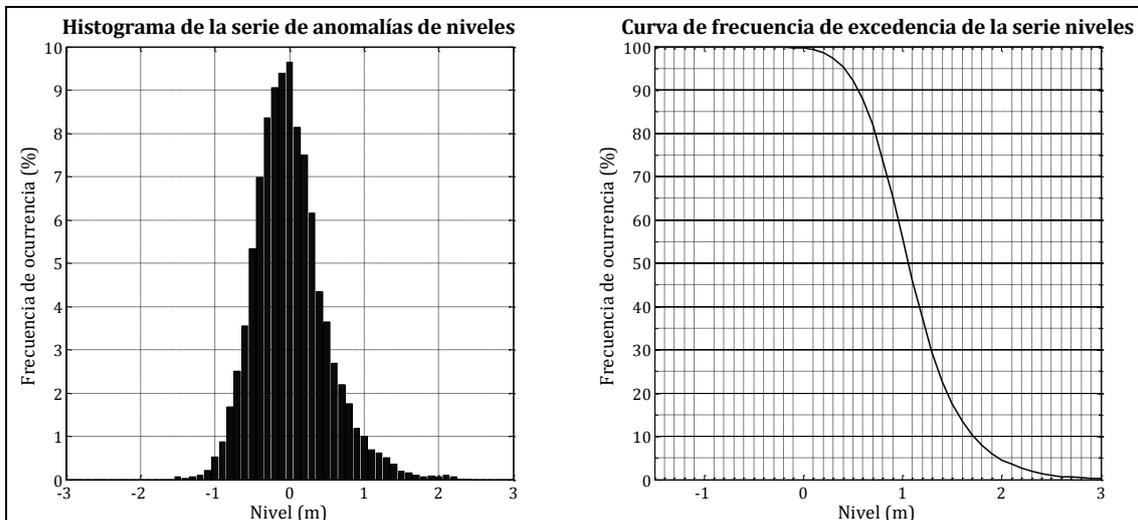


Figura 52: Histograma de la serie de anomalía de niveles (izq.) y curva de frecuencia de excedencia de niveles (derecha) en la estación de Colonia.

III.2.8.2. Análisis espectral

El espectro obtenido a partir de la serie de niveles correspondientes al año 2004 en la estación Colonia se presenta en la Figura 53. Los períodos de mayor energía se corresponden con las componentes teóricas de la marea astronómica M2 (12,42 h), O1 (25,82 h), K1 (23,93 h) y N2 (12,66 h).

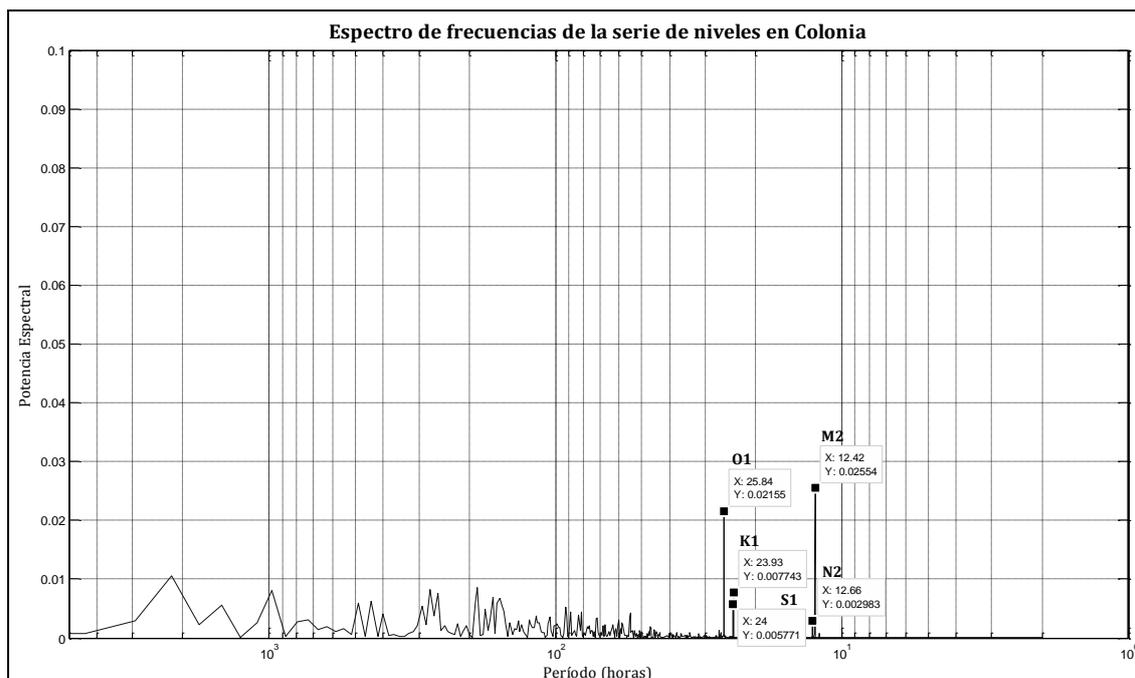


Figura 53: Espectro de la serie de niveles en la estación de Colonia.

III.2.8.3. Ajuste de las componentes astronómicas de marea

Utilizando la herramienta Ttide se ajustaron las componentes teóricas de la marea astronómica obteniendo los siguientes resultados:

Estación Colonia

Componente	Período (h)	Amplitud (m)	Amp_err (m)	Fase (°)	Fas_err (°)	SNR
M2	12,42	0,164	0,009	193,3	2,99	330
O1	25,82	0,129	0,017	218,1	7,08	58
S1	24,00	0,113	0,029	86,8	15,34	15
K1	23,93	0,082	0,017	37,7	13,63	24
N2	12,66	0,063	0,009	145,8	9,18	44
S2	12,00	0,028	0,008	292,4	16,69	11
H2	12,40	0,027	0,008	241,5	16,84	10

Tabla 18: Componentes teóricas de la marea astronómica en la estación Colonia.

Para realizar este ajuste se utilizaron al igual que en el análisis espectral los datos correspondientes al año 2004. La componente más importante es la M2 con una amplitud de aproximadamente 16 cm, seguida por la componente O1 con casi 13 cm de amplitud y luego las componentes S1 y K1 con amplitudes cercanas a 10 cm.

III-2.2.9. Estación Buenos Aires

III.2.9.1. Análisis exploratorio

El nivel medio calculado a partir de los datos disponibles es de 1,03 mWh y la varianza de 0,30 m.

Los gráficos de la serie de niveles durante todo el año 2004 y durante la primera quincena del mes de julio del mismo año se presentan en la Figura 54. Este último gráfico permite observar al igual que en las otras estaciones presentadas las variaciones semidiurnas típicas de la marea astronómicas.

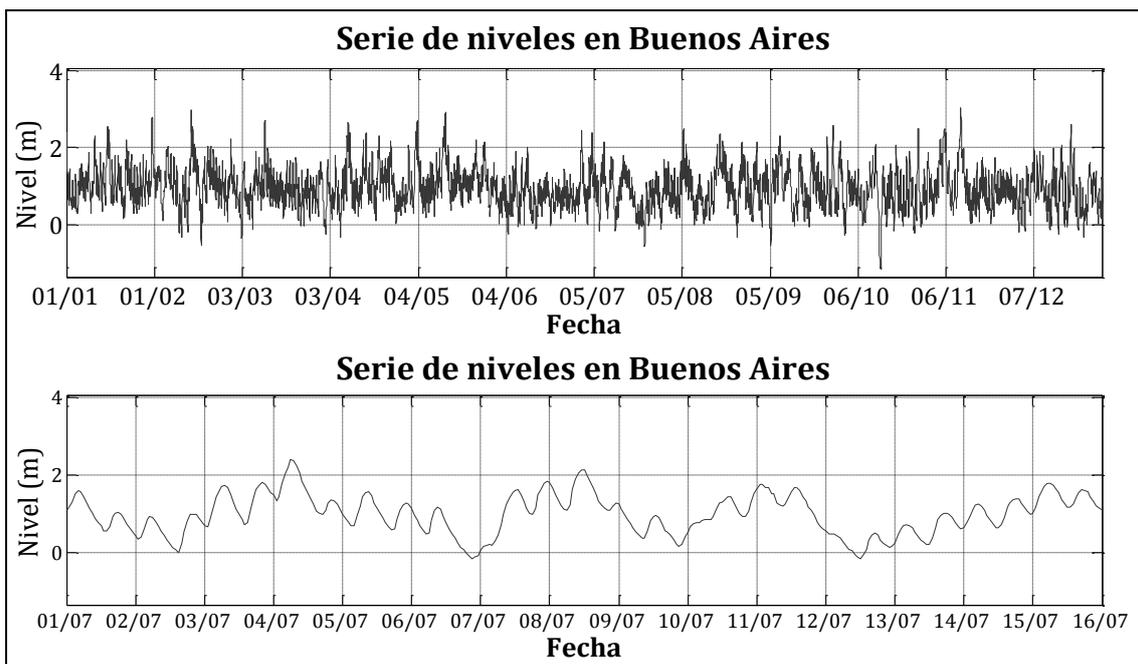


Figura 54: Serie de niveles en la estación de Buenos Aires durante el año 2004 (arriba), y durante la primera quincena de julio de 2004 (abajo).

La Figura 55 muestra un gráfico tipo boxplots con ciclo anual de la serie, y la Figura 56 los valores de nivel medio y varianza asociados a cada mes. El máximo apartamiento del nivel medio se da en el mes de junio cuyo nivel medio mensual es 13 cm inferior al total. La máxima varianza se da en el mes de agosto y es de aproximadamente 35 cm, mientras que la mínima se tiene en abril igual a 25 cm.

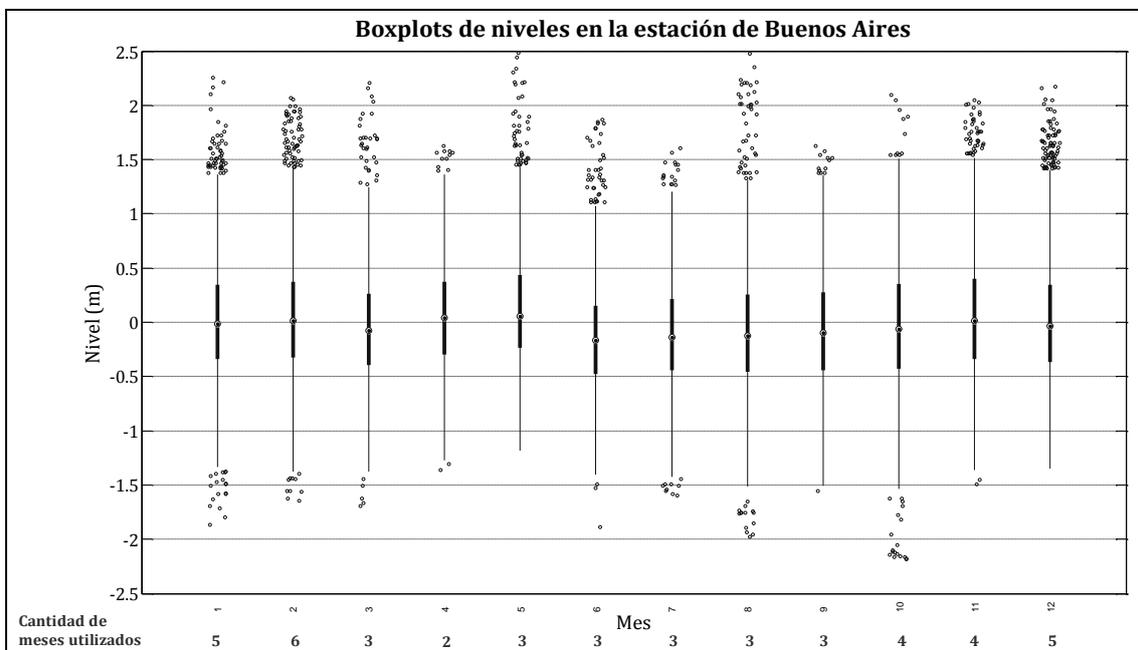


Figura 55: Boxplots de las series de niveles mensuales en la estación Buenos Aires.

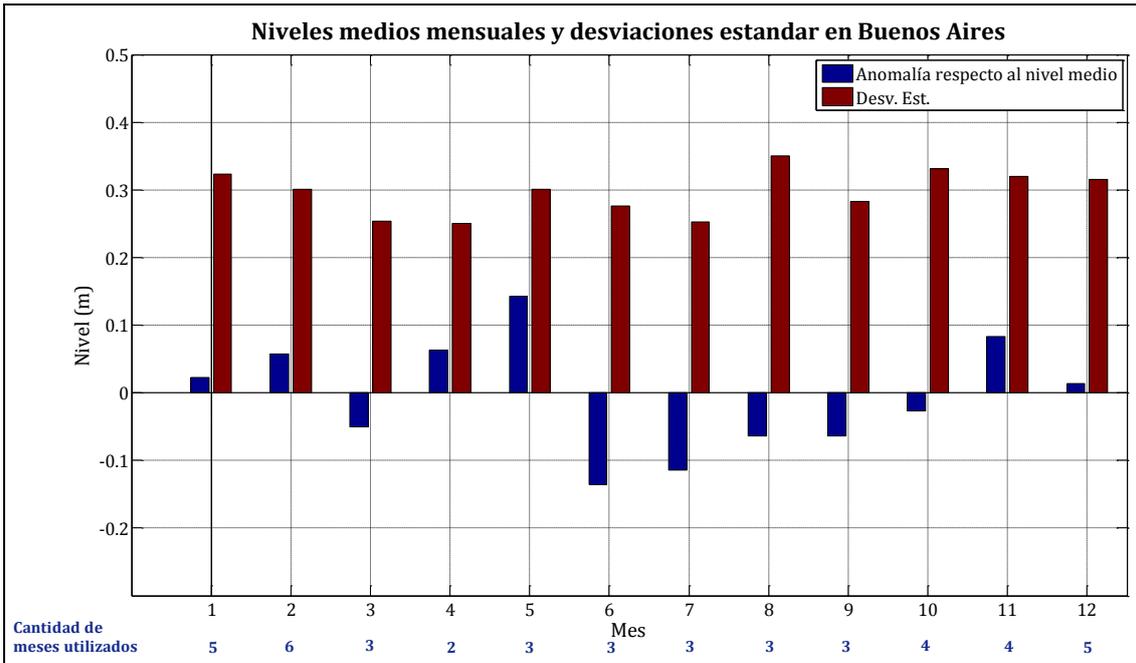


Figura 56: Gráfico de niveles medios mensuales y desviaciones estándar en la estación Buenos Aires.

En la Figura 57 se presenta el histograma correspondiente a la totalidad de los datos disponibles. Se muestra también la curva de excedencia de la serie de niveles, la cual permite observar que el 50% del tiempo los registros no exceden los 0,90 m aproximadamente, mientras que menos de 10% de los registros superan 1,65 m.

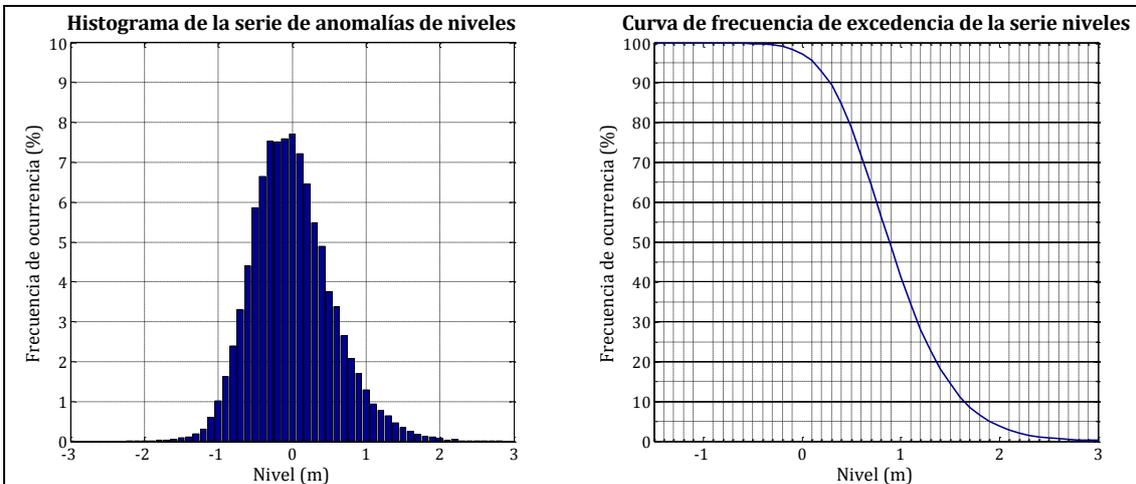


Figura 57: Histograma de la serie de anomalía de niveles (izq.) y curva de frecuencia de excedencia de niveles (derecha) en la estación de Buenos Aires.

III.2.9.2. Análisis espectral

El espectro obtenido a partir de la serie de niveles durante el año 2004 en la estación de La Paloma se presenta en la Figura 58. Los períodos de mayor energía se corresponden con las componentes teóricas de la marea astronómica M2 (12,42 h), O1 (25,82 h), N2 (12,66 h) y K1 (23,93 h).

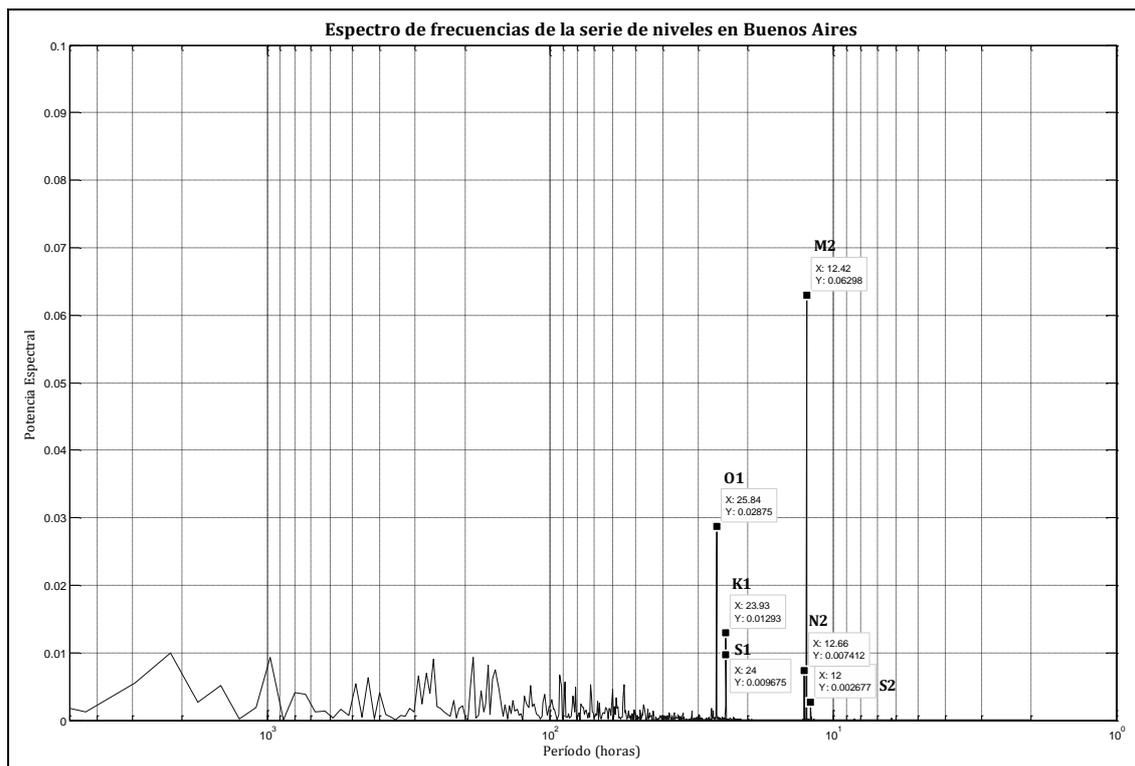


Figura 58: Espectro de la serie de niveles en la estación de Buenos Aires.

III.2.9.3. Ajuste de las componentes astronómicas de marea

Utilizando la herramienta Ttide se ajustaron las componentes teóricas de la marea astronómica obteniendo los siguientes resultados:

Estación Buenos Aires						
Componente	Período (h)	Amplitud (m)	Amp_err (m)	Fase (°)	Fas_err (°)	SNR
M2	12,42	0,275	0,011	211,7	2,3	680
O1	25,82	0,153	0,02	222,1	7,8	57
S1	24,00	0,146	0,034	76,5	14,25	18
K1	23,93	0,105	0,021	33,7	11,96	24
N2	12,66	0,096	0,012	167,5	7,37	64
S2	12,00	0,052	0,011	311,4	12,07	24
M4	6,21	0,019	0,004	358,0	11,41	18
MO3	8,39	0,0182	0,005	357,55	15	16
M4	6,21	0,0159	0,004	267,99	14,16	14
MN4	6,27	0,0143	0,004	285,63	14,93	14
M6	4,14	0,0071	0,002	35,36	14,75	17

Tabla 19: Componentes teóricas de la marea astronómica en la estación Buenos Aires.

Para realizar este ajuste se utilizaron al igual que en el análisis espectral los datos correspondientes al año 2004. La componente más importante es la M2 con una amplitud de 27,5 cm, seguida por la componente O1 con aproximadamente 15 cm de amplitud y luego las componentes S1, K1 y S2 con amplitudes 14,6 cm, 10,5 cm y 5,2 cm respectivamente.

III-2.2.10. Estación Conchillas

III2.2.10.1. Análisis exploratorio

El nivel medio calculado a partir de los datos disponibles es de 1,32 mWh y la varianza de 0,20 m.

Los gráficos de la serie de niveles durante todo el año 2004 y durante la primera quincena del mes de julio del mismo año se presentan en la Figura 59.

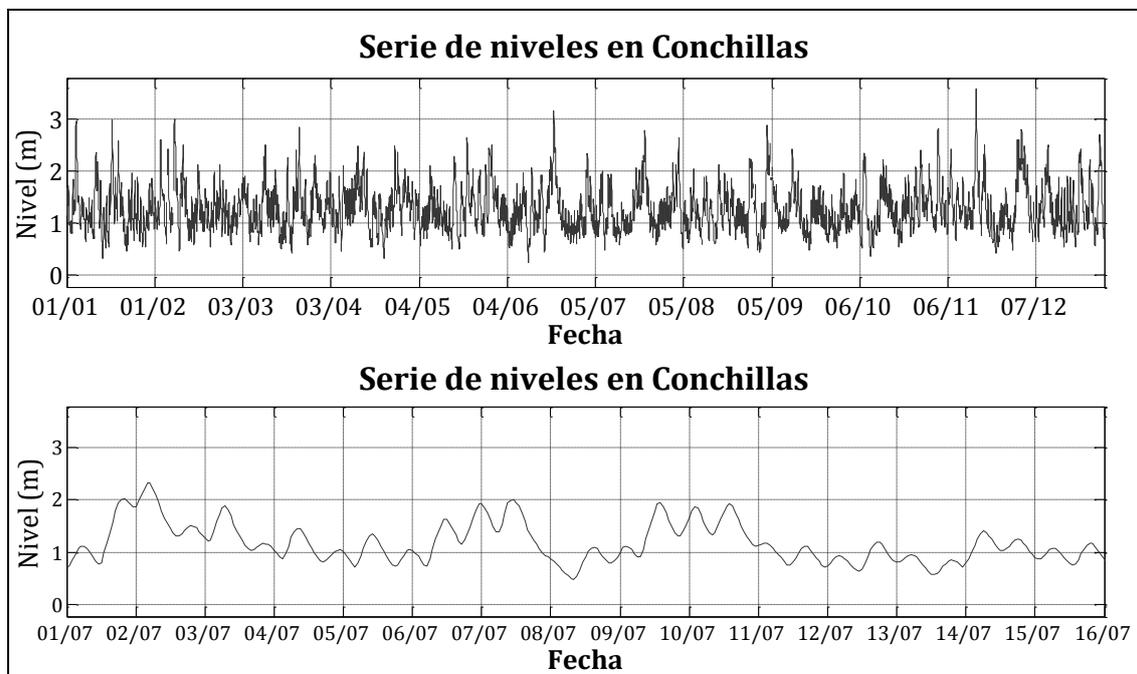


Figura 59: Serie de niveles en la estación de Conchillas durante el año 2004 (arriba), y durante la primera quincena de julio de 2004 (abajo).

La Figura 60 muestra un gráfico tipo boxplots con ciclo anual de la serie, y la Figura 61 los valores de nivel medio y varianza asociados a cada mes. El apartamiento respecto al nivel medio se da en el mes de abril cuyo nivel medio mensual es 8 cm superior al total, por otra parte en el mes de agosto se tiene un nivel medio 9 cm inferior al total. La máxima varianza se da en el mes de enero y es de aproximadamente 33 cm, mientras que la mínima se tiene en junio y es igual a 24 cm.

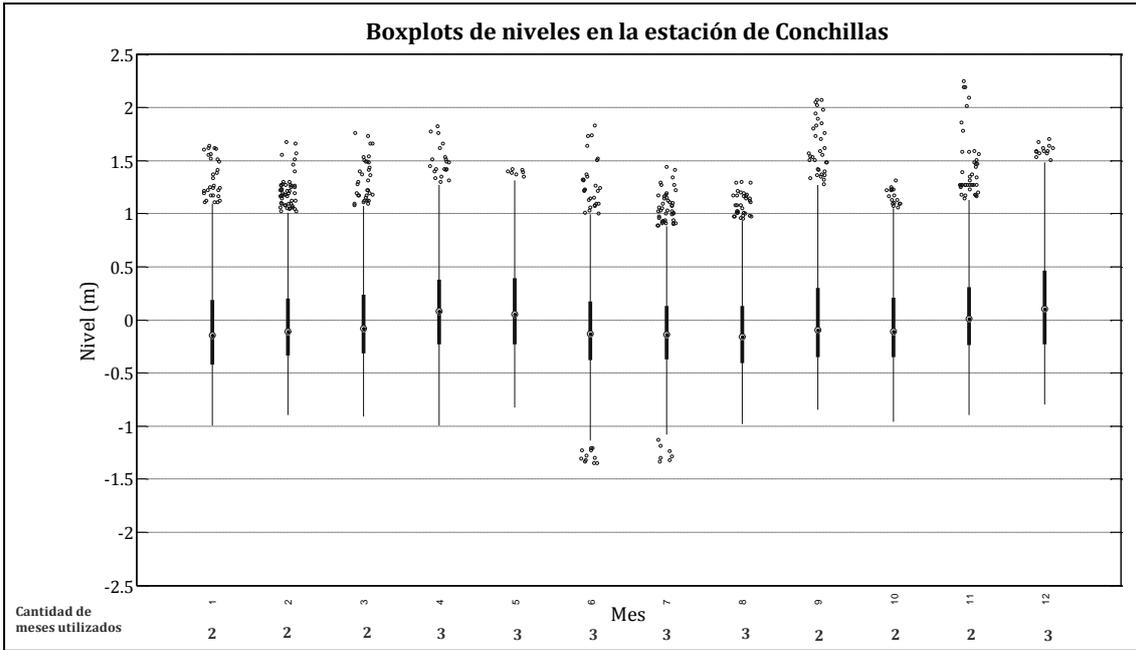


Figura 60: Boxplots de las series de niveles mensuales en la estación Conchillas.

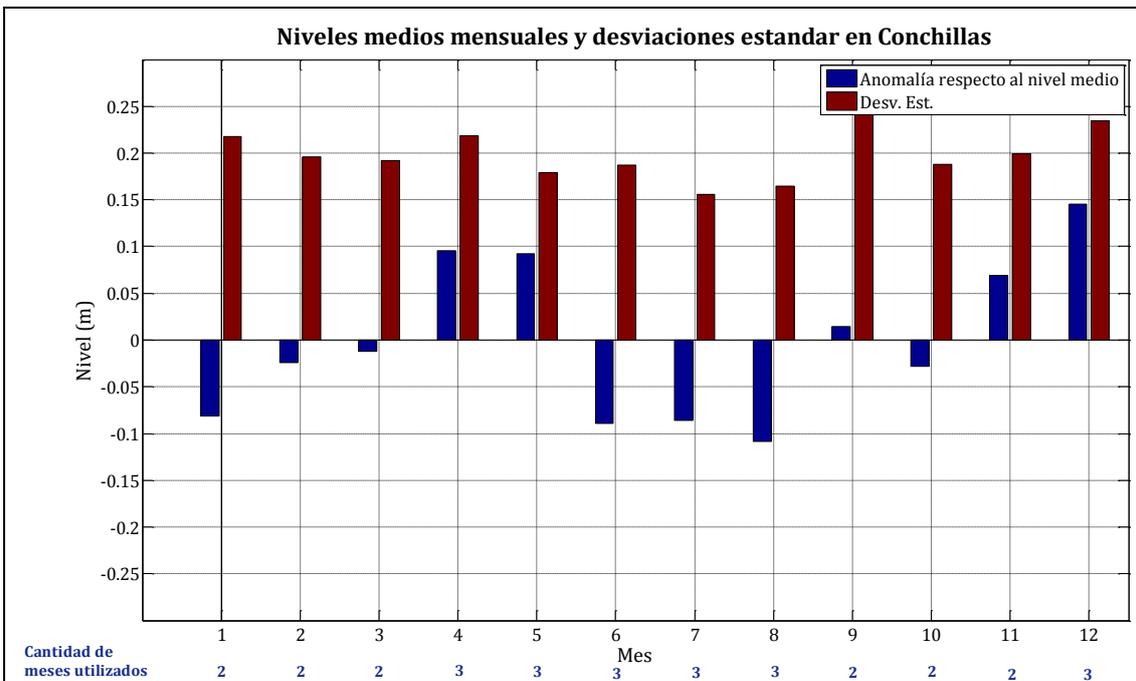


Figura 61: Gráfico de niveles medios mensuales y desviaciones estándar en la estación Conchillas.

En la Figura 62 se presenta el histograma correspondiente a la totalidad de los datos disponibles. Se muestra también la curva de excedencia de la serie de niveles, la cual permite observar que el 50% del tiempo los registros no exceden los 1,15 m aproximadamente, mientras que menos de 10% de los registros superan 1,85 m.

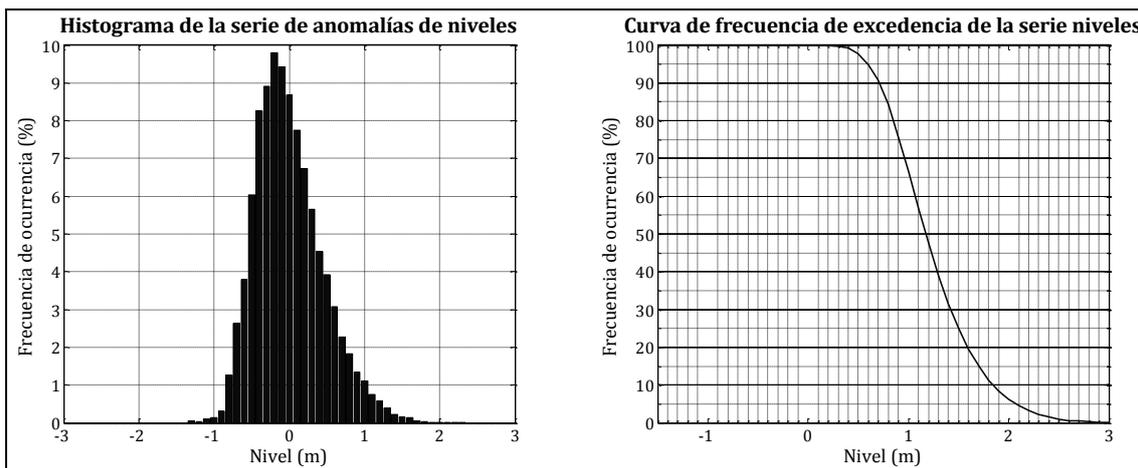


Figura 62: Histograma de la serie de anomalía de niveles (izq.) y curva de frecuencia de excedencia (derecha) en la estación de Conchillas.

III.2.10.2. Análisis espectral

El espectro obtenido a partir de los registros de niveles durante los últimos siete meses del año 2009 en la estación Conchillas se presenta en la Figura 63. Los períodos de mayor energía se corresponden con las componentes teóricas de la marea astronómica M2 (12,42 h), O1 (25,82 h), K1 (23,93 h) y N2 (12,66 h).

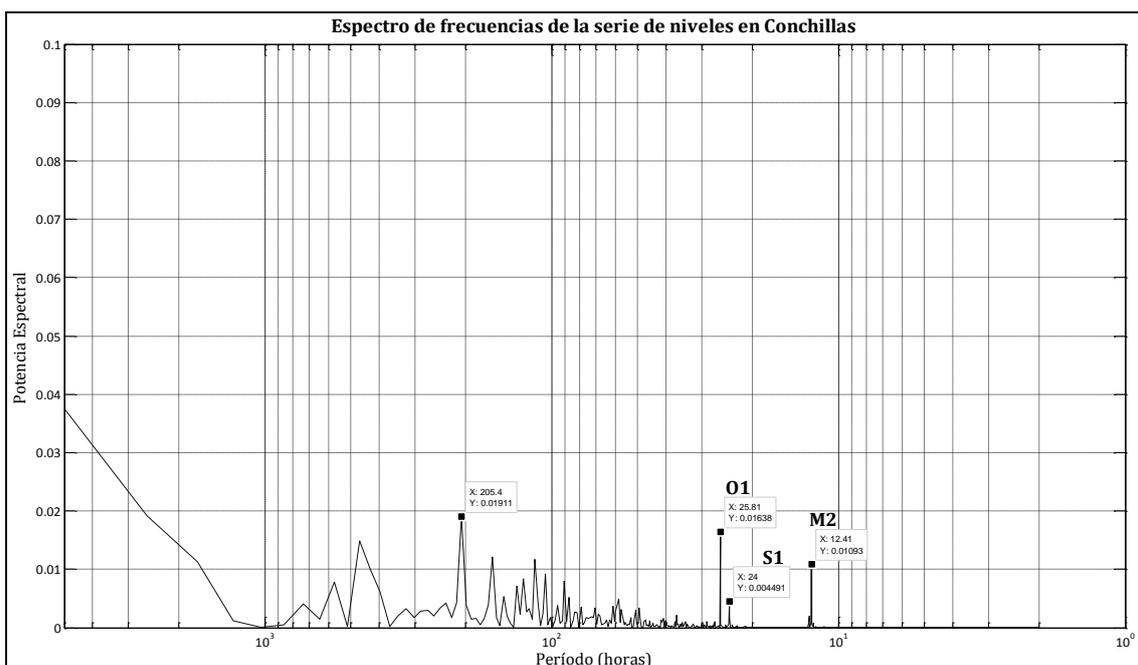


Figura 63: Espectro de la serie de niveles en la estación de Conchillas.

III.2.10.3. Ajuste de las componentes astronómicas de marea

Utilizando la herramienta Ttide se ajustaron las componentes teóricas de la marea astronómica obteniendo los siguientes resultados:

Estación Conchillas						
Componente	Período (h)	Amplitud (m)	Amp_err (m)	Fase (°)	Fas_err (°)	SNR
M2	12,42	0,163	0,012	248,0	4,62	180
O1	25,82	0,116	0,024	241,0	12,11	23
N2	12,66	0,061	0,013	207,0	10,41	22
M4	6,21	0,007	0,002	15,0	20,39	9

Tabla 20: Componentes teóricas de la marea astronómica en la estación Conchillas.

Para realizar este ajuste se utilizaron al igual que en el análisis espectral los datos del período Juno – Diciembre de 2009. La componente más importante es la M2 con una amplitud de 16,3 cm, seguida por la componente O1 con aproximadamente 11 cm de amplitud y luego las componentes N2 y M4 con amplitudes de 6,1 cm y 0,7 cm respectivamente.

III-3. Obtención de las series de niveles residuales

III-3.1. Metodología

En el punto III.2 fueron analizadas las series de niveles en cada estación con el objetivo de familiarizarse con su comportamiento y dar una caracterización básica de las mismas. Dado que el objeto de estudio de esta tesis son las oscilaciones de origen no astronómico en el Río de la Plata debe filtrarse la marea astronómica en cada una de las diez estaciones consideradas para obtener lo que se denominarán series residuales de niveles.

Tres alternativas fueron evaluadas en este trabajo, la primera de ellas consiste en determinar en cada estación las componentes teóricas de la marea astronómica y restarlas a la serie de niveles medida. Para ello se utilizaron las amplitudes y fases obtenidas en las descomposiciones armónicas de las series de niveles medidos que fueron presentadas en el punto anterior para cada estación.

La segunda alternativa considerada fue aplicar un filtro pasa bajos de 24 horas. En este caso se utilizó un filtro centrado obteniendo la serie residual de niveles a partir del promedio de los niveles registrados en las 12 horas anteriores y posteriores a cada instante. Los resultados de análisis espectral y descomposición armónica de las series de niveles presentados en el punto anterior permiten afirmar que una ventana de 24 horas es suficiente para filtrar las principales oscilaciones astronómicas.

Como última alternativa se evaluó la aplicación del filtro de Doodson, sugerido precisamente para eliminar efectos de mareas astronómicas de frecuencias diurna y mayores sobre series horarias de niveles (Pugh, 1987). Este filtro involucra en el cálculo de cada instante los valores de niveles en un entorno de 19 horas.

Una vez escogida una de estas metodologías, se evaluó la varianza de las series residuales de niveles y se realizó un análisis espectral de las mismas. La relación de las varianzas obtenidas respecto a la varianza de las series originales permite cuantificar la importancia en cada estación de los efectos no astronómicos.

III-3.2. Resultados

En la Figura 64 se muestra a modo de ejemplo la serie de niveles medida, la superposición de armónicos y la serie de niveles residuales obtenida como

diferencia de las anteriores en la estación Mar del Plata durante enero de 2008. La Figura 65 muestra estos mismos resultados para la estación Pilote Norden durante enero de 2006. Se puede ver que en el caso de la estación Mar del Plata la marea astronómica tiene un rol importante, mientras que en la estación Pilote Norden las oscilaciones no astronómicas cobran importancia.

La Figura 66 y Figura 67 muestran las series residuales de niveles obtenidas por las tres metodologías durante mayo de 2004 en Mar del Plata y Pilote Norden respectivamente. Se puede ver que los resultados son similares siendo menos ruidosas las series filtradas. El ajuste de las componentes teóricas de marea depende de la serie en cuestión, por lo cual se entiende que el método filtrado es más robusto y se optó por utilizar el filtro pasa bajos de 24 horas para obtener las series de niveles residuales en las diez estaciones en estudio.

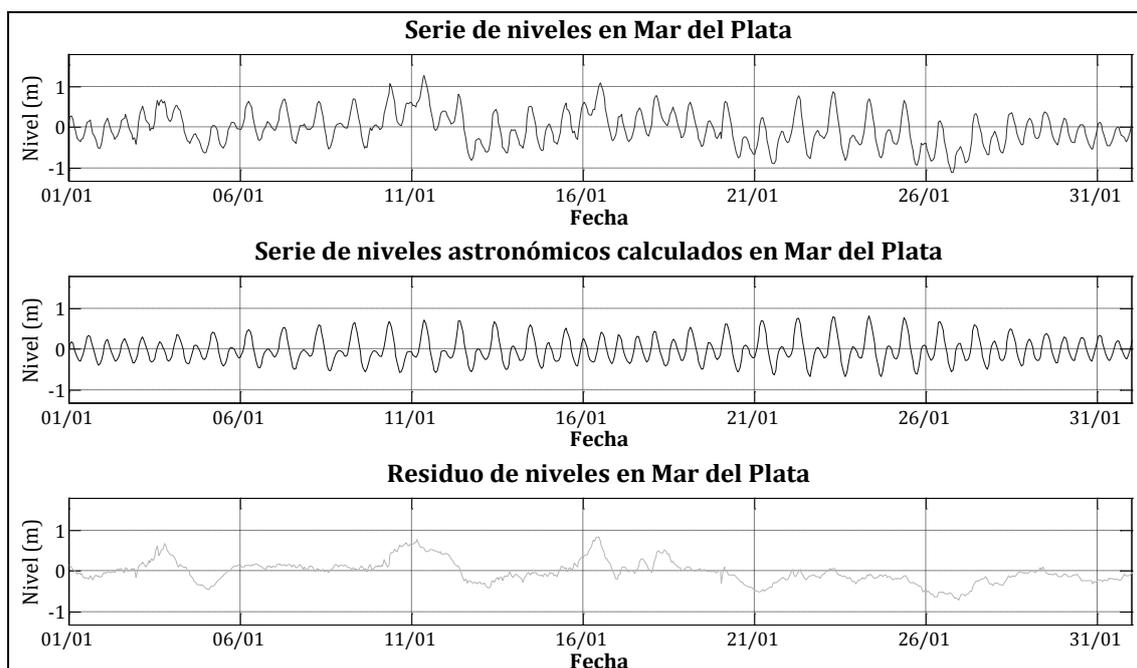


Figura 64: Serie de niveles registrados en Mar del Plata (rojo), superposición de armónicos ajustados (azul) y serie residual de niveles (verde) durante enero de 2008.

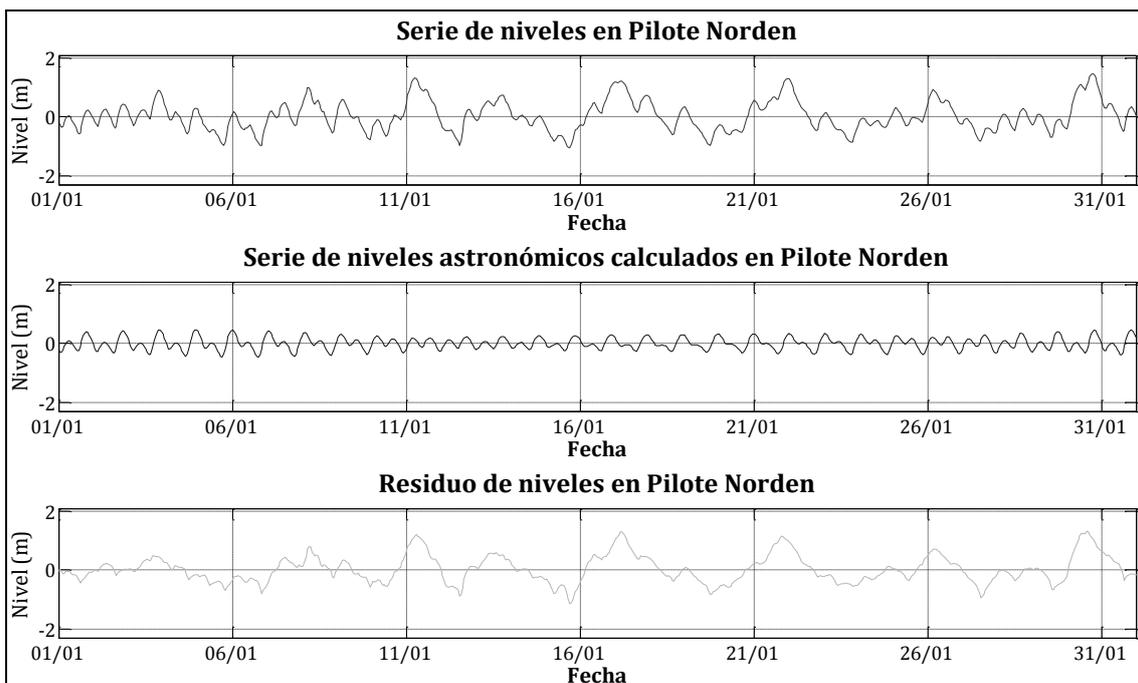


Figura 65: Serie de niveles registrados en Pilote Norden (rojo), superposición de armónicos ajustados (azul) y serie residual de niveles (verde) durante enero de 2006.

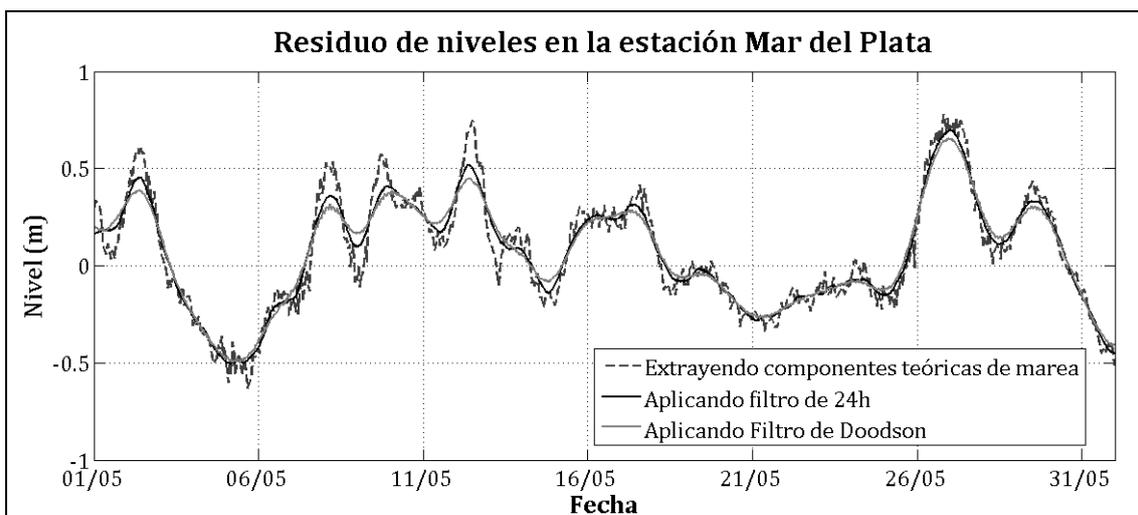


Figura 66: Series de niveles residuales en Mar del Plata durante mayo de 2004 calculadas mediante las tres metodologías propuestas.

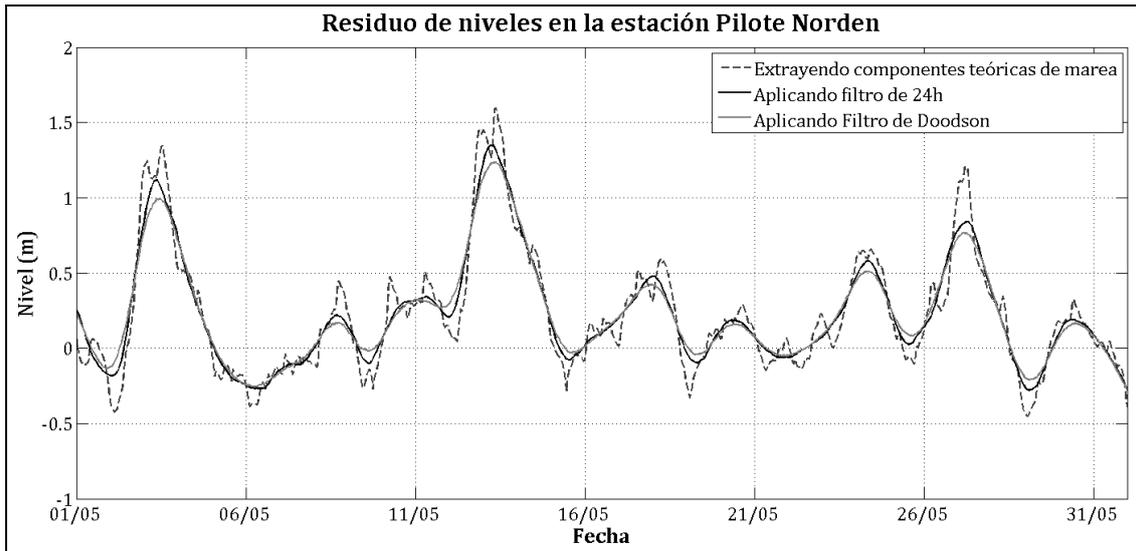


Figura 67: Series de niveles residuales en Pilote Norden durante mayo de 2004 calculadas mediante las tres metodologías propuestas.

En la Tabla 21 se presentan las varianzas correspondientes a las series de niveles observados y a las series residuales de niveles. Se puede ver que las varianzas de las series originales se incrementan al adentrarse en el Río de la Plata, a excepción del valor obtenido en Mar del Plata que supera a los de las estaciones cercanas a la frontera oceánica. Los resultados para las series residuales de niveles muestran el mismo comportamiento dentro del Río de la Plata, sin embargo, en el caso de Mar del Plata el valor obtenido es menor al del resto de las estaciones. Además la varianza de la serie residual en Mar del Plata es mucho menor que la obtenida para la serie original lo cual significa que gran parte de la varianza en la serie original se debe a oscilaciones astronómicas.

La relación entre las varianzas de las series originales y residuales muestra que las oscilaciones no astronómicas representan en general más del 50% de la varianza de la serie de niveles observados, justificando la importancia de su estudio.

Estación	Varianza (m)		
	Serie original	Serie residual de niveles	% (Var_residual / Var_orig)
Mar del Plata	0,19	0,07	36,5
La Paloma	0,12	0,09	74,1
Punta del Este	0,12	0,09	77,8
Montevideo	0,17	0,12	69,8
Torre Oyarvide	0,23	0,11	48,6
Pilote Norden	0,22	0,13	58,4
Colonia	0,22	0,13	55,8
Buenos Aires	0,29	0,14	48,8

Tabla 21: Varianza de las series originales de niveles, de las series residuales de niveles y relación entre ellas.

El análisis espectral de las series residuales muestra una concentración de energía en el rango de períodos asociados a los forzantes atmosféricos en la escala del tiempo meteorológico (períodos de 1 a 10 días, asociados a formación de tormentas, frentes, etc.). En la Figura 68 se muestra a modo de ejemplo el espectro de frecuencias calculado a partir de la serie residual de niveles en la estación Pilote Norden durante el año 2006. Este resultado da una pauta sobre las escalas de los

fenómenos a tener en cuenta en una posterior vinculación con los forzantes atmosféricos.

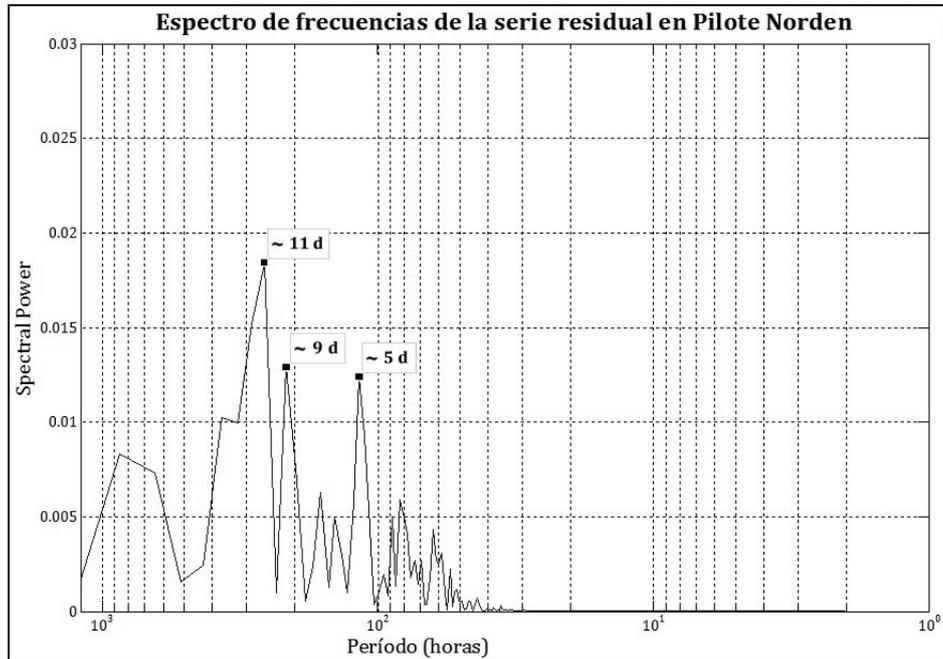


Figura 68: Espectro de la serie residual de niveles en la estación Pilote Norden.

Las series residuales de niveles aquí obtenidas, y brevemente analizadas, constituyen la base de datos sobre la cual se buscará caracterizar las oscilaciones no astronómicas y establecer su vinculación con los forzantes atmosféricos en el capítulo IV.

-- Capítulo IV --

Análisis conjunto de series de niveles residuales

IV-1.	Introducción.....	83
IV-2.	Metodología.....	83
	IV-2.1. Información disponible.....	83
	IV-2.2. Análisis de Componentes Principales.....	84
	IV-2.3. Análisis de propagación de eventos.....	85
IV-3.	Resultados.....	87
	IV-3.1. Análisis de componentes principales.....	87
	IV-3.2. Análisis de propagación de eventos.....	92

IV-1. Introducción

En el capítulo III se presentaron las series de niveles disponibles en cada estación, se realizó un análisis de las mismas para cada estación y por último se escogió una metodología para obtener las series residuales de niveles.

Este capítulo tiene por objetivo el estudio conjunto de las series residuales de niveles en todas las estaciones del Río de la Plata que han sido consideradas. Se buscó evaluar si existe un comportamiento común de las estaciones o si se encuentran oscilaciones que se observan únicamente en ciertas estaciones.

Un primer abordaje para responder a este cuestionamiento se realizó utilizando la técnica de Análisis de Componente Principales. Con esta técnica se buscó encontrar los patrones de comportamiento común de las estaciones, lo cual permite buscar una interpretación física de dicho comportamiento, así como compactar la información de todas las series.

Por otra parte, a partir de las series residuales de niveles fueron identificados eventos de nivel máximo y mínimo. Se caracterizó la evolución de cada uno de ellos en términos de su amplitud, período y velocidad de propagación. Finalmente utilizando distintas metodologías se evaluaron los tiempos de propagación de los eventos entre las distintas estaciones. Esta estimación puede resultar de utilidad en términos de un sistema de alerta en base a observaciones en tiempo real, sobre todo contando con una estación externa al Río de la Plata como Mar del Plata.

IV-2. Metodología

IV-2.1. Información disponible

A los efectos de realizar un estudio conjunto de las series residuales de niveles son de utilidad aquellos períodos en los cuales se tienen datos simultáneamente en las estaciones de interés. Debido a esta restricción se seleccionó como período de estudio el año 2004 por ser el período con la mayor cantidad de datos simultáneamente en la mayoría de las estaciones, sin embargo esto obligó a excluir de este análisis las estaciones Conchillas y San Clemente. Además, aún existen períodos sin datos en algunas estaciones durante dicho año. En la Tabla 22 se presentan los porcentajes de datos disponibles en cada estación para cada mes del año 2004. Finalmente se utilizó el 67 % del año 2004 luego de descartar aquellos períodos sin datos en alguna de las ocho estaciones.

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Mar del Plata	78,8	100	100	100	100	100	100	100	0	100	100	0
La Paloma	68	45	100	100	100	37	100	100	100	100	100	100
Punta del Este	61	79	100	100	100	100	100	100	27	100	85	100
Montevideo	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Torre Oyarvide	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Pilote Norden	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	58	96
Colonia	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Buenos Aires	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Mínimo % Datos disp.	61	45	100	100	100	37	100	100	0	100	58	0

% del año utilizable	67
----------------------	----

Tabla 22: Porcentaje de registros horarios de niveles disponibles en cada estación durante el año 2004.

IV-2.2. Análisis de Componentes Principales

Se realizó un análisis de componentes principales (ACP's) sobre las ocho series residuales de niveles. El ACP es una técnica de análisis estadístico multivariado muy utilizada en las geociencias, que permite encontrar a partir de un conjunto de datos de varias variables un número menor de variables nuevas que contienen la mayor cantidad de información posible del conjunto original sin redundancia. Puede ser usado a su vez para explorar la estructura de la variabilidad del conjunto de datos en forma objetiva y analizar las relaciones entre variables diferentes.

Esta técnica se puede entender haciendo una analogía con el bien conocido análisis de Fourier que fue utilizado en el capítulo anterior. Si se tiene una serie temporal con N registros, la misma es equivalente a su media y N-1 senos y cosenos con sus respectivas fases y amplitudes. Esto puede ser útil quizás para aislar variaciones de baja frecuencia en la señal, o por ejemplo para compactar la información. Si las altas frecuencias tienen una varianza pequeña, entonces se puede prescindir de los senos y cosenos de mayor orden y todavía representar muy bien la serie original. Trabajando con la serie en su formato original no es posible identificar que datos son prescindibles y por tanto no se puede realizar este tipo de aproximaciones. Por otro lado, es importante tener claro que no es necesario restringirse a utilizar únicamente senos y cosenos en la descomposición. De hecho ciertas series temporales, sobre todo las que presentan saltos abruptos, requieren la utilización de senos y cosenos de gran amplitud y alto orden para poder representar adecuadamente esos saltos. En su lugar se pueden obtener mejores resultados utilizando otro tipo de funciones ortogonales para caracterizar la serie. Por ejemplo lo más sencillo sería utilizar un conjunto de funciones ortogonales que presentaran saltos, permitiendo así caracterizar la serie con funciones de bajo orden. La clave es que este conjunto de funciones ortogonales puede ser determinado empíricamente a partir de la propia serie de datos a transformar.

El análisis de componentes principales permite determinar un conjunto de funciones ortogonales que caracterizan la co-variabilidad de series temporales en una grilla de puntos. Partiendo de X puntos de grilla cada uno con N valores en el tiempo, se obtienen X patrones espaciales (Empirical Orthogonal Functions - EOF's) cada uno con N valores en tiempo asociados (Principal Components - PC's). La técnica no se restringe a series temporales en distintos puntos del espacio sino que puede aplicarse a cualquier conjunto de datos.

Para encontrar los EOF's y PC's se puede pensar que se busca construir una serie temporal (PC) que produzca un mapa de regresión/correlación con las mayores amplitudes posibles. Ese mapa de regresión y su serie temporal constituyen el primer EOF, luego si se quita de los datos la variabilidad asociada al primer EOF y nuevamente se construye una serie temporal que produzca un mapa de regresión/correlación con las mayores amplitudes posibles obteniendo el segundo EOF, y así sucesivamente. Esta idea se traduce matemáticamente en hallar los autovectores y autovalores de la matriz de covarianza. Los autovectores son estructuras espaciales ortogonales (EOF's), los PC's correspondientes se obtienen proyectando la matriz original de datos sobre cada EOF obteniendo así series temporales ortogonales entre sí que muestran como ha variado cada estructura espacial en el tiempo. Por último los autovalores son proporcionales a la cantidad de varianza "explicada" por cada EOF-PC. Es así que los primeros EOF's (aquellos

que explican el mayor porcentaje de varianza) son los patrones espaciales de mayor amplitud y a través de su correspondiente PC se conoce cuan “fuerte” es su presencia en cada instante.

Muchas veces el ACP se realiza sobre la matriz de correlación en lugar de la de covarianza. Los PC's - EOF's obtenidos son diferentes a los obtenidos usando la matriz de covarianza. La elección de una u otra matriz depende de cómo se quiera pesar las diferentes variables, la matriz de covarianza da más peso a aquellas variables que tienen mayor varianza, mientras que en la matriz de correlación todas las variables tienen igual peso y solo la estructura importa.

Luego al igual que en caso del análisis de Fourier, es posible seleccionar una cantidad menor EOF's - PC's tal que la series reconstruidas sean una buena aproximación de las series originales. Existen varias formas para seleccionar que número EOF 's - PC 's retener, la más sencilla es quizás elegir aquellos que en su conjunto representen un cierto porcentaje de la varianza total (por ejemplo el 70%). Pero existen otros métodos algunos gráficos, otros como la Regla de North, etc. Buenas descripciones a cerca de la técnica de ACP, los criterios de selección y su interpretación se pueden encontrar en Wilks D. S. (2006) y Mitchum G. T. (1993).

En este trabajo se aplicó el ACP sobre las ocho series residuales de niveles, obteniendo así ocho “campos espaciales” (EOF's) con sus respectivas series temporales asociadas (PC's). La técnica se aplicó tanto utilizando la matriz de covarianza como la de correlación y los resultados fueron comparados. A los efectos de seleccionar las componentes principales de mayor relevancia, se puede decir que se utilizó la regla más simple eligiendo aquellas que sumaron un elevado porcentaje de la varianza original. De esta forma es posible sintetizar la información de las ocho series, y a partir del estudio de los EOF's asociados a las mismas extraer conclusiones acerca de la relación entre las amplitudes de las oscilaciones de las distintas estaciones.

IV-2.3. Análisis de propagación de eventos

El objetivo de este análisis es caracterizar cada onda de crecida en términos de su amplitud, período y velocidad de propagación. Un punto no menor es cómo definir un “evento”; en la Figura 69 se muestran a modo de ejemplo las ocho series residuales de niveles durante el mes de julio de 2004. Durante la primera quincena es posible identificar claramente cuatro ondas de tormentas dadas por mínimos y máximos consecutivos; cada una de ellas es considerada un “evento”. Durante la segunda quincena los eventos definidos con ese criterio no son tan claros pero de igual forma pueden ser definidos. Las líneas rojas muestran los eventos seleccionados.

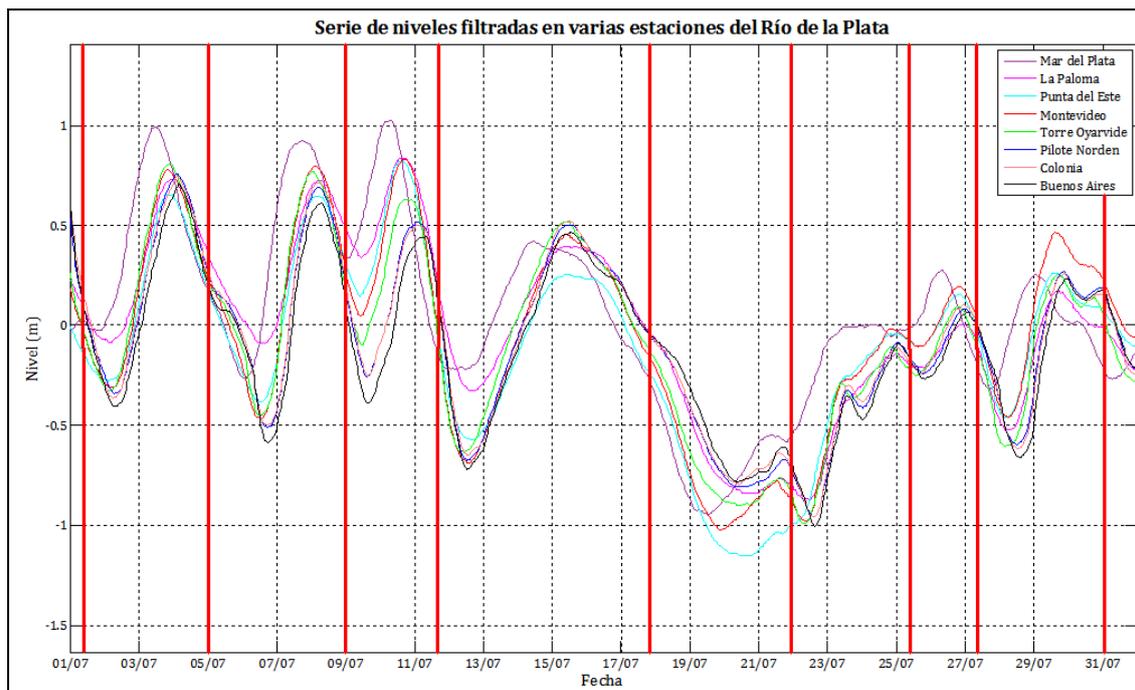


Figura 69: Series de residuales de niveles en las ocho estaciones consideradas durante la primera quincena de julio de 2004.

Para cada uno de estos eventos fueron identificados los instantes en que se presentan el nivel máximo y mínimo, y los valores de nivel alcanzados en dichos instantes. A partir de esta información es posible calcular para cada estación un período asociado al evento como el doble de la diferencia entre el instante en que se da el nivel máximo y el instante en que se da el nivel mínimo, así como también una amplitud a partir de la diferencia entre dichos niveles. Sin embargo, no debe pasarse por alto que para muchos eventos la definición del instante en que se da el nivel mínimo o máximo se torna sumamente imprecisa. A modo de ejemplo si se observa en la Figura 69 el evento con niveles mínimos entre el 19 y 21 de julio, se puede ver que en la estación Punta del Este se da un período prolongado con niveles muy cercanos al mínimo haciendo que el error en la determinación del instante en que tiene lugar dicho nivel pueda ser de varias horas.

Por otra parte es posible evaluar el tiempo de viaje de cada evento entre estaciones, y a partir de la distancia entre las mismas evaluar una velocidad de propagación. Se realizaron gráficos tipo nube de puntos ("scatter plots") de las velocidades de propagación obtenidas en función de la amplitud de los eventos y sus períodos con el fin de evaluar si existe alguna relación entre los mismos. Las observaciones realizadas en el párrafo anterior sobre la magnitud del error que puede haber en la determinación de los instantes de niveles máximos y mínimos tienen una incidencia directa sobre el cálculo de los tiempos de viaje.

Otra forma en la que se estimó el tiempo medio de viaje de las perturbaciones entre cada estación fue calculando la correlación de las series entre sí para distintos "lag's" temporales. Esta es una metodología que en cierta forma tiene más generalidad en el sentido de que no solo tiene en cuenta los instantes de nivel máximo y mínimo.

IV-3. Resultados

IV-3.1. Análisis de componentes principales

Al realizar el análisis de componentes principales sobre las ocho series de niveles residuales en el período común con datos disponibles se obtuvieron los EOF's que se muestran en la Tabla 23 junto con su respectivo porcentaje de varianza total explicada por cada uno. Se observa que la primera componente principal explica más de un 80% del total de la varianza, por lo que por sí solo puede ser considerada como una buena síntesis de las series residuales en su conjunto. Le sigue una segunda componente que explica aproximadamente un 12% de la varianza; entre ambas componentes explican más de un 93% de la varianza.

Estación	EOF 1	EOF 2	EOF 3	EOF 4	EOF 5	EOF 6	EOF 7	EOF 8
Mar del Plata	0,19	-0,59	0,62	-0,48	0,10	-0,01	-0,02	-0,02
La Paloma	0,30	-0,29	-0,69	-0,32	0,44	-0,23	0,02	-0,03
Punta del Este	0,32	-0,36	-0,27	0,12	-0,43	0,70	0,07	0,01
Montevideo	0,38	-0,23	0,00	0,37	-0,46	-0,61	-0,27	-0,11
Torre Oyarvide	0,38	-0,06	0,23	0,63	0,61	0,15	0,08	0,01
Pilote Norden	0,40	0,29	0,06	-0,17	-0,06	-0,02	-0,10	0,84
Colonia	0,40	0,31	0,10	-0,15	-0,16	-0,14	0,78	-0,26
Buenos Aires	0,41	0,45	0,07	-0,25	0,05	0,22	-0,54	-0,46
% de varianza explicado	82,8	11,5	2,2	1,6	1,3	0,5	0,14	0,03

Tabla 23: EOF's obtenidos del ACP sobre las series residuales de niveles (utilizando la matriz de covarianzas para su cálculo).

A partir de los resultados que se muestran en la Tabla 23 pueden ser extraídas algunas conclusiones preliminares. Es conveniente recordar que los coeficientes de cada EOF que allí se muestran son a veces denominados "cargas", pues para reconstruir las series se multiplica el PC correspondiente por el coeficiente asociado a cada estación. De esta forma para este análisis se puede pensar que estos coeficientes dan información acerca de la amplitud de las oscilaciones en cada estación. El primer EOF es de suma importancia pues por sí solo ya es una buena aproximación de las series residuales. Se observa que sus coeficientes presentan un mismo signo indicando que todas las estaciones se comportan de igual forma, esto es, cuando se incrementan el nivel en una de ellas lo mismo sucede en el resto. Por otra parte las magnitudes de los coeficientes aumentan desde las estaciones exteriores hacia las interiores, mostrando así un incremento de la amplitud de las ondas al adentrarse en el Río de la Plata.

En la Figura 70 se muestran las series residuales de niveles y la serie reconstruida a partir de la primera componente principal (azul) para las ocho estaciones. También se muestra el aporte a la reconstrucción que haría la segunda componente principal (verde) No se ha ploteado la suma de ambas (verde y azul) la cual corresponde a la reconstrucción considerando ambas componentes pues prácticamente coincide con las series residuales (téngase en cuenta que ambas juntas explican más del 93% de la varianza total). Como ya fue visto las series residuales en las ocho estaciones muestran claramente una misma "señal", la cual en cada estación se ve modificada por un desfase en el tiempo y un cambio en su amplitud. En la figura se puede apreciar como la primera componente captura perfectamente bien ese comportamiento común de todas las estaciones, a menos

de ciertas diferencias en las amplitudes. Si se considera únicamente la primera componente principal para la reconstrucción de las series se estará multiplicando una misma serie temporal (el primer PC) por el coeficiente del EOF que corresponda en cada estación lo cual ajustará la amplitud de esa señal, perdiendo por completo el desfase temporal entre las series. Ese desfase temporal y un ajuste final de las amplitudes son recogidos en la segunda componente principal. Sin embargo eso no se manifiesta de forma clara en los coeficientes del segundo EOF que se muestran en la Tabla 23, pues los mismos no presentan un ordenamiento tanto en signos como en magnitud como que se espera para generar el desfase en la señales.

En parte esto se puede deber a que los resultados hasta aquí presentados fueron obtenidos realizando el análisis de componentes principales sobre la matriz de covarianza. Esto tiene como consecuencia que las estaciones que presentan mayores amplitudes tengan más peso en el análisis. Una muestra clara de esto es la estación Mar del Plata, la cual presenta las menores amplitudes (ver Tabla 21) y por esa razón la reconstrucción a partir de la primera componente principal es la menos acertada.

La forma de lidiar con esto es realizar el análisis de componentes principales sobre la matriz de correlaciones, de esta forma todas las variables tienen igual peso. Los EOF's resultantes de este análisis se presentan en la Tabla 24, donde nuevamente se destacan las dos primeras componentes principales explicando cada una un 80% y un 13% de la varianza total respectivamente.

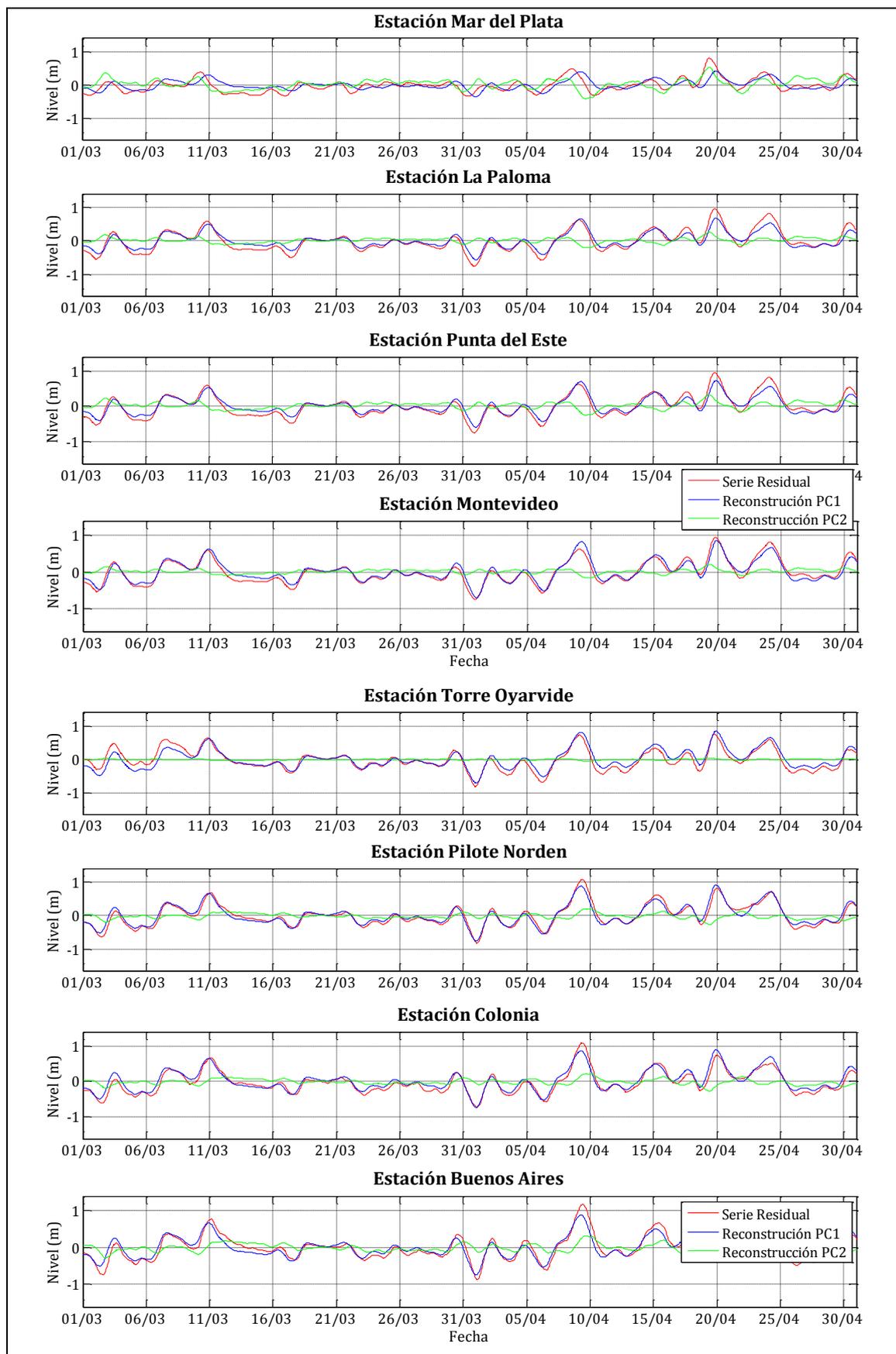


Figura 70: Series residuales de niveles y reconstrucciones a partir de la primera componente principal y de la segunda componente principal. Período marzo - abril de 2004.

Estación	EOF 1	EOF 2	EOF 3	EOF 4	EOF 5	EOF 6	EOF 7	EOF 8
Mar del Plata	0,26	-0,68	0,60	-0,34	0,00	0,00	-0,02	0,02
La Paloma	0,35	-0,22	-0,68	-0,49	0,30	0,18	0,02	0,03
Punta del Este	0,36	-0,28	-0,30	0,30	-0,45	-0,63	0,05	-0,01
Montevideo	0,38	-0,12	-0,04	0,47	-0,28	0,69	-0,24	0,11
Torre Oyarvide	0,37	0,02	0,14	0,47	0,77	-0,18	0,07	-0,01
Pilote Norden	0,37	0,32	0,13	-0,17	-0,11	0,01	-0,13	-0,83
Colonia	0,37	0,33	0,16	-0,13	-0,18	0,12	0,78	0,24
Buenos Aires	0,35	0,43	0,16	-0,27	-0,04	-0,21	-0,56	0,49
% de varianza explicado	80,3	13,0	3,0	1,7	1,3	0,5	0,12	0,03

Tabla 24: EOF's obtenidos del ACP sobre las series residuales de niveles (utilizando la matriz de correlaciones para su cálculo).

Al realizar el análisis de esta forma se puede ver que las interpretaciones cambian, pues ahora el primer EOF presenta coeficientes similares para todas las estaciones. Se observa que ahora sí la segunda componente principal muestra una variación en los coeficientes de su EOF que es razonable a los efectos de corregir las amplitudes y generar el desfase correspondiente entre las distintas estaciones. En la Figura 71 se muestran gráficos análogos a los presentados en la Figura 70 a partir de los resultados del ACP sobre la matriz de correlación. Se puede ver que efectivamente la reconstrucción a partir de la primera componente principal (línea azul) es muy similar en todas las estaciones (salvo Mar del Plata que presenta una amplitud levemente menor). Por otra parte la segunda componente principal presenta coeficientes negativos para las primeras cuatro estaciones y su magnitud decrece desde las estaciones exteriores a las interiores. Como se ve en los gráficos el efecto que esto tiene es retrasar en el tiempo la señal de la primera componente principal y ajustar su amplitud sobre todo en las estaciones exteriores. En la estación Torre Oyarvide la segunda componente es prácticamente nula, observándose una muy buena representación únicamente con la primera componente principal. Por último, para las cuatro estaciones más interiores los coeficientes tienen signo positivo y magnitud creciente cuanto más se ubican hacia la zona interior del río. Al contrario que en las estaciones exteriores, esto genera que la señal dada por la primera componente principal se desfase hacia delante en el tiempo y su amplitud se amplifique cada vez más hacia el interior del estuario. Esto último también se puede visualizar claramente en la Figura 71.

Todos estos resultados han mostrado la capacidad de compactar la información únicamente en las dos primeras componentes principales. Además el análisis de los EOF's correspondientes a dichas componentes permitió extraer conclusiones acerca de la evolución de las ondas en la medida que se internan en el río. Se pusieron de manifiesto las diferencias obtenidas al realizar en ACP sobre la matriz de covarianza y de correlación, extrayendo conclusiones para cada una de las metodologías acerca del rol e interpretación que tiene cada componente principal en la reconstrucción de las series.

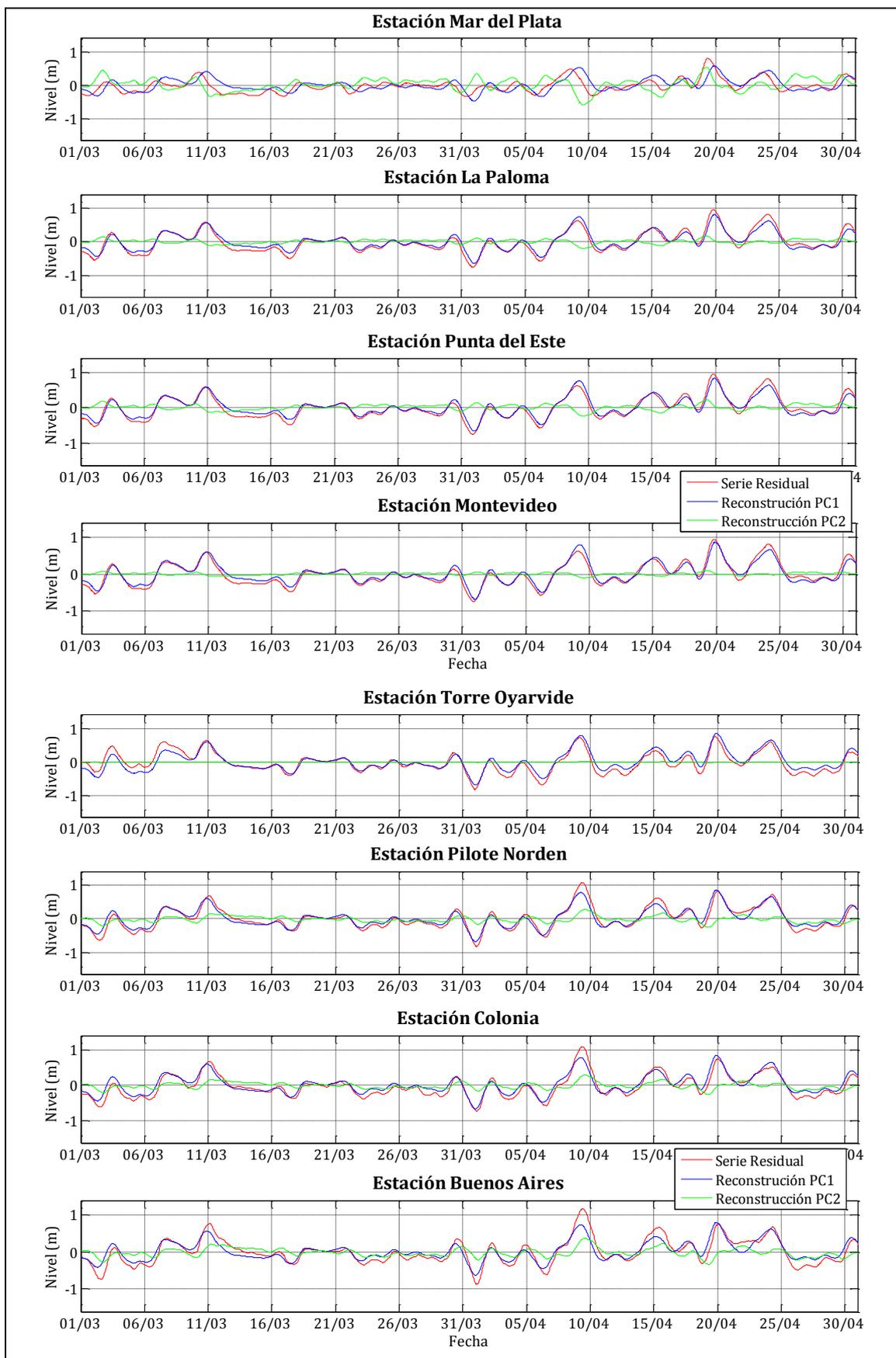


Figura 71: Series residuales de niveles y reconstrucciones a partir de la primera componente principal y de la segunda componente principal. Período marzo - abril de 2004.

IV-3.2. Análisis de propagación de eventos

Utilizando la metodología descrita anteriormente fueron identificados sesenta y tres eventos, los cuales se muestran en las figuras incluidas en el Anexo X-2. Algunos de esos eventos fueron descartados por no estar claros los tiempos en que ocurre el nivel máximo o mínimo, y finalmente se consideraron cincuenta y cuatro eventos. Tal como se mencionó en la metodología fueron calculados en cada estación y para cada evento la amplitud (Amp.), el período (T), el tiempo transcurrido desde que el nivel mínimo del evento es registrado en Mar del Plata (T_m) y el tiempo transcurrido desde que el nivel máximo del evento es registrado en Mar del Plata (T_M). En la Tabla 25 se resumen los valores promedio, la desviación estándar y los valores máximos y mínimos de los distintos parámetros mencionados anteriormente.

		Promedio	Desv. Est.	Max	Min
Mar del Plata	Amp	0,42	0,26	1,19	0,06
	T	36	15	75	13
La Paloma	Amp	0,39	0,25	0,86	0,005
	T	35	14	66	3
	T_m	14	6	30	2
	T_M	13	5	37	3
Punta del Este	Amp	0,45	0,29	1,03	0,003
	T	34	15	73	2
	T_m	12	5	27	4
	T_M	11	5	34	-2
Montevideo	Amp	0,55	0,35	1,26	0,01
	T	35	14	70	13
	T_m	13	6	31	3
	T_M	12	6	33	2
Torre Oyarvide	Amp	0,60	0,35	1,42	0,11
	T	34	15	73	13
	T_m	12	6	32	5
	T_M	11	5	28	3
Pilote Norden	Amp	0,64	0,40	1,62	0,10
	T	34	13	71	14
	T_m	17	7	38	3
	T_M	16	5	33	7
Colonia	Amp	0,64	0,40	1,67	0,11
	T	34	14	72	13
	T_m	17	7	37	6
	T_M	16	6	33	3
Buenos Aires	Amp	0,68	0,44	1,80	0,09
	T	34	14	72	12
	T_m	18	7	38	-2
	T_M	17	5	28	8

Tabla 25: Resultados de amplitud (m), período (h), tiempo de viaje del máximo y tiempo de viaje del mínimo (h), valores promedios, desviación estándar, máximo y mínimo de todos los eventos.

En estos resultados se observa nuevamente como la amplitud de los eventos se amplifica en la medida que la onda se interna en el río, presentando amplitudes de 42 cm, 55 cm y finalmente 68 cm en Mar del Plata, Montevideo y Buenos Aires respectivamente. Naturalmente la varianza en la amplitud de estos eventos es importante. Por otra parte el período promedio es similar en todas las estaciones y es de aproximadamente 35 horas, sin embargo nuevamente la varianza que

presenta en cada estación es aproximadamente la mitad del valor promedio. En la Figura 72 y la Figura 73 se muestran las distribuciones empíricas de la amplitud y período de los eventos. Se puede ver como a partir de una distribución concentrada en amplitudes bajas en Mar del Plata, a medida que las estaciones son más interiores al río su distribución tiende a ser más uniforme y distribuida hacia valores cada vez más altos.

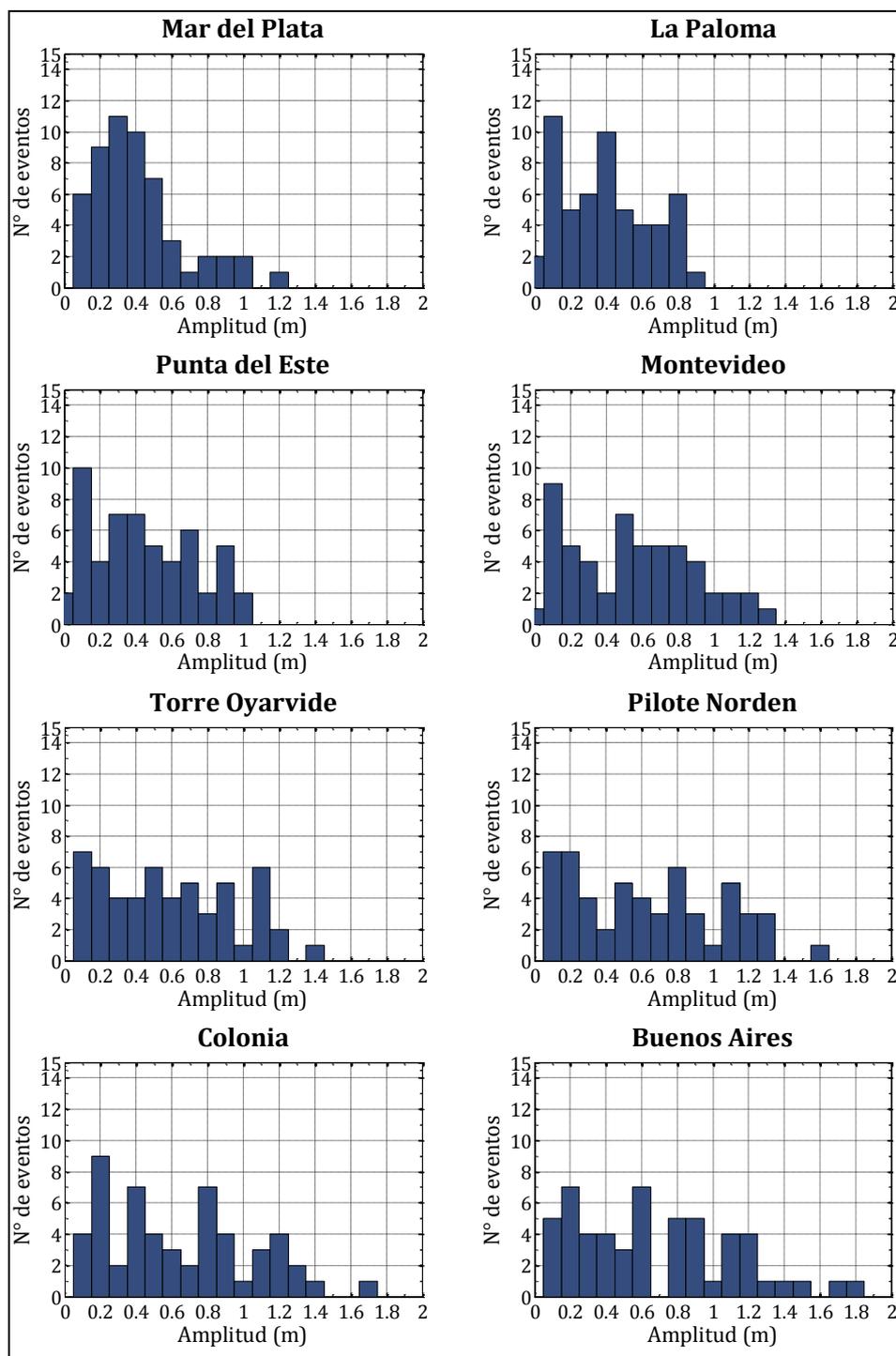


Figura 72: Distribución empírica de la amplitud de los eventos en cada una de las estaciones consideradas.

Los períodos muestran una distribución tipo campana entorno al valor medio apreciándose una leve asimetría hacia los valores más altos. No se aprecian cambios significativos entres las distintas estaciones.

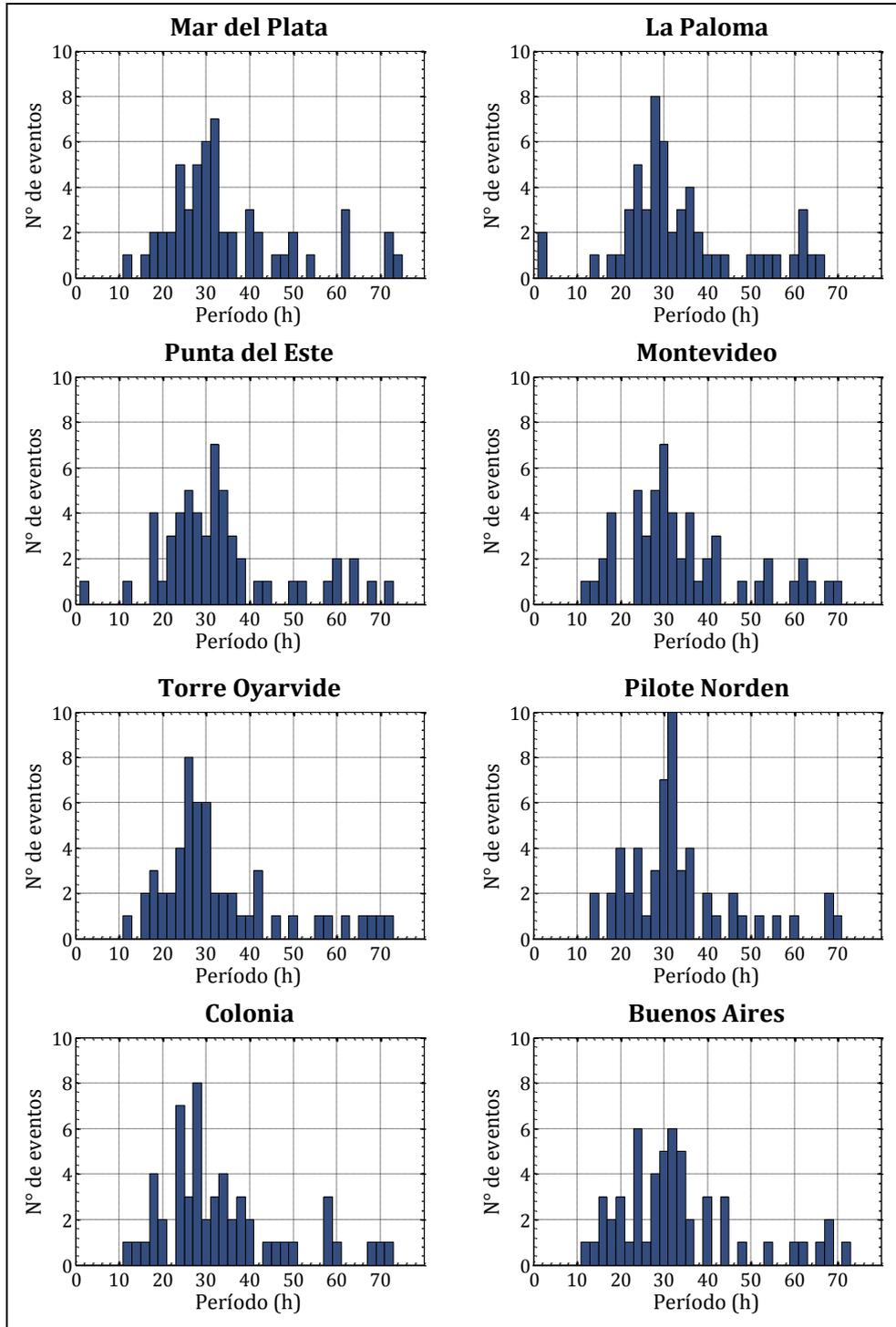


Figura 73: Distribución empírica del período de los eventos en cada una de las estaciones consideradas.

En lo que respecta a los tiempos de viaje de los eventos, en la Tabla 25 se puede apreciar una pequeña diferencia en el tiempo en que el nivel máximo de un evento tarda en recorrer el río frente al que tarda el nivel mínimo, siendo el primero aproximadamente una hora menor en todos los casos. Sin embargo esta diferencia

es pequeña, sobre todo teniendo en cuenta las grandes desviaciones que presenta esta variable y las ya mencionadas imprecisiones en su determinación. En la Tabla 25 se puede ver que el tiempo de viaje medio entre las estaciones Mar del Plata y Buenos Aires es de 17 horas. Por otra parte, el tiempo de viaje de Pilote Norden y Colonia a Buenos Aires es de aproximadamente una hora, mientras que desde Montevideo y Torre Oyarvide es de 5 y 6 horas respectivamente. Finalmente para las estaciones La Paloma y Punta del Este estos tiempos son de 4 y 6 horas respectivamente.

El tiempo de viaje se vincula con esta velocidad de propagación de la perturbación asociada a cada evento. Estimando una distancia entre la estación Mar del Plata y el resto de las estaciones, los tiempos de viajes anteriormente presentados se pueden traducir en velocidades aproximadas de propagación. Desde luego estas distancias aproximadas sirven a efectos de dar una idea cualitativa, pues asumen cierta trayectoria razonable para las perturbaciones pero puede no ocurrir en la realidad. En la Figura 74 se muestran las trayectorias consideradas y sus respectivas longitudes.

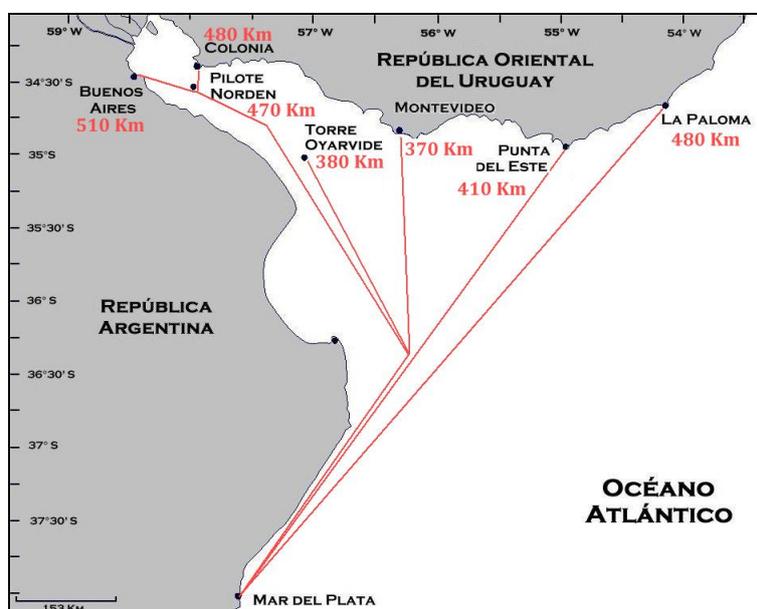


Figura 74: Distancias de las estaciones a la estación Mar del Plata considerada para el cálculo de velocidades de propagación.

De esta forma, a partir de dichas distancias y tiempos de propagación fueron calculadas las correspondientes velocidades de propagación para cada evento y cada estación. En la Figura 75 y la Figura 76 se han graficado en forma de nube de puntos los valores de velocidad de propagación contra la amplitud de cada evento y contra su período respectivamente. Se puede ver que si bien existe cierta dispersión las nubes se distribuyen “horizontalmente” en torno a un valor cercano a 10 m/s, lo que significa que no hay dependencia entre estas variables. Además, este valor entorno al que se distribuyen es razonable si se considera que la velocidad de propagación de ondas libres (\sqrt{gD}) en una zona de profundidades que van de 25m a 10m varía entre 16 m/s y 10 m/s. Se debe tener en cuenta que los valores presentados para las estaciones interiores son calculados a partir de un tiempo medio de viaje y una distancia total a lo largo de la cual la profundidad varía entre los rangos antes mencionados, por tanto se trata de una velocidad

promedio en todo el recorrido. Se observa en todos los gráficos un caso aislado, muy particular, con velocidades de propagación extremadamente altas. Este caso es el identificado con el número 35 en el Anexo X-2 y no se trata de un outlier. Efectivamente en dicho evento se presenta un máximo de la series de niveles residuales en todas la estaciones con muy poca diferencia horaria, en el siguiente capítulo se analizarán las condiciones atmosféricas que desencadenaron un evento de estas características.

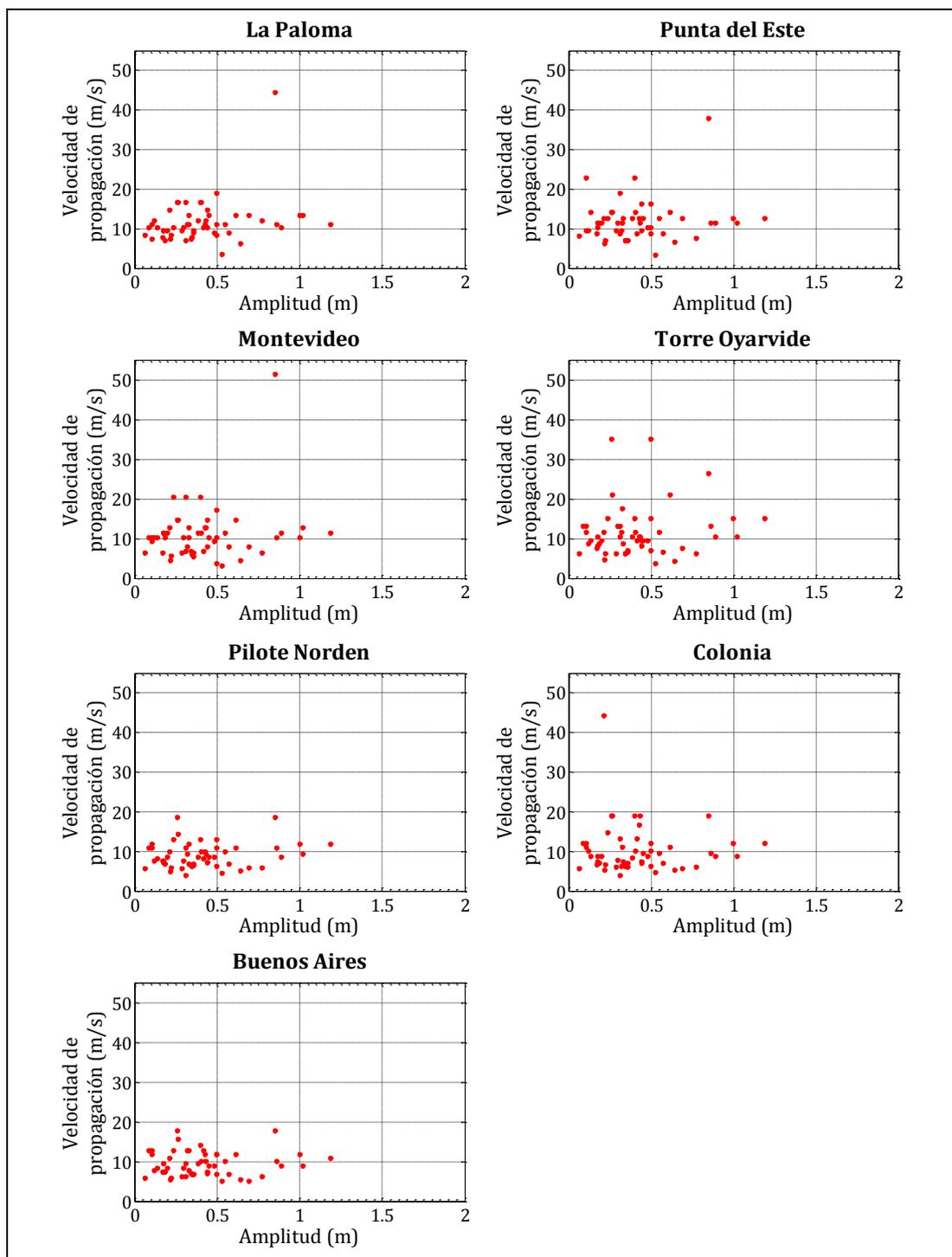


Figura 75: Velocidades de propagación de los eventos identificados contra la amplitud del evento.

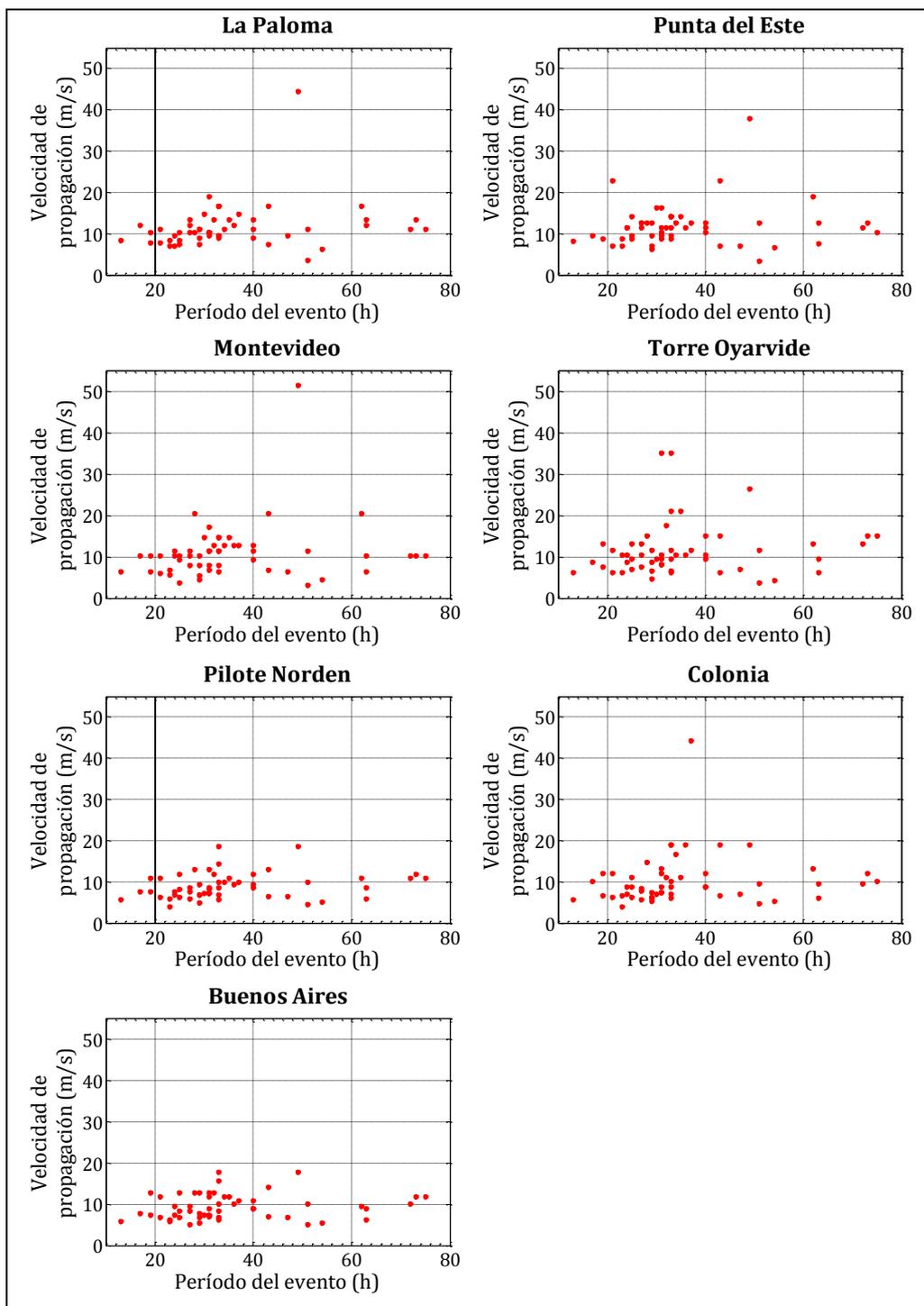


Figura 76: Velocidades de propagación de los eventos identificados contra el período del evento.

Finalmente para cerrar este análisis se presentan los resultados obtenidos considerando una forma alternativa de estimar los tiempos de viaje de las señales entre las distintas estaciones. Calculando la correlación cruzada de las estaciones, esto es correlaciones de las series residuales de niveles de las distintas estaciones entre sí para distintos lag's temporales, es posible asociar el tiempo de viaje de la señal al lag de mayor correlación.

Correlacionando todas las series con la serie residual en la estación Buenos Aires para distintos lag's temporales se obtienen los resultados que se muestran en la Figura 77. Se puede ver que las estaciones Pilote Norden y Colonia presentan su máxima correlación para lag 0 horas, lo cual es razonable ya que son tres estaciones muy cercanas y el lag mínimo considerado es de una hora (pues las series son horarias). Por otra parte las estaciones Montevideo y Torre Oyarvide presentan un lag de máxima correlación de 6 horas en ambos casos, mientras que para La Paloma y Punta del Este es de 5 y 7 horas respectivamente. Por último se tiene una máxima correlación entre las series residuales en Buenos Aires y Mar del Plata para un lag temporal de 19 horas.

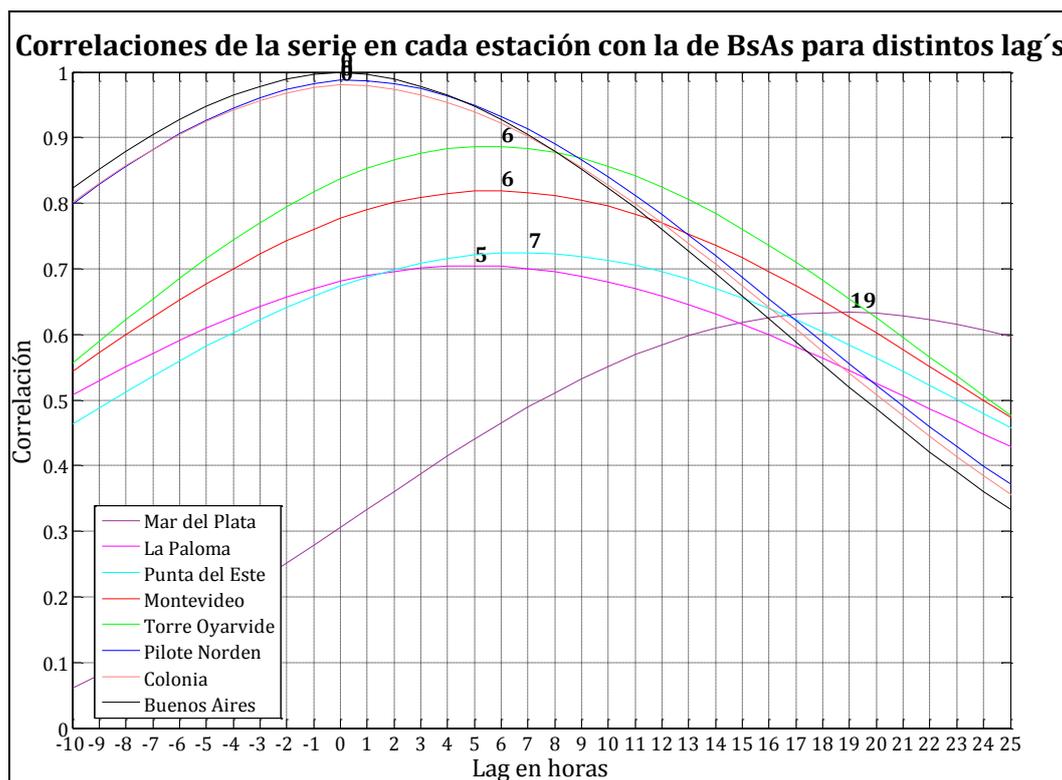


Figura 77: Correlaciones con lag de la serie residual de niveles en Buenos Aires con las series residuales de niveles en el resto de las estaciones.

Otra variante de esta metodología consiste en utilizar los resultados del análisis de componentes principales, en particular el PC correspondiente a la primera componente principal, el cual se vio captura muy bien la señal común a todas las estaciones. De esta forma en lugar de buscar la correlación con la serie residual en Buenos Aires se buscó la correlación para distintos lag's temporales de la series residuales de niveles en cada estación respecto a la primera componente principal. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 78. Se puede ver que las correlaciones obtenidas son más altas y que en este caso se tiene lag's de máxima correlación tanto positivos como negativos. Esto último se debe a que el primer PC captura la señal común a todas las series y como se mostró en el apartado anterior la segunda componente principal aporta el desfase necesario, retrasándola en el caso de las estaciones exteriores y adelantándola para las estaciones interiores. Si se refieren los tiempos obtenidos a la estación Buenos Aires, se tiene un tiempo de viaje desde la estación Mar del Plata de 18 horas. A diferencia de los resultados anteriores se obtiene un tiempo de viaje de una hora para las estaciones Pilote

Norden y Colonia. El tiempo de viaje de las estaciones Montevideo y Torre Oyarvide a la estación Buenos Aires es de 5 horas. Por último para las estaciones La Paloma y Punta del Este el tiempo de viaje obtenido es de 4 y 5 horas respectivamente.

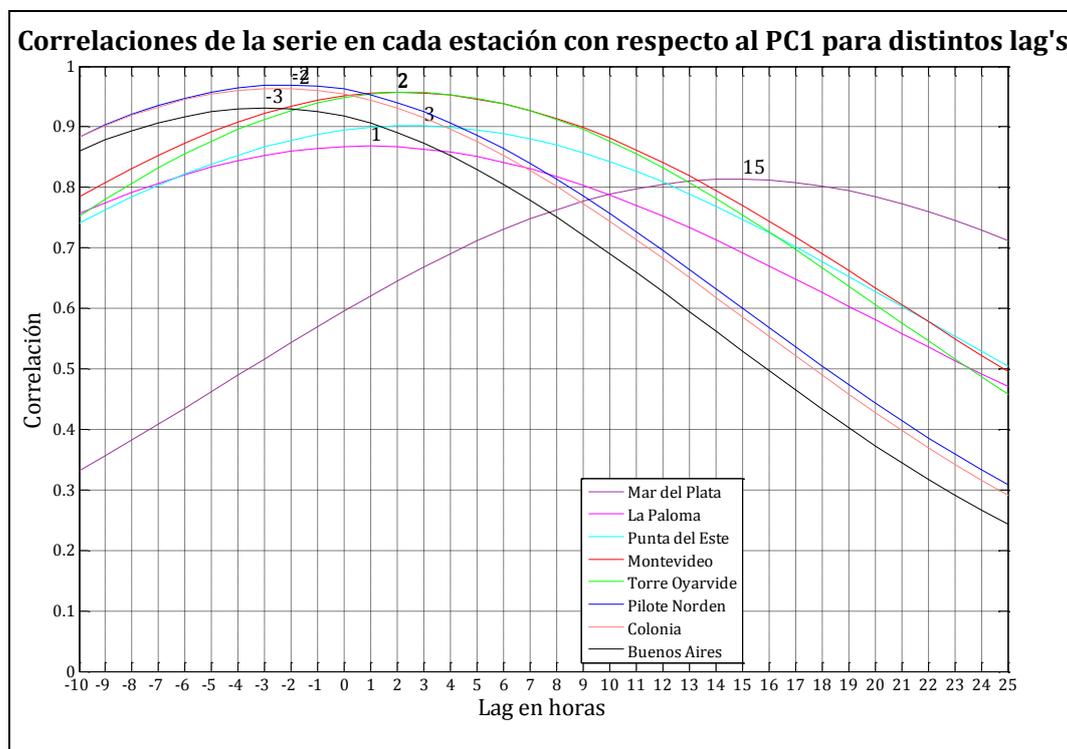


Figura 78: Correlaciones con lag del primer PC con las series residuales de niveles en las ocho estaciones consideradas.

Los resultados obtenidos para los tiempos de viaje entre estaciones son similares para las tres metodologías propuestas. En conclusión se puede decir que el tiempo de viaje de las perturbaciones a la estación Buenos Aires es de, 1 hora o menos desde las estaciones Colonia y Pilote Norden, 4-5 hora desde La Paloma, 5-6 horas desde Montevideo, Torre Oyarvide y Punta del Este, y por último 17-19 horas desde la estación Mar del Plata.

Estos resultados tienen una utilidad clara en términos de un sistema de alerta o predicción en base a una red de observación en tiempo real. A partir de la observación en tiempo real de los niveles en Mar del Plata es posible anticipar la ocurrencia de una onda de tormenta con una antelación de 17 horas. Sin embargo, como se mostró la amplitud del evento se amplificará, no siendo dicha amplificación siempre la misma. Es allí que los modelos numéricos tienen un rol fundamental, ya que tienen en cuenta la influencia de los forzantes atmosféricos locales en la evolución de las perturbaciones en el río, los complejos efectos batimétricos de contornos y las interacciones con las ondas astronómicas.

-- Capítulo V --

Vinculación con los forzantes atmosféricos

V-1.	Introducción.....	103
V-2.	Información disponible.....	103
V-3.	Análisis de las condiciones atmosféricas asociadas a eventos extremos en las series residuales de niveles	104
	V-3.1. Metodología.....	104
	V-3.2. Resultados.....	105
V-4.	Observaciones sobre las condiciones atmosféricas que dan lugar a la marea meteorológica en el Río de la Plata.....	109
	V-4.1. Vinculación entre las series residuales de niveles y la serie de viento en la estación Pilote Norden.....	109
	V-4.2. Observaciones sobre las condiciones sinópticas asociadas a eventos de ondas de tormenta en el Río de la Plata.....	113
V-5.	Síntesis.....	123

V-1. Introducción

Hasta este capítulo únicamente se han analizado las series de niveles registradas en diferentes estaciones del Río de la Plata, en particular las oscilaciones no astronómicas identificadas en dichas series. Es bien sabido que gran parte de estas oscilaciones se deben a los forzantes atmosféricos, de allí que a veces se las denomine como marea meteorológica. En este capítulo se busca vincular el comportamiento de las series residuales de niveles con los forzantes atmosféricos. En el apartado V-2 se presenta la información disponible sobre las variables atmosféricas de mayor relevancia, viento y presión en superficie. En el apartado V-3 se presenta, como primera aproximación a la vinculación con los forzantes, la identificación de las condiciones atmosféricas de mesoescala asociadas a eventos extremos en las series residuales de niveles. Por último en el punto V-4, se realizarán comentarios sobre las condiciones de generación de ondas de tormenta en general, observando los campos de viento y presión en la región durante la ocurrencia de distintos eventos de interés. Finalmente en el punto V-5 se presenta una síntesis de las conclusiones obtenidas a partir de ambos análisis.

V-2. Información disponible

A los efectos de caracterizar los forzantes atmosféricos a meso escala, la información que resulta de mayor utilidad son los datos de Re-análisis de NCEP (Kalnay et.al, 1996); dicha base de datos surge de una combinación entre datos observados y simulaciones numéricas, siendo su resolución temporal de 6 horas y espacial de $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$.

Por otra parte, se contó con registros del año 2004 de vientos en las estaciones Punta Brava, Pontón de Recalada y Pilote Norden, y datos de presión en superficie únicamente en la primera de ellas. En la Figura 79 se puede ver la ubicación de las estaciones mencionadas.

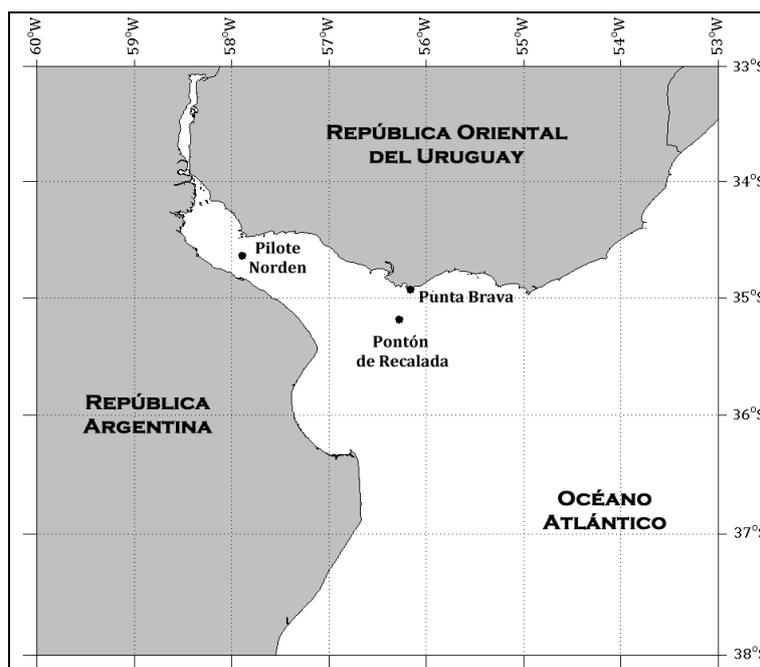


Figura 79: Ubicación de las estaciones meteorológicas consideradas.

La estación Punta Brava pertenece al SOHMA, y su ubicación geográfica es 34°59'S 56°50'W. Cuenta con datos tri-horarios de viento y presión en superficie.

El Pontón de Recalada pertenece a la Prefectura Naval Argentina y se encuentra ubicado en la latitud 35° 10'S y longitud 56° 16' W. La información disponible para este estudio en dicha estación consiste en datos de viento con una frecuencia trihoraria.

La estación Pilote Norden es la misma en la que se miden niveles y fue presentada anteriormente. Se cuenta en dicha estación con datos de viento con una frecuencia de cinco minutos.

V-3. Análisis de las condiciones atmosféricas asociadas a eventos extremos en las series residuales de niveles

V-3.1. Metodología

Como primera aproximación a la vinculación de las oscilaciones no astronómicas de nivel con los forzantes atmosféricos, se plantea identificar los patrones atmosféricos de mesoescala asociados a los eventos de variación de niveles más significativos. De esta forma se identifican en las series de niveles residuales eventos en que la separación del comportamiento astronómico es significativa, esto es, eventos “extremos” máximos y mínimos en la serie residual de niveles. Una vez seleccionados los eventos se identifican los campos de viento en 10m y presión en superficie de los Re-análisis correspondientes y se realizan “composites” de los mismos.

Se llevaron a cabo dos alternativas para la identificación de los eventos significativos en la series de niveles. En primer lugar se utilizó la primera componente principal obtenida con el ACP como una serie sintética del comportamiento de todas las estaciones en el Río de la Plata. La elección de los eventos significativos se realizó considerando como eventos máximos aquellos que superan el percentil 97,5 y mínimos aquellos por debajo del percentil 2,5 de la serie.

En segundo lugar buscando hacer más representativo el análisis considerando una mayor cantidad de eventos, se aplicó la misma metodología trabajando únicamente sobre la serie residual de niveles observados en la estación Pilote Norden por tener la mayor cantidad de datos disponibles (casi siete años según lo mencionado en el punto III-1.1.7). La elección de los eventos significativos se realizó con el mismo criterio antes descrito.

Una vez identificados los instantes asociados a cada evento, fueron identificados los datos de Re-analysis correspondientes. Se debe tener presente que la serie residual de niveles (o el primer PC) tiene una frecuencia horaria mientras que los datos de Re-analysis se encuentran disponibles cada seis horas.

Con los campos de viento y presión en superficie identificados, se realizaron “composites”, por un lado para los eventos máximos y por otro para los eventos mínimos. Esto consiste simplemente en realizar en cada punto de la grilla un

promedio de los valores de la variable en cuestión durante los instantes identificados.

V-3.2. Resultados

Siguiendo la metodología antes descrita fueron identificados 14 eventos máximos y 10 mínimos a partir del primer PC (PC_1), los cuales se muestran en la Figura 80 (arriba). Por otra parte se aplicó la misma metodología sobre los datos disponibles en la estación Pilote Norden obteniendo 98 eventos máximos y 79 eventos mínimos lo cual da más representatividad al análisis, los mismos se muestran en la Figura 80 (abajo).

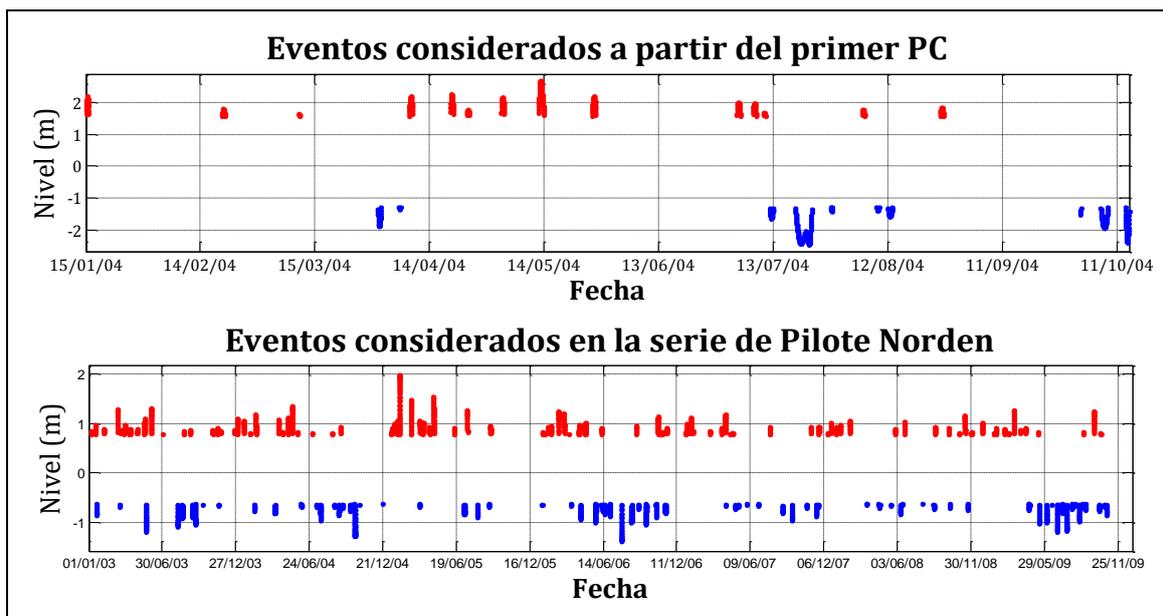


Figura 80: Eventos de niveles máximos y mínimos identificados en el PC_1 (arriba) y en la serie de niveles residuales en la estación Pilote Norden durante 2003 a 2009 (abajo).

Un promedio de los campos de viento en 10m y presión en superficie de Re-análisis durante los años 2003 a 2009 se muestra en la Figura 81 a los efectos de establecer una condición media. Se observan vientos del W en la plataforma Argentina, mientras que sobre el Río de la Plata y la zona oceánica adyacente se tienen vientos calmos. Estos campos medios son muy similares a los que se muestran en Escobar et al. (2004).

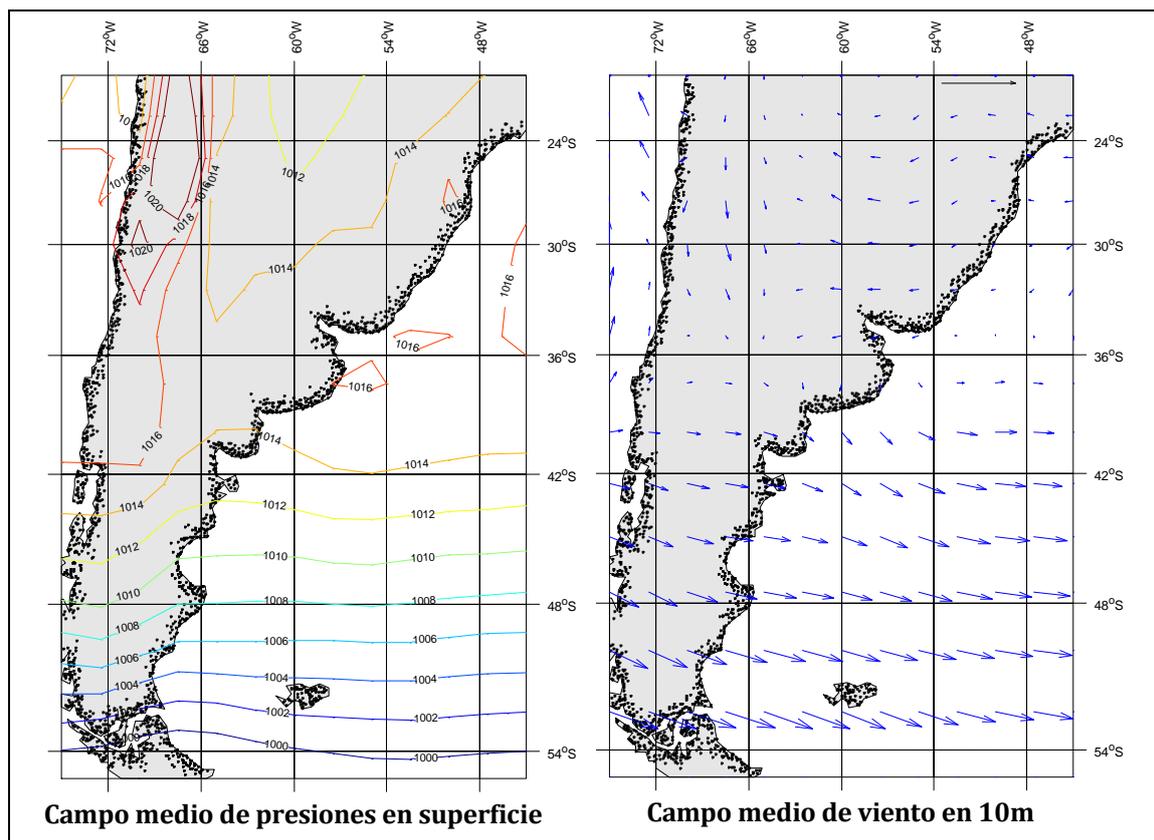


Figura 81: Campos medios de presión en superficie (izq.) y viento en 10m (derecha) a partir de los Re-análisis correspondientes a los años 2003 a 2009.

Realizando el composite de los campos de viento en 10m y presión en superficie de Re-análisis asociados a los eventos máximos y mínimos identificados en el PC_1 se obtienen los resultados de la Figura 82, mientras que la Figura 83 muestra los resultados obtenidos a partir de la serie residual de niveles en Pilote Norden. Ambos resultados presentan las mismas características generales, en el caso de eventos de niveles máximos se presenta un patrón de circulación anticiclónica al sur del Río de la Plata el cual conlleva a una alineación de la dirección del viento del SE con su eje. Por otra parte se observa una región de baja presión que se extiende de NW a SE, desde Paraguay hacia el Océano Atlántico. Esta última se asocia a los usuales frentes fríos que progresan sobre esa región de SW a NE (Escobar et al., 2004).

Por el contrario en el caso de eventos de niveles mínimos se puede ver que los vientos actuando sobre el estuario son predominantemente del N o NW.

Estos resultados no solo coinciden con los obtenidos por Escobar et al. (2004), sino que también son consistentes con las observaciones realizadas por Balay (1959). En el apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** fueron presentados en forma resumida algunos de los principales resultados de Balay (1959), en particular en la Figura 9 se muestra la que el autor define como una situación sinóptica típica que desencadena eventos de crecida en el Río de la Plata. Si se compara dicha situación sinóptica con el composite obtenido en este análisis se observan ciertas similitudes, si bien Balay encuentra un sistema de alta presión un poco más al SE que el identificado en este análisis, esencialmente la orientación de vientos que induce sobre el Río de la Plata es la misma. Sin embargo, en la

situación planteada por Balay también se hace presente y con un rol importante una depresión significativa al norte del Uruguay – sur de Brasil la cual incrementa sustancialmente el gradiente de presiones y por tanto conlleva a vientos de mayor intensidad. Si bien esta última no se identifica en el composite aquí obtenido es probable que dentro de los casos utilizados para su elaboración se encuentren situaciones sinópticas con dichas características y sean las que correspondan a eventos de mayor amplitud. A modo de ejemplo se muestra en la Figura 84 el campo de viento y presión asociado al máximo evento en la serie residual de niveles Pilote Norden, en el mismo se observa una situación tal como la descrita anteriormente, con una fuerte compresión de las isobaras sobre el Río de la Plata.

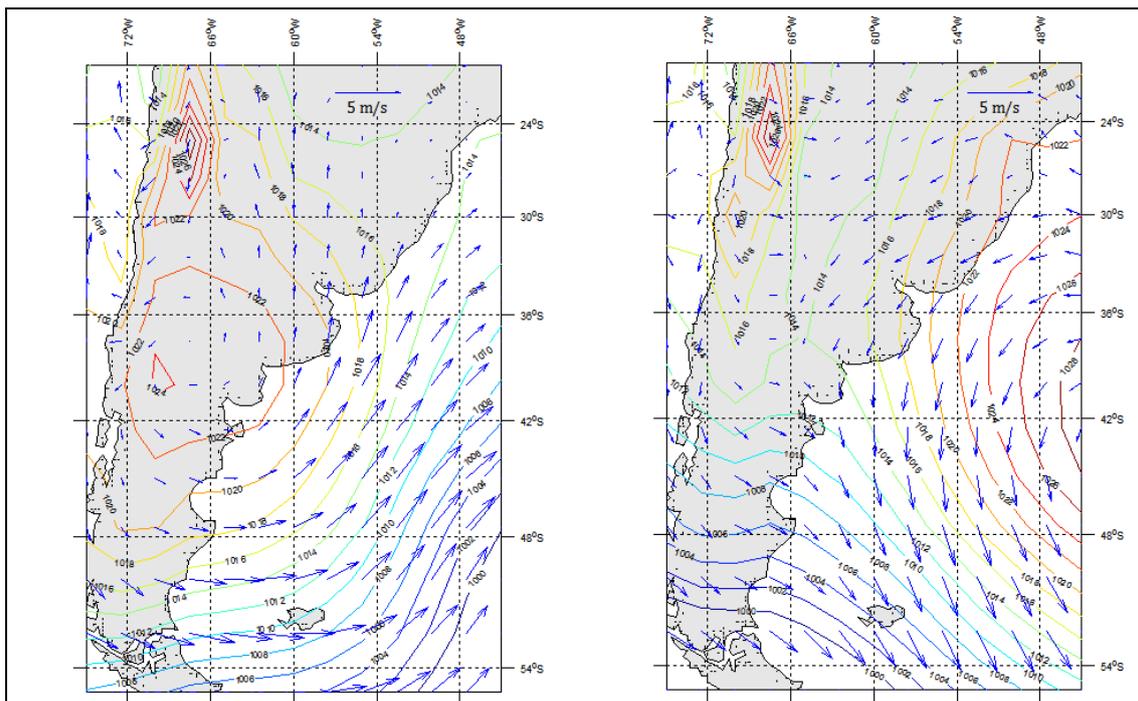


Figura 82: Composites de viento en 10m y presión en superficie para eventos de niveles máximos (izq.) y mínimos (derecha) a partir del PC_1.

Por último cabe destacar que este análisis se basa en los campos de viento y presión simultáneos o muy cercanos en el tiempo a la situación de máximo nivel en el Río de la Plata. De manera que los resultados obtenidos no brindan información a cerca de la evolución previa de los forzantes que desencadena los eventos. En el siguiente apartado se realizan algunas observaciones cualitativas acerca de la situación sinóptica previa a los principales eventos identificados durante el año 2004.

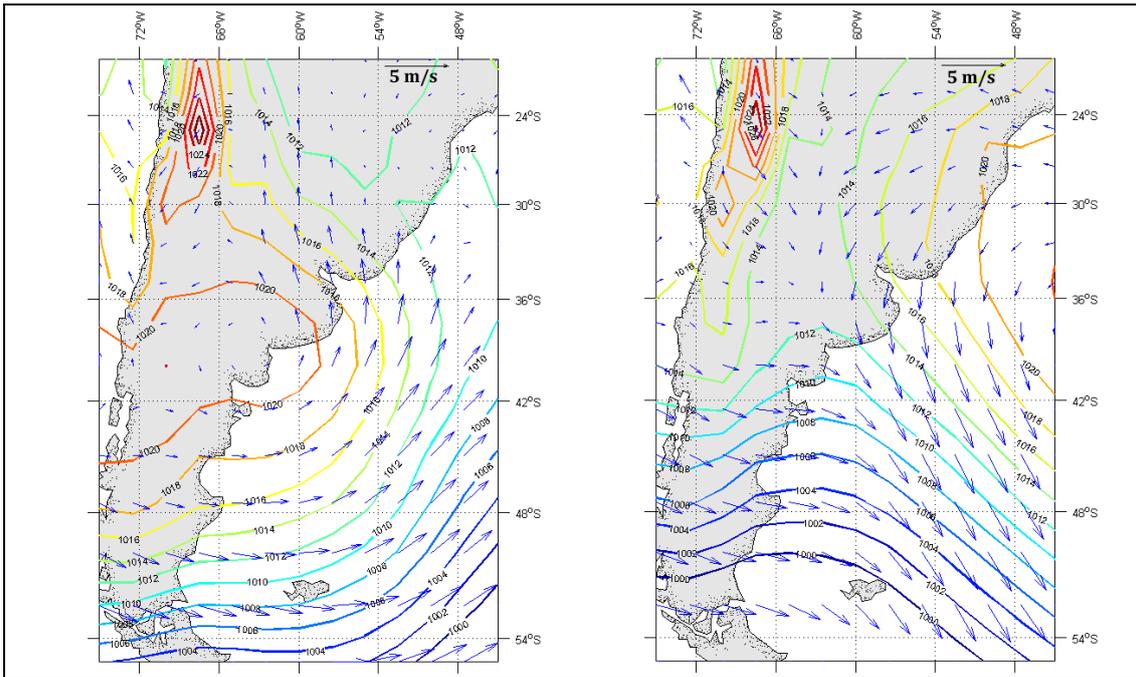


Figura 83: Composites de viento en 10m y presión en superficie para eventos de niveles máximos (izq.) y mínimos (derecha) en Pilote Norden durante los años 2003 a 2009.

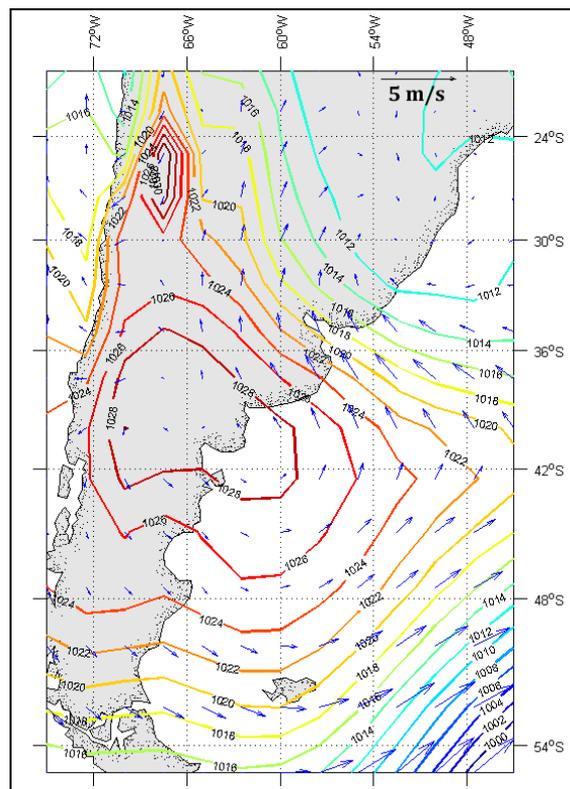


Figura 84: Campos de viento en 10m y presión en superficie para el evento de mayor magnitud en la estación Pilote Norden durante los años 2004, 2006 y 2007.

V-4. Observaciones sobre las condiciones atmosféricas que dan lugar a la marea meteorológica en el Río de la Plata

En este apartado se busca obtener una idea general acerca de la evolución en el tiempo de los forzantes atmosféricos que desencadenan los principales eventos en las series residuales de niveles en el Río de la Plata. En el punto V-4.1 se muestra una comparación entre las series residuales de niveles en las estaciones Mar del Plata y Pilote Norden, con la serie de viento registrada en esta última estación. Por otra parte en el punto V-4.2 se presenta una descripción cualitativa de la evolución de los campos de viento y presión en superficie a escala sinóptica previa a la ocurrencia de los eventos más significativos en las series residuales de niveles del Río de la Plata durante el año 2004. Ambos análisis son de carácter cualitativo, sin embargo, en lo que respecta a la dirección de los vientos de mayor significancia se pone de manifiesto un comportamiento que contrasta con los resultados obtenidos en el apartado anterior.

V-4.1. Vinculación entre las series residuales de niveles y la serie de viento en la estación Pilote Norden

En base a la información de viento disponible en la estación Pilote Norden, se construyó una serie horaria de datos de vientos proyectados en la direcciones NE-SW y NW-SE. Esta rotación fue motivada por la orientación del eje del río, diversos antecedentes (Balay, 1958 pp. 133) afirman que los vientos alineados con la dirección del eje pueden tener un efecto significativo mientras que los perpendiculares a dicha dirección no presentan un rol relevante.

En la Figura 85 a Figura 88 se muestran las series proyectadas de viento junto con las series residuales de niveles en las estaciones Mar del Plata y Pilote Norden durante los meses de enero, abril, mayo y julio de 2004. La convención de signos utilizada es la típica para datos de vientos, valores positivos en determinada dirección indican que el viento proviene de dicha dirección. Una primera observación es la marcada presencia del ciclo diario en la serie de viento correspondiente al mes de enero, mientras que en el mes de julio se encuentra presente pero en menor medida.

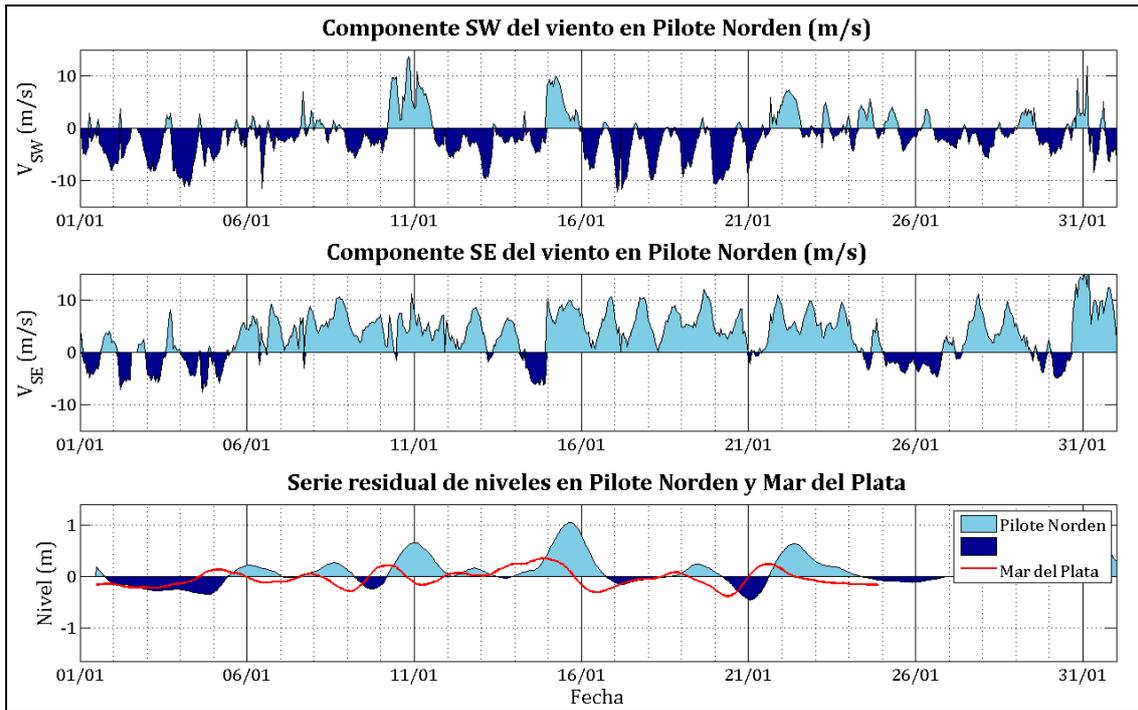


Figura 85: Series proyectadas de viento en Pilote Norden y series residuales de niveles en Mar del Plata y Pilote Norden durante enero de 2004.

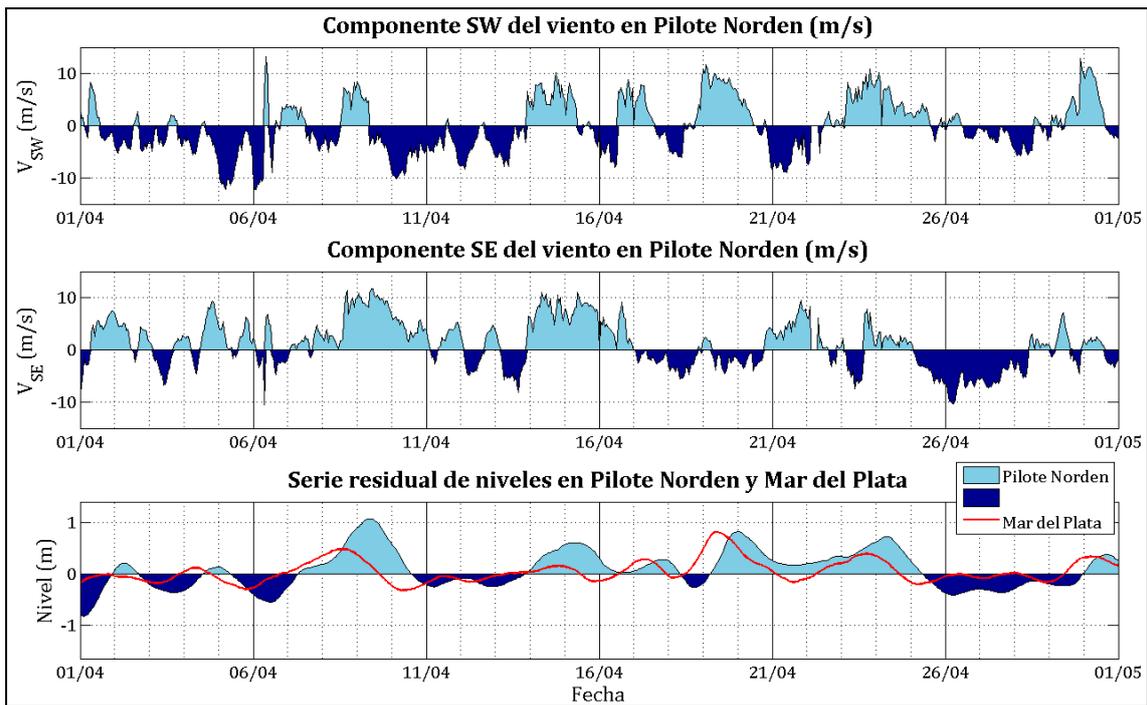


Figura 86: Series proyectadas de viento en Pilote Norden y series residuales de niveles en Mar del Plata y Pilote Norden durante abril de 2004.

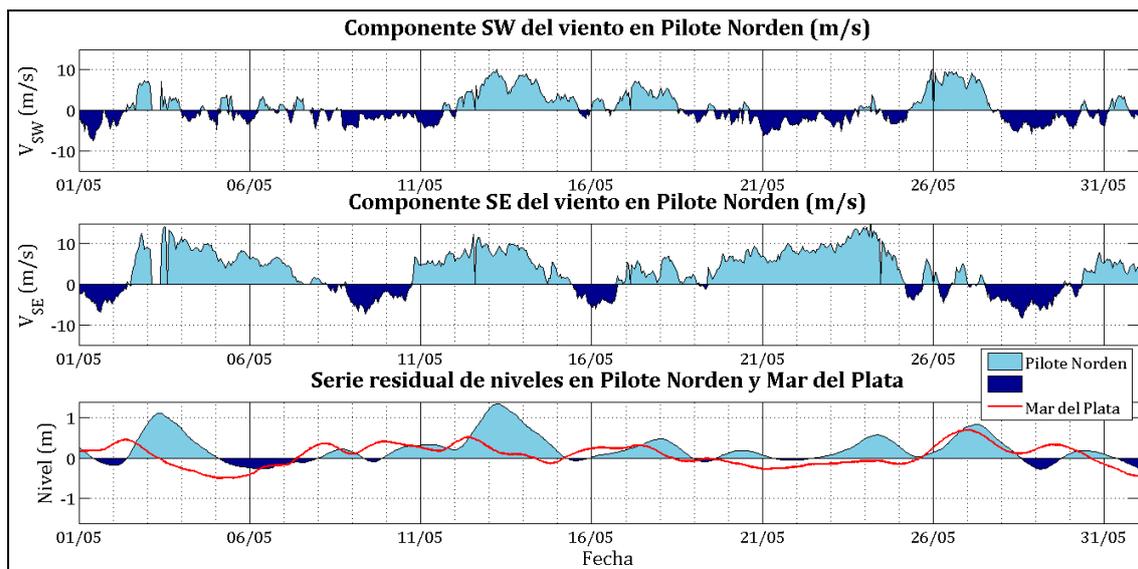


Figura 87: Series proyectadas de viento en Pilote Norden y series residuales de niveles en Mar del Plata y Pilote Norden durante mayo de 2004.

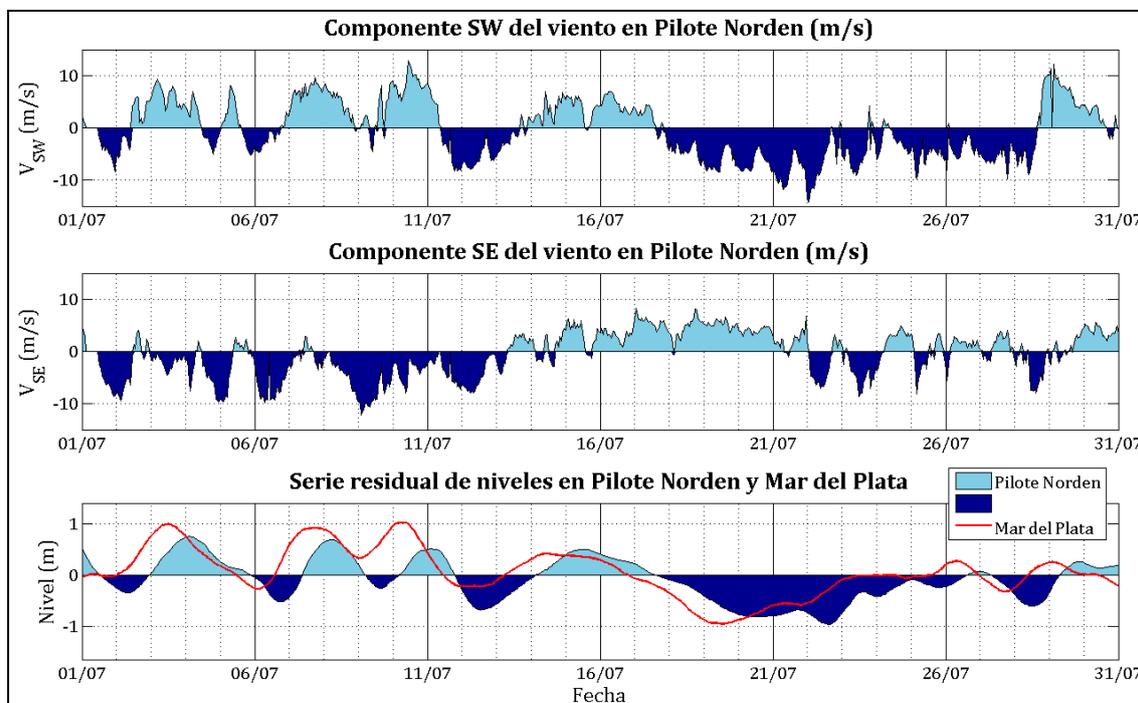


Figura 88: Series proyectadas de viento en Pilote Norden y series residuales de niveles en Mar del Plata y Pilote Norden durante julio de 2004.

De estas Figuras se desprende una clara correlación entre la serie de viento proyectado en la dirección NE-SW y las series residuales de niveles. Teniendo en cuenta ciertos antecedentes, a priori era de esperar que dicha correlación tuviese lugar con la componente NW-SE del viento. Si bien se observa que dicha componente es relevante en varios eventos, en la mayoría de los eventos se aprecia una mejor correlación con la componente SW del viento.

Observando en detalle los períodos presentados, se identifican los siguientes comportamientos. Tres de las anomalías positivas más relevantes en la serie residual de niveles en Pilote Norden durante el mes de enero (11/01, 16/01 y 22/01) son precedidas por un incremento en la intensidad en la componente SW del viento.

del viento. La componente SE presenta una intensidad no despreciable, sin embargo se puede decir que esa condición se da durante casi todo el período 06/01 – 24/01, mientras que los eventos antes mencionados tuvieron lugar únicamente luego de que la componente SW cobrara importancia.

Durante el mes de abril los principales eventos, a saber 09/04, 15/04, 20/04, 24/04 y 30/04, fueron precedidos en su totalidad por valores positivos de la componente SW del viento. Los eventos de mayor amplitud durante el mes de mayo tienen lugar en torno a los días 03/05 y 13/05 y se presentan bajo condiciones de viento S. En lo que respecta al mes de julio, los eventos ocurridos el 04/07, 08/07 y 11/07 muestran una clara correlación entre la serie residual de niveles y la componente SW del viento, dándose incluso eventos máximos en los que la componente SE tuvo valores negativos.

Estos comentarios ponen de manifiesto en una primera aproximación la importancia de los vientos del SW en la ocurrencia de eventos de niveles máximos en el Río de la Plata. Sin embargo, resta aún incorporar a las observaciones anteriores lo que sucede en la estación Mar del Plata. Los tres eventos mencionados durante el mes de enero, así como los eventos del 06/05, 13/05, 09/04 y 15/04, presentan una clara amplificación de una estación a la otra. Por otro lado esto no sucede para los eventos ocurridos durante el mes de julio, ni durante los eventos del 20/04, 24/04 y 30/04, presentando amplitudes muy similares en ambas estaciones. Como ya fue mencionado en todos los casos los eventos son precedidos por valores positivos de la componente SW del viento, sin embargo si se observa la componente SE, se puede ver que aquellos eventos que se amplifican de una estación a la otra son acompañados por valores positivos de componente SE del viento. Por el contrario en el caso de los eventos que no presentan una amplificación significativa, la componente SE del viento o bien no presenta valores significativos o incluso toma valores negativos.

Dos eventos ocurridos durante el mes de mayo merecen un comentario a parte. Si bien no presentan las mayores amplitudes, los eventos ocurridos los días 24/05 y 27/05 llaman la atención por sus características. El primero de ellos presenta la peculiaridad de prácticamente no ser registrado en la estación de Mar del Plata y adquirir una amplitud cercana a 50 cm en la estación Pilote Norden. Dicho evento tuvo lugar luego de la ocurrencia de persistentes vientos del SE durante varios días con intensidades superiores a 10 m/s. Por el contrario, el evento con nivel máximo el día 27/05 no presenta amplificación alguna entre las estaciones Mar del Plata y Pilote Norden. Dicho comportamiento ya ha sido observado en otros eventos, y es consistente con la no existencia de vientos del SE, lo realmente llamativo de este evento es la rapidez con que la señal llega de una estación a la otra. Este evento es el que fue identificado en el apartado IV-3.2 por mostrar velocidades de propagación inusualmente altas (evento N° 35 en el anexo X-2). La información aquí presentada no permite dar una explicación a dicho comportamiento.

Estas observaciones no permiten extraer aún una conclusión sólida por tratarse de series puntuales en el espacio, sin embargo ponen de manifiesto la importancia de la componente SW del viento en la ocurrencia de eventos en las series residuales de niveles del Río de la Plata. A partir de este sencillo análisis se insinúa un comportamiento en el cual la ocurrencia de los eventos se encuentra muy vinculada a la componente SW del viento, mientras que el efecto de la componente

SE en general se encuentra relacionado a la amplificación de los mismos. Sin embargo, como se observó en uno de los eventos, si estos vientos del SE son persistentes y con intensidades significativas pueden generar por sí solos incrementos no despreciables de los niveles en las estaciones interiores, mostrando claramente que se trata de un efecto local.

A los efectos de conocer que situaciones sinópticas dan lugar a este tipo de vientos en el siguiente apartado se analizan los campos de vientos y presión en superficie asociados a algunos de los principales eventos ocurridos durante el año 2004.

V-4.2. Observaciones sobre las condiciones sinópticas asociadas a eventos de ondas de tormenta en el Río de la Plata

Se seleccionaron varios de los eventos más significativos (amplitudes mayores a 1m en la estación Buenos Aires) identificados en el apartado IV-3.2 y se mapearon los campos de viento y presión en superficie de Re-analysis durante el evento. Los eventos considerados se muestran en la Tabla 26; entre ellos se encuentran algunos de los casos mencionados en el apartado anterior. Se ven eventos de características muy distintas en lo que respecta a la evolución de su amplitud en el río. Por ejemplo, el evento N° 19 presenta una amplificación de más de 200% entre Mar del Plata y Buenos Aires, mientras que el evento 41 prácticamente no se amplifica.

N° event	Fecha	Amplitud del evento (m)							
		Mar del Plata	La Paloma	Punta del Este	Montevideo	Torre Oyarvide	Pilote Norden	Colonia	Buenos Aires
19	05/04-10/04	0,77	0,80	0,92	1,20	1,42	1,62	1,67	1,80
56	23/08-28/08	1,00	0,67	0,79	0,94	1,15	1,32	1,35	1,43
40	01/07-05/07	1,02	0,81	0,93	1,09	1,14	1,09	1,11	1,11
41	05/07-09/07	1,19	0,81	1,03	1,26	1,22	1,20	1,22	1,20
5	13/01-16/01	0,34	0,37	0,47	0,76	0,88	1,09	1,07	1,16
23	18/04-21/04	0,89	0,84	0,99	1,02	1,11	1,08	1,02	1,08
57	28/08-01/09	0,44	0,41	0,40	0,50	0,67	0,84	0,79	1,01
34	21/05-25/05	-	-	-	0,38	0,47	0,64	0,61	0,75
35	25/05-28/05	0,85	0,76	0,92	0,94	0,86	0,81	0,85	0,81

Tabla 26: Eventos seleccionados a los efectos de visualizar los forzantes a escala sinóptica durante su ocurrencia.

Se muestran a continuación cuatro “snapshots” de la situación sinóptica para cada evento, escogidos de forma tal de mostrar lo ocurrido en los instantes más relevantes del evento. A su vez se muestran las series residuales de niveles en las ocho estaciones durante el evento en cuestión, señalando en rojo los instantes en los cuales se muestra en campo de viento y presión en superficie.

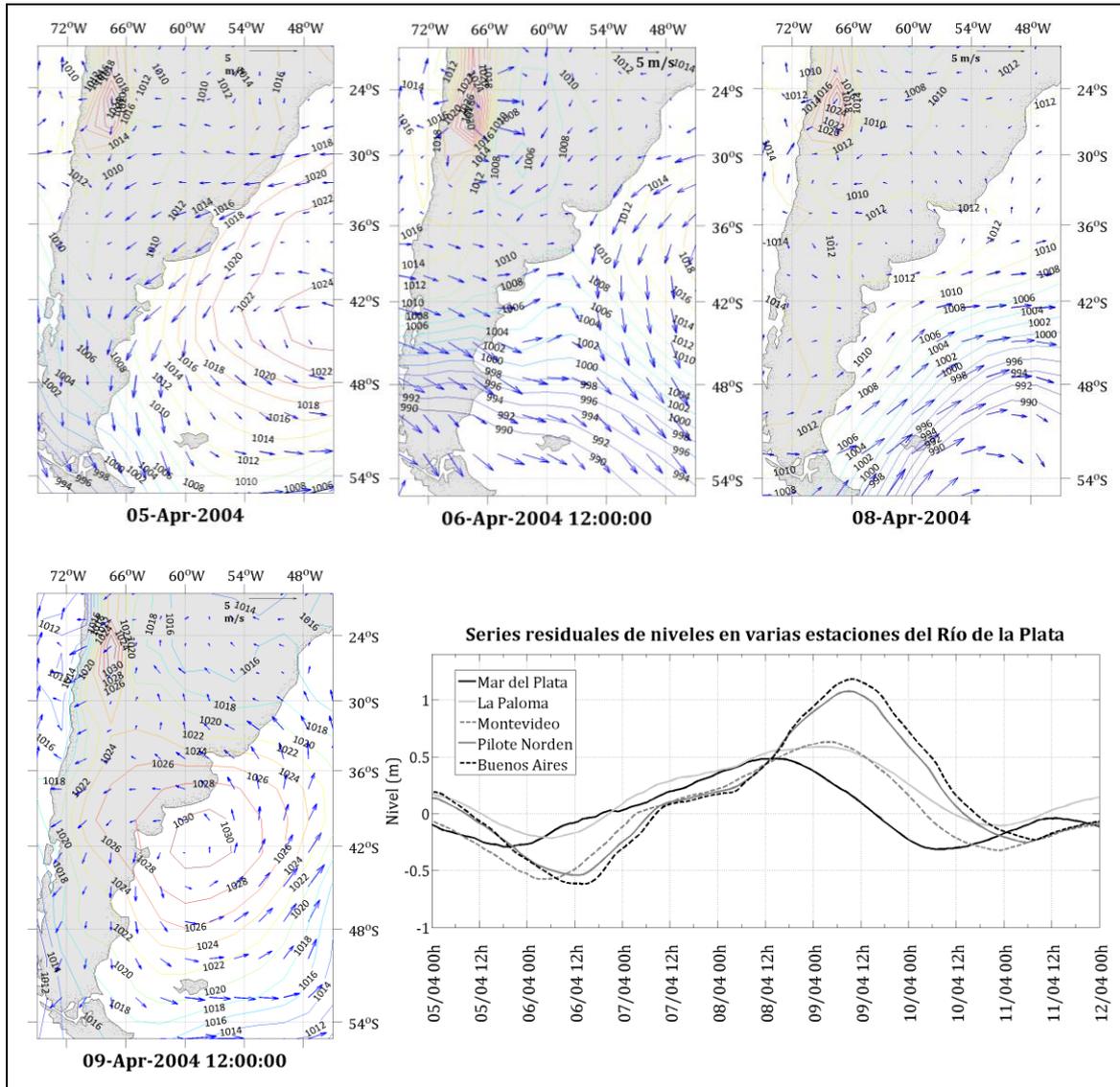


Figura 89: Evolución de los forzantes a escala sinóptica para el evento ocurrido entre el 05 y 10 de abril de 2004.

La situación sinóptica el 05/04 00hs previa a que se produzca un descenso pronunciado de niveles en el Río de la Plata muestra un centro de alta presión sobre el Océano Atlántico (lat. 45° S, lon. 46°W aprox.) generando vientos del NE en sobre el Río de la Plata y en toda la plataforma continental argentina. En el momento en que se alcanzan los niveles mínimos en las estaciones más interiores del Río de la Plata (06/04 12hs) la situación sinóptica muestra una extensa área de baja presión al sur de Argentina, el centro de alta presión sobre el océano se ha desplazado al este. Este campo naturalmente coincide muy bien con el resultado del composite para eventos de niveles mínimos presentado en el apartado V-3.2, y presenta vientos del N-NE en el Río de la Plata y vientos predominantemente del E en la plataforma continental argentina. El día 08/04 a las 00 horas, instante posterior al evento mínimo y previo a la ocurrencia del evento máximo, se observa que el gran centro de baja presión al sur de Argentina se ha desplazado a la derecha y la circulación ciclónica a su alrededor resulta en vientos del SW en toda la plataforma continental argentina. Finalmente el 09/04 12 hs un profundo centro de alta presión ha hecho aparición desde la cordillera y se mueve en dirección NE

generando con su circulación anticiclónica vientos intensos del SE en el Río de la Plata.

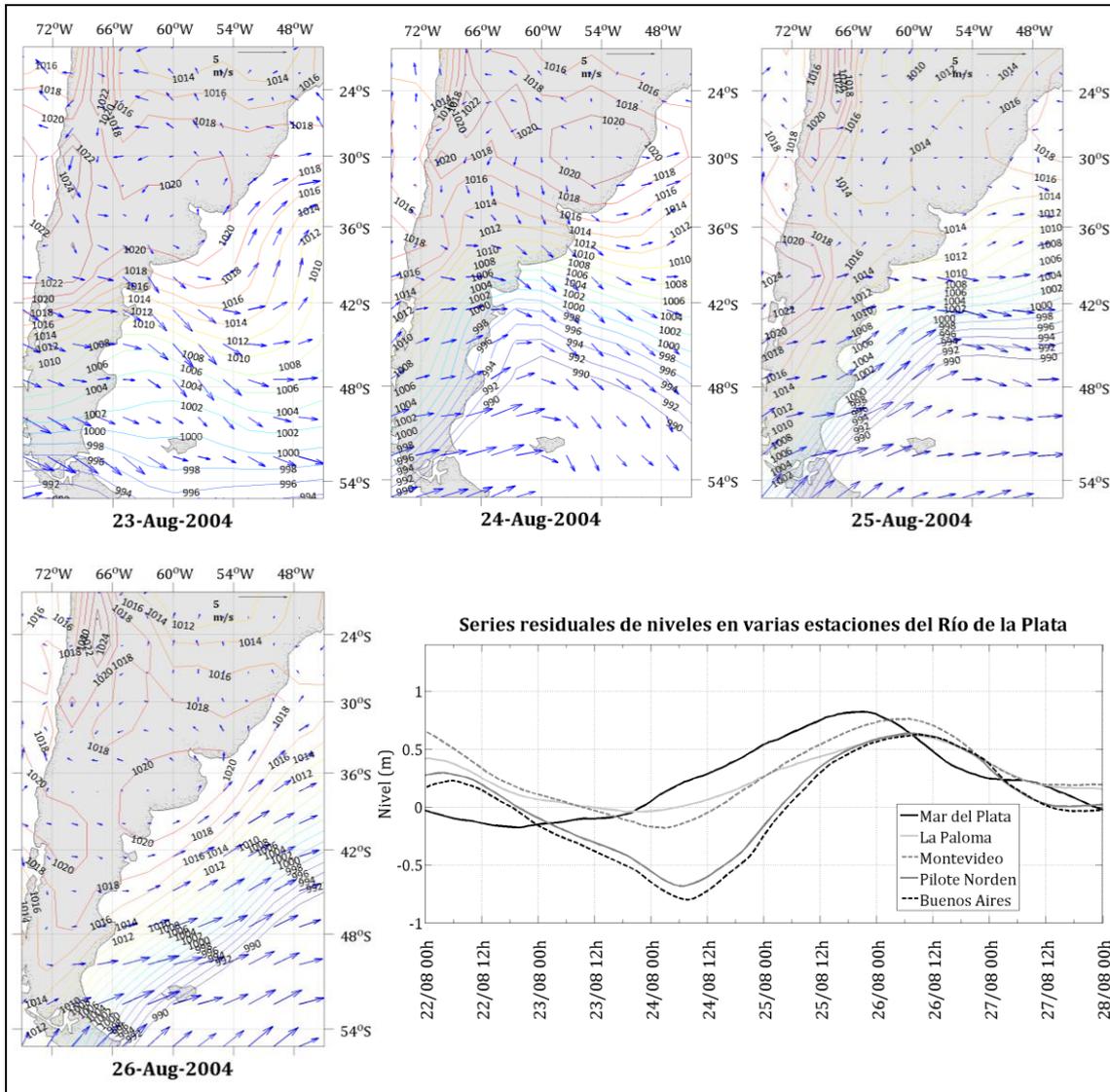


Figura 90: Evolución de los forzantes a escala sinóptica para el evento ocurrido entre el 23 y 28 de agosto de 2004.

Para el evento que tuvo lugar entre el 23 y 28 de agosto de 2004, la situación previa a la ocurrencia del nivel mínimo (23/08 00hs) muestra una situación compleja con bajas presiones en latitudes mayores a 45°S y altas presiones en 36°S generando vientos del W y NW en la plataforma continental argentina. En el instante en el que el mínimo nivel comienza a manifestarse en las estaciones del Río de la Plata (24/08 00hs.) se presenta un campo con vientos del NW en el Río de la Plata y la plataforma, mientras que al sur de la plataforma argentina se tiene vientos del W – WSW. Previo a la ocurrencia del nivel máximo (25/08 00hs) la zona de bajas presiones en el sur del océano Atlántico se ha extendido casi hasta la latitud 36°S con isobaras que acompañan la dirección de la costa del continente generando vientos del SW en toda la plataforma. Por último, en el instante en que tiene lugar el máximo nivel en las series residuales en las estaciones interiores (26/08 00hs) la región de baja presión se ha desplazado al este y sobre el sur del

Río de la Plata se ha ubicado un centro de alta presión, bajo esta configuración los vientos en el Río de la Plata tiene muy poca intensidad.

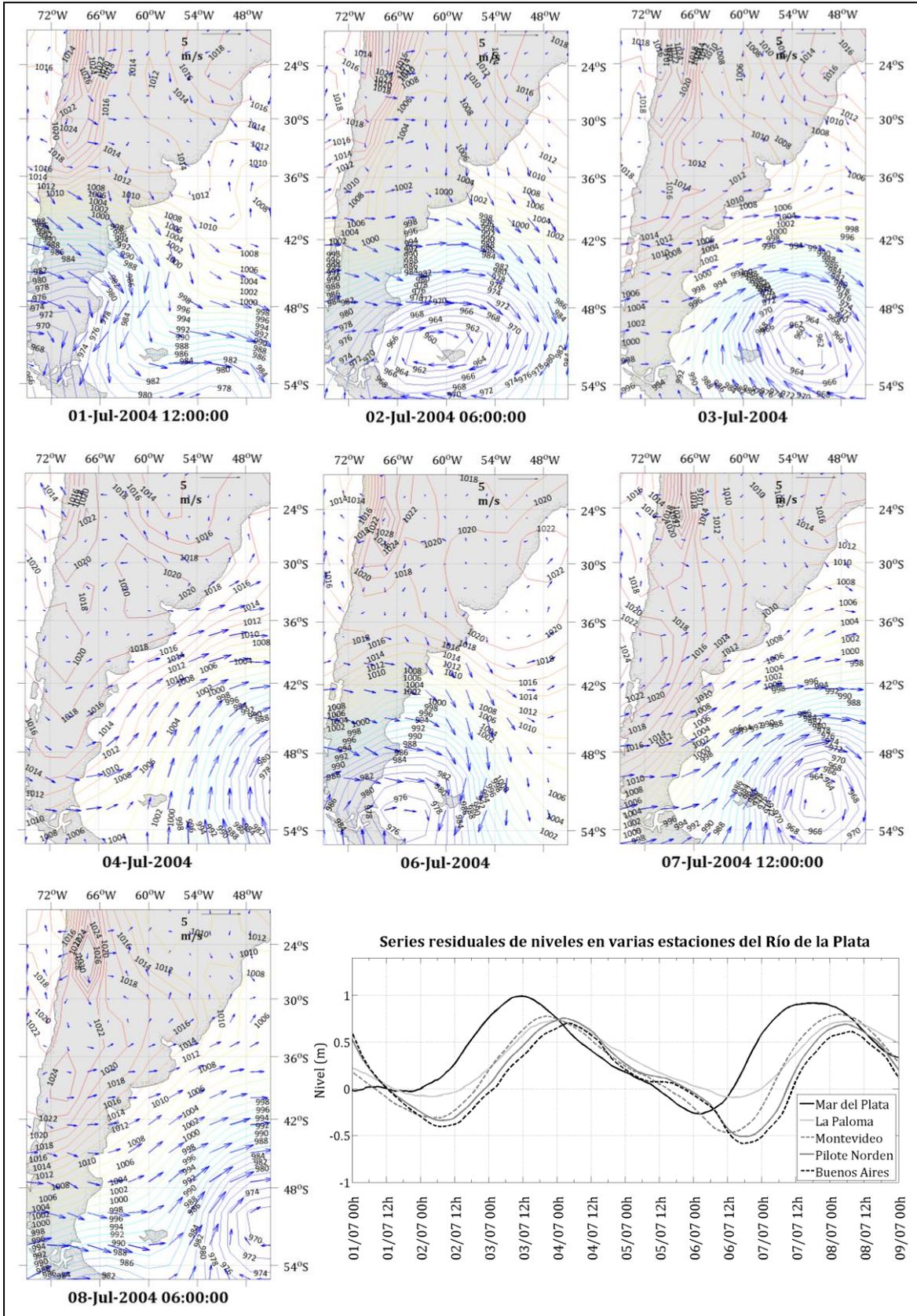


Figura 91: Evolución de los forzantes a escala sinóptica para los eventos ocurridos entre el 01 y 09 de agosto de 2004.

En la Figura 91 se presentan dos eventos ocurridos los primeros días del mes de julio de 2004, estos eventos fueron mencionados en el apartado anterior y presentan la particularidad de ser dos eventos muy claros y consecutivos que incluso podrían parecer parte de una misma oscilación, sin embargo como se verá están asociados a forzantes independientes. Además, ambos en eventos no se observa una amplificación de la señal registrada en Mar del Plata hacia las estaciones interiores. El 01/07 12hs, previo a la ocurrencia del primer evento de niveles mínimos, se tienen vientos de poca intensidad en el Río de la Plata mientras que sobre el sur Argentino y Chileno un extenso centro de baja presión induce vientos hacia el SW en la plataforma continental argentina. El 02/07 a las 06hs, instante en que se alcanza en nivel mínimo del primer evento en las estaciones interiores al Río de la Plata, se presentan vientos del N de poca intensidad sobre el estuario, mientras que el centro de baja presión, muy profundo, se ha desplazado al este manteniéndose en latitudes altas (53°S aprox.) y genera vientos del W en la plataforma. El día 03/07 a las 00hs, momento en que los niveles ya han comenzado a subir en todas las estaciones, hay leves vientos del S en el Río de la Plata y el centro de baja presión siguió en su desplazamiento al E manteniendo su latitud y generando vientos del SW en la plataforma continental argentina. Posteriormente en el momento en que se alcanzan los máximos niveles en el Río de la Plata (04/07 00hs) los vientos sobre el estuario son del W, mientras que el centro de baja presión se siguió alejando del continente e induce vientos del SW en toda la plataforma. Dos días después los niveles vienen en franco descenso y previo a la ocurrencia del nivel mínimo (06/07 00hs) se observa que un nuevo centro de baja presión de similares características al anterior se mueve de igual forma, generando vientos al E – SE en la plataforma continental argentina. De igual forma previo a la ocurrencia del evento de niveles máximos (07/07 12hs) el centro de baja presión se ha desplazado al E generando vientos del SW en la plataforma y en el instante en que se alcanza el máximo persiste esa situación (08/07 06hs). Es interesante notar que, como se observa en la Figura 88, la componente SE del viento en ningún momento toma valores positivos significativos. De hecho toma valores negativos durante los instantes de niveles máximos, lo que sumado a los valores positivos de la componente SW resulta en vientos del W. El hecho es que estos eventos presentan la particularidad de no sufrir una amplificación desde la estación Mar del Plata hacia las estaciones anteriores, y se puede pensar que eso tiene que ver justamente con el aporte que el viento local puede estar realizando y que en este caso estuvo ausente.

El siguiente evento que se presenta como ejemplo en la Figura 92, muestra justamente la situación contraria, un evento que sufre una amplificación significativa de Mar del Plata a Buenos Aires. Dos días antes del evento (13/01 12hs) la situación sinóptica presentan un centro de alta presión al este del Río de la Plata, y una zona de baja presión en latitudes altas, los vientos en el estuario son del NE con poca intensidad y en la plataforma del SW. El 14/01 18hs instante en que ya casi se presentan el nivel máximo de la perturbación en la estación Mar del Plata y comienza a ingresar al estuario, la situación es que la zona de baja presión en latitudes altas se ha extendido sobre el océano y genera marcados vientos del SW sobre la plataforma, mientras que un centro de alta presión comienza a aparecer al W sobre la cordillera. En el instante en que la perturbación alcanza las estaciones interiores con su nivel máximo (15/01 12hs) el centro de alta presión se ubicó al SW del estuario sobre la pampa argentina induciendo fuertes vientos

del S-SE sobre el estuario y vientos del NW en el sur de la plataforma argentina. Por último, luego de la ocurrencia del evento, el 16/01 12hs cuando los niveles han descendido, el centro de alta presión se ha desplazado al este ubicándose sobre el océano al sureste del Río de la Plata observándose vientos de poca intensidad en el estuario y vientos del W y NW sobre el sur la plataforma continental argentina. Este es uno de los eventos que claramente insinúan que una perturbación de poca amplitud puede ser amplificada significativamente por vientos locales del S – SE.

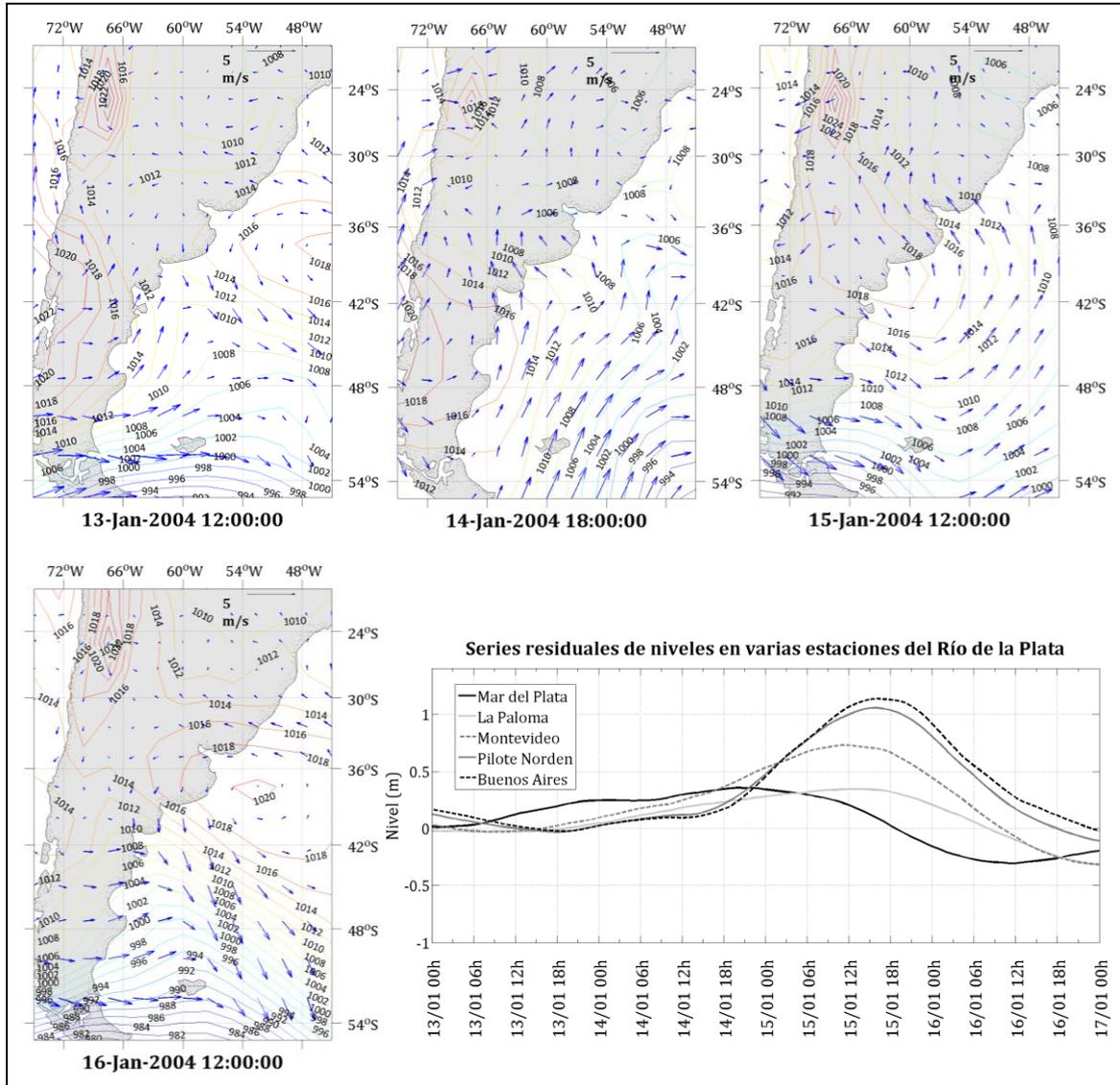


Figura 92: Evolución de los forzantes a escala sinóptica para el evento ocurrido entre el 13 y 16 de enero de 2004.

El evento de la Figura 93 muestra una situación típica caracterizada por un ciclón que se forma al sur de Argentina y luego se desplaza sobre el océano en dirección NE. Durante ese recorrido se dan varias situaciones, en una primera instancia (17/04 18hs) el ciclón induce vientos del NW en la plataforma, previo a la observación de niveles mínimos en las estaciones mareográficas. El 18/04 06hs cuando el nivel mínimo se alcanzó en Mar del Plata el centro de baja presión se encuentra situado sobre el sur de la plataforma. Doce horas después, cuando el nivel mínimo se alcanza en las estaciones interiores, el ciclón se ha desplazado al NE alejándose de la costa de forma tal que sobre la plataforma ocurren vientos del

SW. Luego el ciclón sigue alejándose del continente en dirección este y se mantienen los vientos del SW en la plataforma y sobre el estuario.

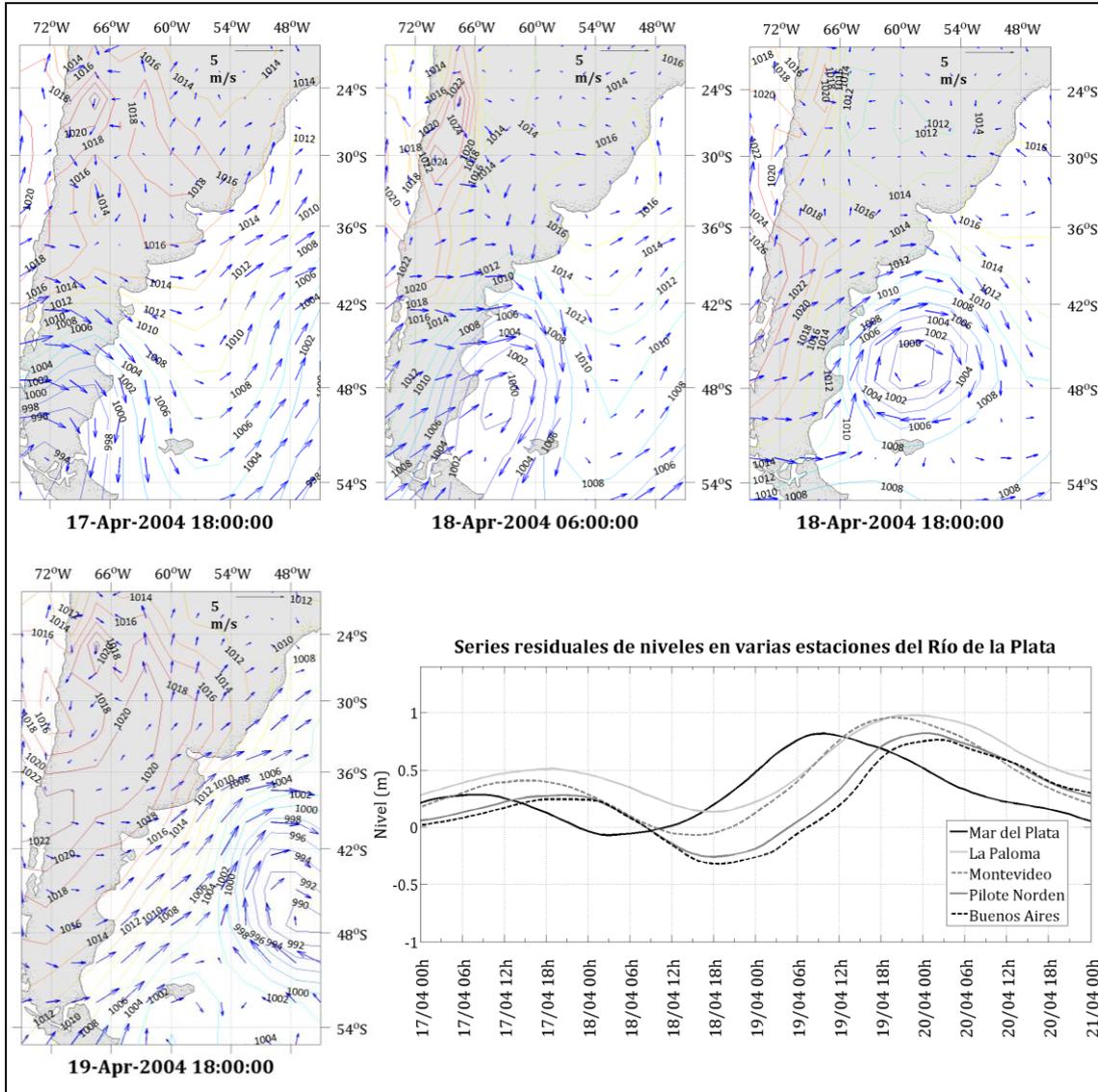


Figura 93: Evolución de los forzantes a escala sinóptica para el evento ocurrido entre el 18 y 21 de abril de 2004.

En la Figura 94 se muestra un evento de características similares al anterior, donde el rol fundamental lo tiene un profundo ciclón que se genera en el sur argentino y se desplaza sobre el océano recostado al continente en dirección NE. El evento que genera en las series residuales de niveles no tiene una amplitud muy importante, pero fue incluido en estos ejemplos a los efectos de mostrar una de las situaciones típicas que se observan. La descripción de la situación sinóptica durante el evento es análoga a la anterior con la única diferencia de que el ciclón se desplaza en dirección NE en lugar de E sobre el océano y alcanza latitudes más bajas.

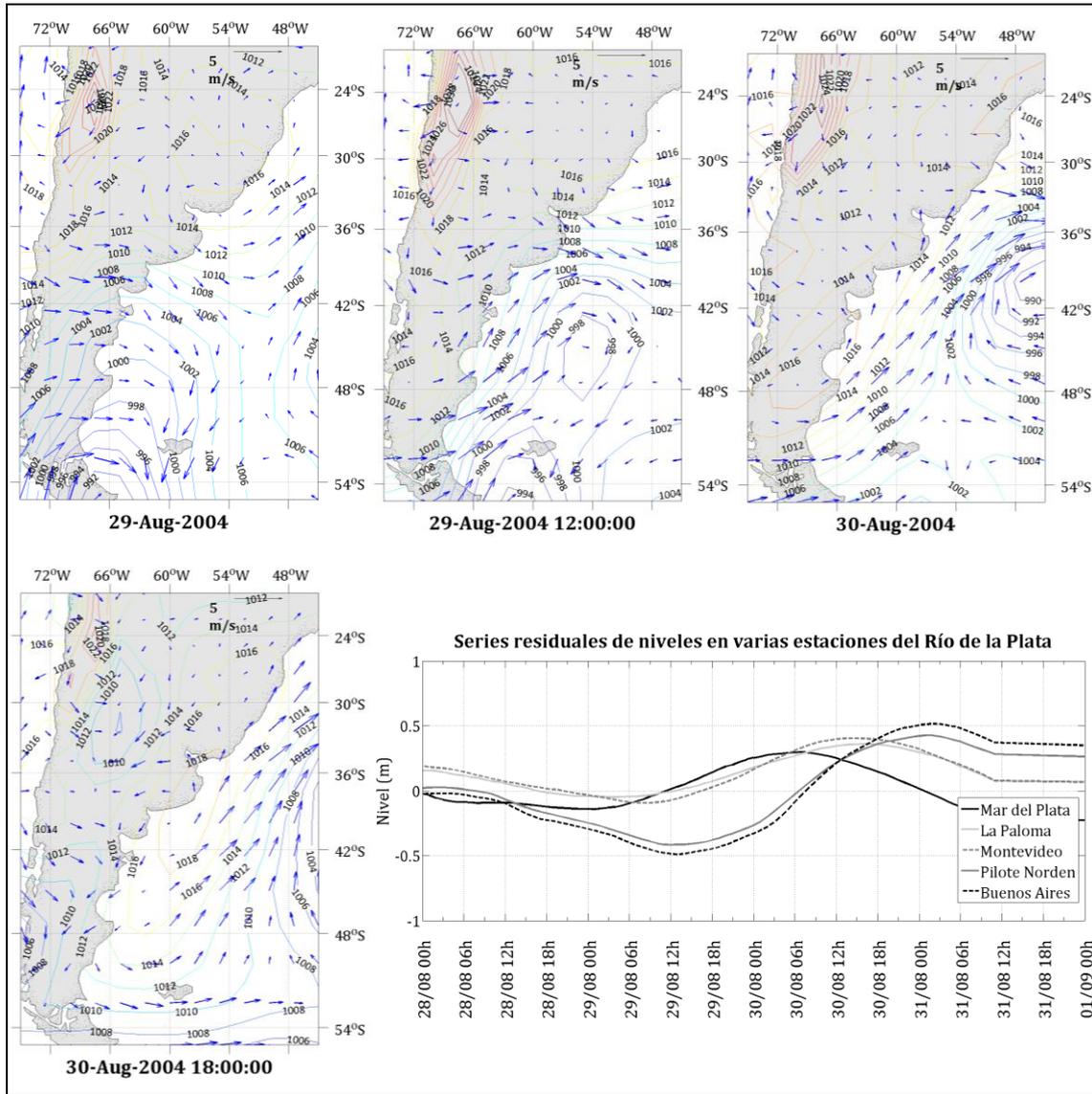


Figura 94: Evolución de los forzantes a escala sinóptica para el evento ocurrido entre el 28 de agosto y 01 de setiembre de 2004.

Finalmente se describen a continuación los dos eventos de características particulares ocurridos entre el 21 y 28 mayo de 2004. El primero de ellos se muestra en la Figura 95. Tal como fue descrito en el apartado anterior este evento tiene la particularidad de hacerse presente únicamente en las estaciones interiores. Como se puede ver el mismo no es registrado en las estaciones de Mar del Plata, La Paloma y Punta del Este. La situación sinóptica durante los días previos y durante el evento es muy similar, y consiste en un gran centro de alta presión ubicado sobre el océano Atlántico cuya circulación anti ciclónica induce vientos relativamente intensos provenientes del SE - E durante varios días. Tal como se mencionó anteriormente, el hecho de que el evento no se presente en las estaciones exteriores sumado a las características del viento hacen pensar que el efecto local de este último sobre el estuario sea el responsable de la generación del evento.

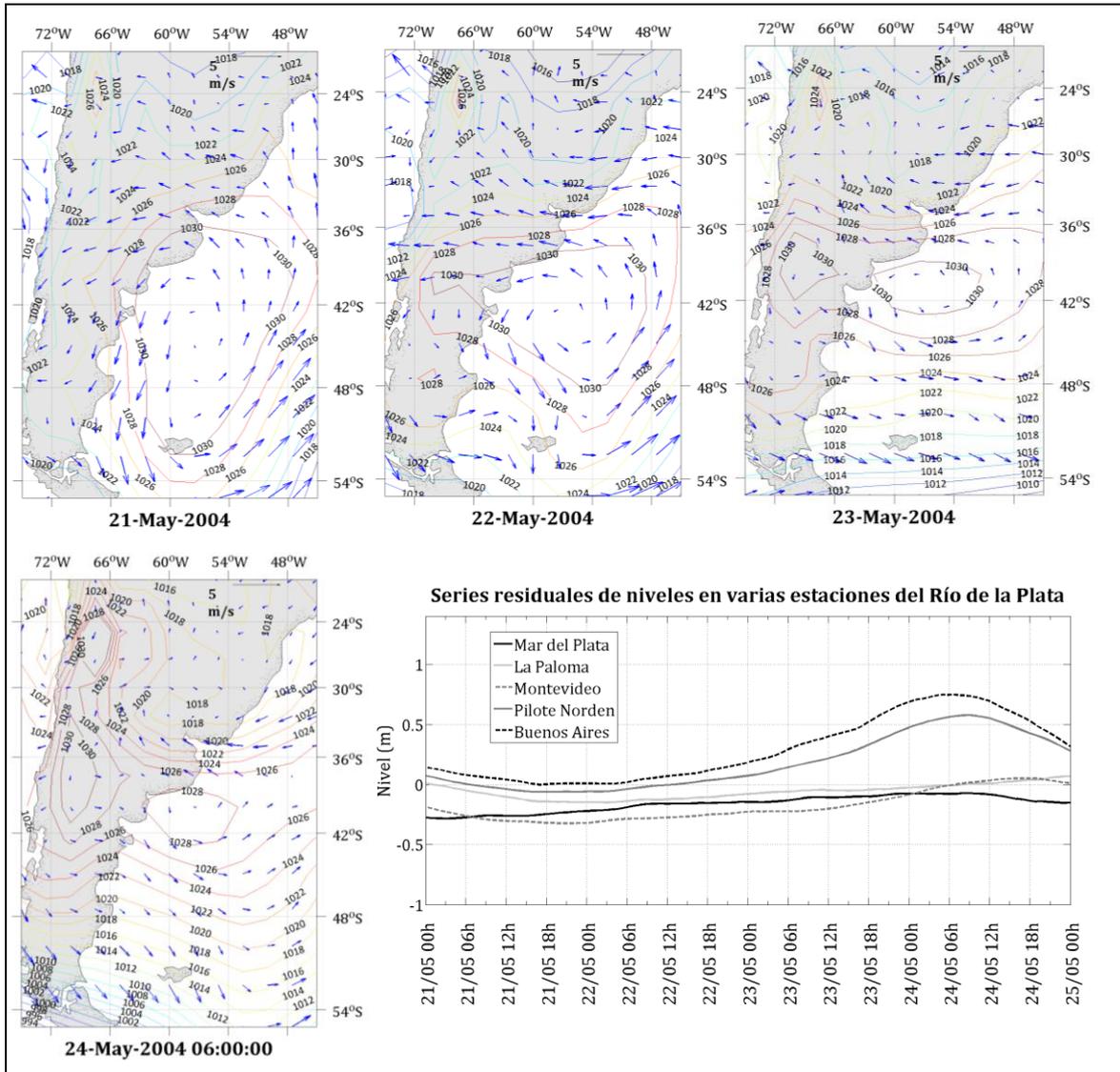


Figura 95: Evolución de los forzantes a escala sinóptica para el evento ocurrido entre el 21 y 25 de mayo de 2004.

Finalmente en la Figura 96 se presenta el segundo evento con singulares características ocurrido entre los días 25 y 28 de mayo de 2004. Este evento ya mencionado reiteradas veces en apartados anteriores, presenta la peculiaridad de propagarse de forma inusualmente rápida. Como se mostró en el apartado IV-3.2 el tiempo de viaje promedio entre las estaciones Mar del Plata y Buenos Aires es de aproximadamente 17 horas, mientras que en este evento el nivel máximo tardó únicamente 8 horas en propagarse de una estación a la otra.

La situación sinóptica que dio lugar a este eventos es la siguiente, el 25/05 aún se visualiza el centro de alta presión descrito en el evento anterior y que genera vientos del ESE sobre el Río de la Plata. Por otra parte en latitudes altas, al sur del continente, se extiende una región de baja presión que junto con el centro de alta presión en 40°S generan vientos del W sobre la plataforma continental argentina. El mismo día a las 18 horas, el centro de alta presión se ha ido al E y ya no se visualiza en la figura y un centro de baja presión generado en el sur de Brasil se desplaza hacia él SE generando vientos del SE sobre el estuario. El 26/05 a las 12hs el centro de baja presión se ha desplazado al este y comienza a integrarse con la

región de baja presión que existe en latitudes altas, en ese momento los vientos son del S - SW en toda la plataforma y el río. Finalmente el 7/05 06hs, instante en el nivel máximo alcanza las estaciones interiores, la región de baja presión en latitudes altas se ha extendido y unificado con el ciclón generando una extensa región de baja presión sobre todo el océano Atlántico que induce vientos del SW en toda la plataforma.

Esta descripción de los forzantes es coherente con las observaciones realizadas hasta el momento en relación a la existencia de vientos SW en la plataforma como factor determinante en la generación de los eventos máximos, y la no amplificación del evento en ausencia de vientos con componente SE. Sin embargo, no resulta claro por qué razones el evento se propagó dentro del estuario con la velocidad observada.

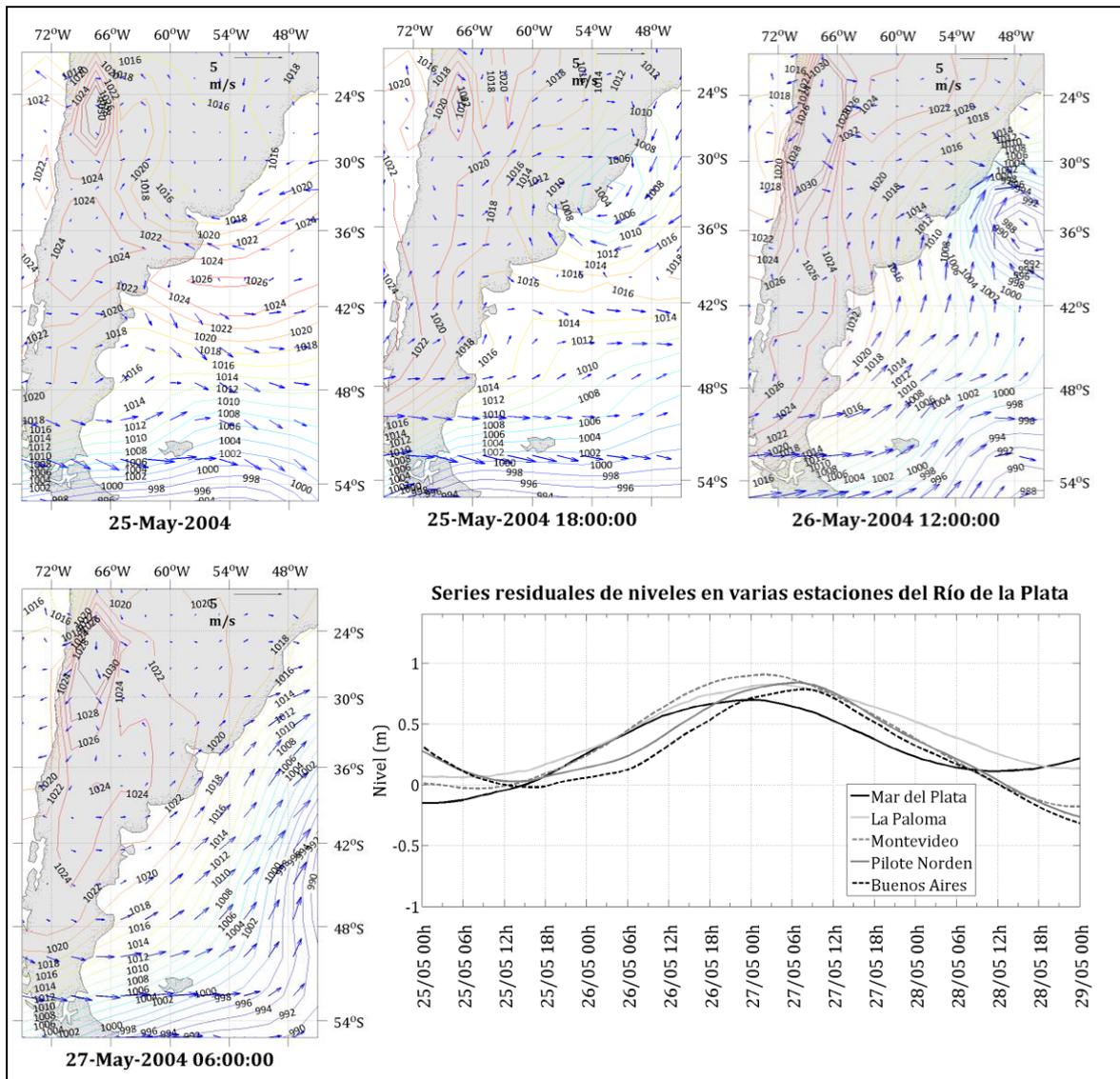


Figura 96: Evolución de los forzantes a escala sinóptica para el evento ocurrido entre el 25 y 28 de mayo de 2004.

V-5. Síntesis

Este capítulo fue destinado a incorporar en el análisis de niveles residuales en el Río de la Plata a los forzantes atmosféricos, buscando comprender el rol que juegan en la generación y propagación de los eventos estudiados en la serie residual de niveles. Un primer análisis centrado en los eventos extremos tanto de niveles máximos como mínimos permitió obtener los campos medios de viento y presión asociados mediante la técnica de composites. Los resultados obtenidos son consistentes con los obtenidos en varios estudios antecedentes de científicos de la región.

Si bien dichos resultados son importantes presentan la falencia de ser campos de variables atmosféricas calculados a partir de datos prácticamente simultáneos al instante de nivel máximo o mínimo en alguna estación interior al Río de la Plata, por tanto no incluyen información acerca de la evolución temporal previa del forzante. Esta última es la que para este trabajo es de interés, ya que determina cómo es la génesis de las ondas de tormenta que llegan al Río de la Plata. Un análisis de las series de viento en la estación Pilote Norden junto con las series residuales de niveles sugiere que los vientos provenientes del SW tienen un rol importante en la generación de los eventos de niveles máximos. Por otro lado en los casos en que el evento es acompañado por vientos significativos del SE parece experimentar una amplificación significativa desde la estación de Mar del Plata a Buenos Aires.

Finalmente estas observaciones realizadas en base a series puntuales en el espacio fueron complementadas con el análisis de los propios campos de viento y presión de Re-analysis durante varios eventos del año 2004. Se presentaron a modo de ejemplos algunos de los casos más representativos de situaciones sinópticas que generaron eventos con amplitudes significativas. Nuevamente quedó de manifiesto que los eventos de niveles máximos son precedidos por vientos del SW, los cuales en general se dan sobre la plataforma continental y simultáneamente o poco después se dan en el estuario y de allí que se vieran reflejados en las series de viento en Pilote Norden. En los ejemplos vistos este tipo de vientos se generan bajo dos configuraciones típicas, la primera son centros de alta presión con una circulación anticiclónica a su alrededor que se desplazan de W a E sobre el continente sobre la pampa argentina y generan primero vientos del SW en la plataforma dando lugar a un evento de niveles máximos y cuando dejan atrás la el continente inducen vientos del NE-N que inducen niveles por debajo de lo normal. Por otro lado centros de baja presión que se generan en latitudes altas y se mueven en dirección NE sobre el océano recostados al continente generan fuertes vientos del SW en la plataforma dando lugar a eventos de niveles máximos. Las observaciones realizadas son de carácter cualitativo y se basan en las observaciones de un conjunto de eventos durante un año en particular; está claro que existe una infinidad de variantes posibles a las situaciones antes descritas. Sin embargo, una gran cantidad de los eventos de dicho año que aquí no se presentan siguen un comportamiento de similares características dando cierta solidez a las conclusiones aquí extraídas.

En el siguiente capítulo se utilizará un modelo numérico que ha sido calibrado y validado para representar los niveles en el Río de la Plata, a los efectos de

comprender mejor aún cuál es exactamente el rol de los forzantes y como se generan las ondas de tormenta. La enorme ventaja que presenta la simulación numérica es su flexibilidad a la hora de evaluar el efecto aislado de los dos forzantes considerados, la posibilidad de estudiar su influencia a escala local y regional en forma diferenciada, todo esto pudiendo conocer el comportamiento del cuerpo de agua en un dominio muy extenso y no solo en ocho puntos de la zona como se realizo utilizando las mediciones.

-- Capítulo VI --

Simulaciones numéricas

VI-1.	Introducción.....	127
VI-2.	Características generales del modelo MOHID.....	127
VI-3.	Implementación del modelo.....	128
	VI-3.1. Dominio simulado.....	128
	VI-3.2. Condiciones de borde.....	132
VI-4.	Calibración y validación del modelo.....	138
	VI-4.1. Calibración con marea astronómica.....	139
	VI-4.2. Calibración y validación con marea real.....	142
VI-5.	Caracterización de los eventos y forzantes durante el período simulado.....	144
	VI-5.1. Eventos en las series residuales de niveles y su vinculación con el viento en Pilote Norden.....	145
	VI-5.2. Situación sinóptica durante los eventos simulados.....	146
VI-6.	Simulaciones realizadas.....	151
	VI-6.1. Metodología.....	151
	VI-6.2. Respuesta del modelo regional a los forzantes atmosféricos.....	152
	VI-6.3. Influencia del forzante local en el Río de la Plata.....	165
VI-7.	Síntesis.....	166

VI-1. Introducción

Este capítulo aborda la utilización de herramientas numéricas para el estudio de la marea meteorológica en el Río de la Plata. La utilización de modelos numéricos para la simulación de la hidrodinámica del Río de la Plata presenta varias ventajas. En primer lugar el modelo numérico se basa en la resolución de las ecuaciones que gobiernan la física de sistema y por tanto es posible utilizarlo como herramienta para la comprensión de los distintos mecanismos de generación y propagación de las ondas de marea. En segundo lugar permite realizar simulaciones idealizadas, por ejemplo, incluyendo los distintos forzantes por separado y de esa forma evaluar su contribución en forma aislada. A su vez implementando dominios en distintas escalas espaciales, por ejemplo un dominio de escala regional y otro de escala local en el Río de la Plata, es posible evaluar la influencia de los forzantes en cada escala.

A los efectos de este estudio se utilizó la implementación desarrollada en el marco del proyecto PDT "Modelo pre-operacional del Río de la Plata Río Uruguay". Una detallada descripción de dicha implementación se encuentra en informe final del proyecto (Piedra-Cueva et al., 2008), por una versión más sintética ver Santoro et al. (2011). Aquí se presenta una descripción del modelo hidrodinámico, por su importancia en este estudio, y una descripción básica de la implementación, calibración y validación del modelo extraída de las referencias mencionadas. La motivación para usar esta implementación no solamente consiste en aprovechar el enorme volumen de trabajo ya realizado, se debe tener presente que la motivación para realizar este estudio parte de cuestionamientos planteados durante el desarrollo de dicha herramienta pre-operacional. De esta forma, nada mejor que utilizar dicha implementación para evaluar su respuesta a los distintos forzantes y su capacidad de representar la marea meteorológica.

Debido a la disponibilidad de condiciones de borde el período simulado corresponde al año 2007. Por esta razón luego de presentar la descripción del modelo y los detalles de su implementación, se presenta una breve caracterización de los eventos ocurridos en la serie residual de niveles durante el período simulado.

Finalmente se presentan dos conjuntos de simulaciones, el primero de ellos es presentado en el apartado VI-6.2 y busca revelar como es el mecanismo a escala regional por el cual se generan las ondas de marea meteorológica que llegan al Río de la Plata. Los resultados del modelo permiten conocer la respuesta del cuerpo de agua en un dominio de escala regional, lo cual es de suma importancia a los efectos de completar las ideas desarrolladas en los capítulos anteriores. El segundo conjunto de simulaciones presentadas en el apartado VI-6.3, tienen por objetivo evaluar cual es el peso del forzantes local frente al efecto del forzante remoto en el Río de la Plata.

VI-2. Características generales del modelo MOHID

El MOHID es un modelo de flujo a superficie libre tridimensional baroclínico basado en las ecuaciones de Navier-Stokes y con las aproximaciones de Boussinesq e hidrostática. La malla tridimensional está formulada con una aproximación de

volúmenes finitos con coordenada vertical sigma o cartesiana u otras que permiten una buena simulación de los efectos topográficos. La discretización temporal implícita ADI (Alternating Direction Implicit) utiliza una grilla desfasada, permitiendo solucionar problemas de estabilidad que ocurren en métodos explícitos y obteniendo una resolución más simple debido al uso de matrices tridiagonales en el cálculo de la elevación de la superficie libre y velocidades horizontales. El término de la fuerza de Coriolis y el transporte horizontal se resuelven explícitamente, mientras que el modelo utiliza un algoritmo implícito para resolver los términos de presión y el transporte vertical.

Una característica importante del modelo MOHID es que permite utilizar modelos encajados. A través de esta metodología, es posible anidar grillas de resolución espacial creciente, forzando los modelos locales con resultados de aplicaciones de mayor escala. De esta forma, el modelo permite estudiar áreas cada vez más cercanas a la región de interés, obteniendo las condiciones de borde del modelo "padre".

El MOHID ha sido aplicado con éxito en varias zonas costeras y estuarios demostrando una gran capacidad para simular flujos con comportamientos complejos (Taboada et al., 1998; Montero, 1999; Martins et al., 2001; Ruiz-Villareal et al, 2002).

En el anexo X-3 se presenta una descripción detallada de las ecuaciones del modelo, su discretización y el tratamiento de las condiciones iniciales y de borde.

VI-3. Implementación del modelo

VI-3.1. Dominio simulado

Para la implementación del MOHID en un área determinada se deben introducir una serie de datos iniciales y de contorno particulares del área que se pretende simular. El primer paso es generar una malla de cálculo y conocer la batimetría de la región delimitada por la malla. En este punto se presentan todas las características de la implementación del modelo MOHID para representar el flujo en la región sur del océano Atlántico.

Es importante mencionar que no se realizó una modelación hidrodinámica tridimensional baroclínica para simular el efecto de la marea a escala del Atlántico sur, sino que se utilizó un esquema simplificado del modelo hidrodinámico, bidimensional y barotrópico en el cual no se consideran las variaciones en la dirección vertical ni los gradientes de salinidad y temperatura. Diversos antecedentes en la región (Glorioso et al., 1995; Simionato et al., 2006; Etala, 2009; Saraceno, 2010) muestran que aún bajo este tipo de simplificaciones se puede obtener una buena representación de la evolución de los niveles en el Río de la Plata. Además un modelo regional bidimensional presenta la ventaja de tener un menor costo computacional y no requerir de condiciones de borde de salinidad y temperatura, las cuales presentan ciertas dificultades.

Por otra parte, tal como se mencionó anteriormente el modelo MOHID trabaja con la técnica de modelos encajados permitiendo refinar sucesivamente la resolución espacial utilizando dominios anidados. En este trabajo se utilizó un dominio padre

que cubre gran parte del océano Atlántico Sur (modelo regional) y un dominio hijo de mayor resolución enfocado en el Río de la Plata (submodelo).

VI-3.1.1. Mallas de cálculo

Las mallas horizontales utilizadas en este trabajo de modelación se estructuraron bajo el sistema de coordenadas latitud-longitud. En el caso del modelo regional, la malla se extiende desde -60° latitud al sur, -20° longitud al este, -22° latitud al norte y -70° latitud al oeste. Geográficamente el límite oceánico sur se corresponde con un punto ubicado aproximadamente a 733 km al sur de Tierra del Fuego y la frontera norte se ubica aproximadamente a 166 km al norte de San Pablo. La frontera oceánica este se extiende aproximadamente 2.320 km desde el límite costero norte. Esta malla posee 150.131 nodos activos y presenta una resolución espacial de 0.1° (11,1 km aprox.). En la Figura 97 se presenta una imagen global de la malla de cálculo con líneas de división definidas cada 5 celdas para mejorar la visualización de la malla.



Figura 97: Malla de cálculo utilizada por el MOHID en el modelo regional (líneas de división cada 5 celdas).

En la Figura 98 se presenta un detalle de la malla horizontal correspondiente a la zona del Río de la Plata y el Frente Marítimo con líneas de división definidas cada 2 celdas.

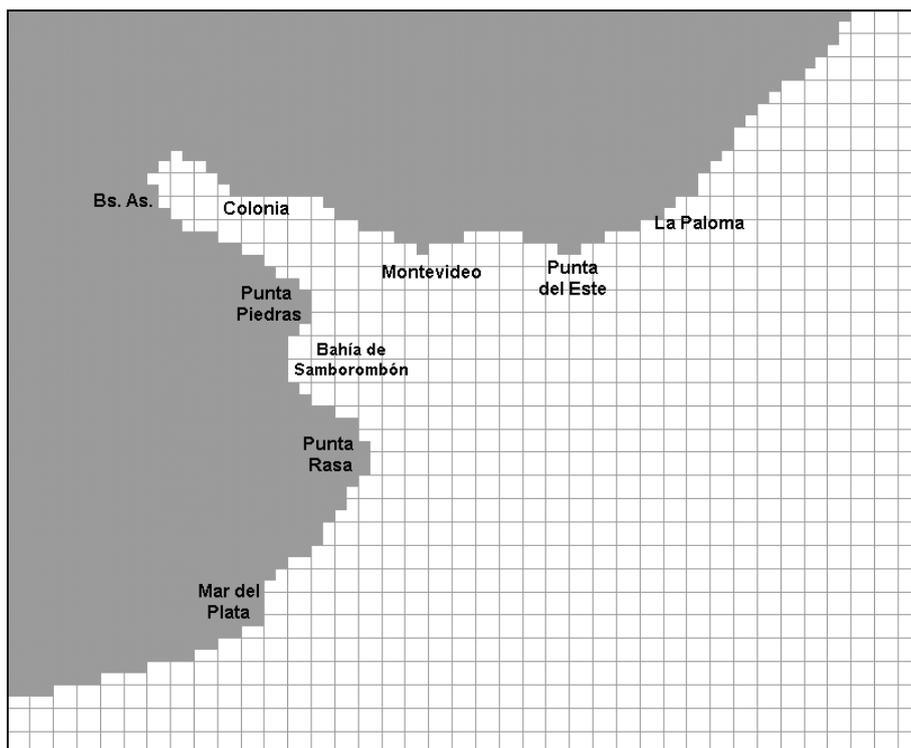


Figura 98: Detalle de la malla de cálculo del modelo regional en la zona del Río de la Plata. Líneas de división cada 2 celdas.

Por otra parte el submodelo también fue estructurado usando un sistema de coordenadas latitud-longitud, y cubre la región $[38,09^\circ; 33,76^\circ]$ Sur x $[54,10^\circ; 59,00^\circ]$ Oeste. La grilla horizontal tiene 9600 celdas activas y una resolución espacial de 0.033° (3,7 Km aprox.) el cual representa aproximadamente un tercio de la resolución utilizada en el modelo regional.

La coordenada vertical escogida en ambos modelos para discretizar el dominio en la dirección vertical es de tipo sigma, la cual permite una mejor resolución en un dominio con importantes variaciones topográficas. La profundidad con esta coordenada varía entre 0 y 1, siendo igual a 1 en la superficie libre e igual a 0 en el fondo. En todas las simulaciones realizadas se utilizó una única capa sigma ya que como fue mencionado anteriormente la representación es de tipo bidimensional.

VI-3.1.2. Batimetría y línea de costa

Una vez estructurada la malla de cálculo, se definieron la batimetría de la región y la línea de costa para cada modelo. Para representar la batimetría del área de interés en ambos casos fueron utilizados datos batimétricos digitalizados extraídos del General Bathymetric Chart of the Ocean (GEBCO) para todo el dominio con una resolución de 0.06° y una serie de datos de batimetría provistos por el Servicio de Hidrografía Naval de la Argentina para la zona del Río de la Plata con una mayor resolución. Para representar la línea de costa de la región de estudio se utilizaron datos extraídos del NOAA/NGDC Marine Geology and Geophysics Division.

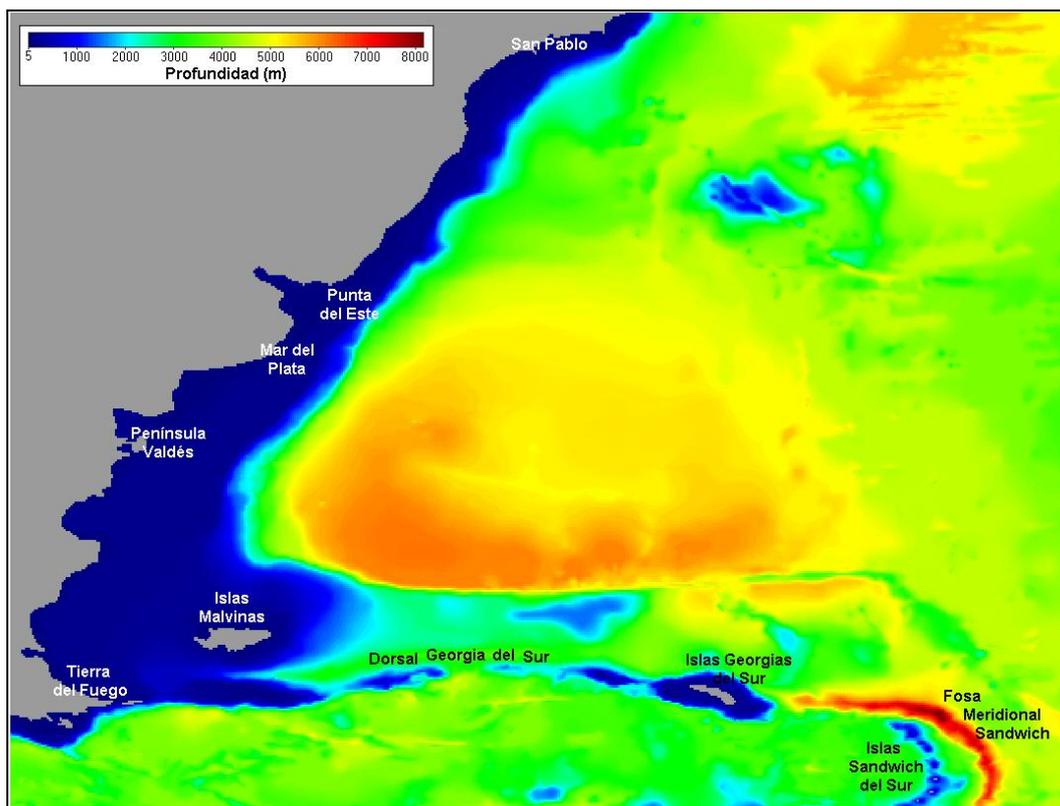


Figura 99: Figura 2.5: Batimetría del dominio de cálculo.

En la Figura 99 se presenta la batimetría de todo el dominio de cálculo ingresada al modelo en la cual puede observarse la correcta representación de las zonas costeras así como de las unidades morfológicas más importantes de la zona, como ser la dorsal Georgia del Sur y la fosa meridional Sándwich en la cual se alcanza la mayor profundidad de todo el dominio (8.015 m). También puede observarse en la Figura 99 una gran variación de profundidades en el dominio modelado distinguiéndose tres grandes zonas: la zona oceánica donde las profundidades son del orden de los 5.000 metros, la zona de la plataforma continental donde las profundidades son del orden de los 1.000 metros y la zona costera en la cual las profundidades se reducen a cero.

En la Figura 100 se presenta un detalle de la batimetría ingresada al modelo correspondiente a la zona del Río de la Plata y el Frente Marítimo. Se observa la correcta representación de la línea de costa así como de las unidades morfológicas características de esta zona como ser Playa Honda (prolongación subacuática del delta del río Paraná limitada por la isóbata de 6 m), Barra del Indio (planicie suave y amplia que se desprende en dirección Noreste de la costa argentina entre Punta Indio y Punta Piedras), el Banco Ortiz, etc.

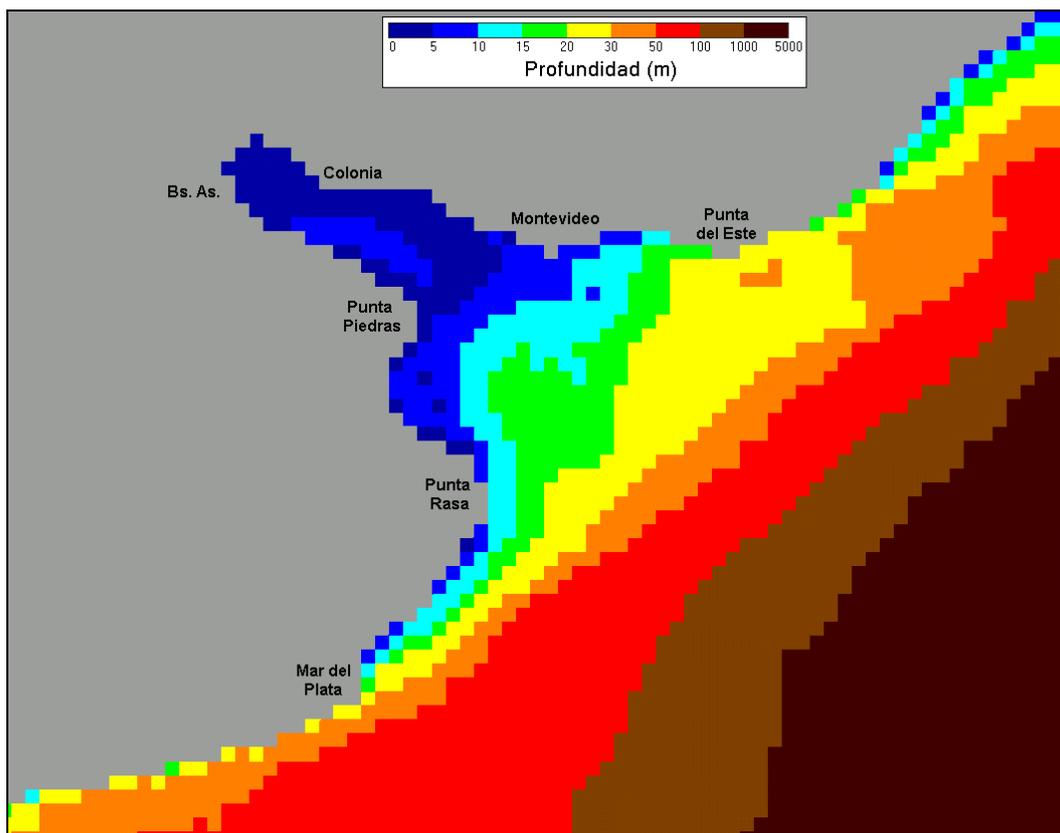


Figura 100: Figura 2.6: Detalle de la batimetría ingresada al modelo en la zona del Río de la Plata y Frente Marítimo.

VI-3.2. Condiciones de borde

El sistema de ecuaciones en que se basa el modelo para el cálculo de la elevación de la superficie libre y de la velocidad es de naturaleza parabólica, por lo que son necesarias condiciones iniciales en todo el dominio y condiciones de borde durante toda la simulación para resolver el sistema.

VI-3.2.1. Caudal fluvial

La frontera oeste del dominio de cálculo incluye una sección de aporte de caudal fluvial de los ríos Paraná y Uruguay. En el modelo MOHID dicho aporte es representado como una condición de borde correspondiente a un caudal de entrada determinado. Este ingreso de caudal se divide en dos secciones diferentes, una correspondiente al ingreso del flujo de los ríos Paraná – Guazú y Uruguay y otra sección por donde ingresa el caudal del río Paraná – Las Palmas. En la Figura 101 se muestran las secciones por donde ingresa el caudal fluvial al dominio de cálculo del modelo regional.

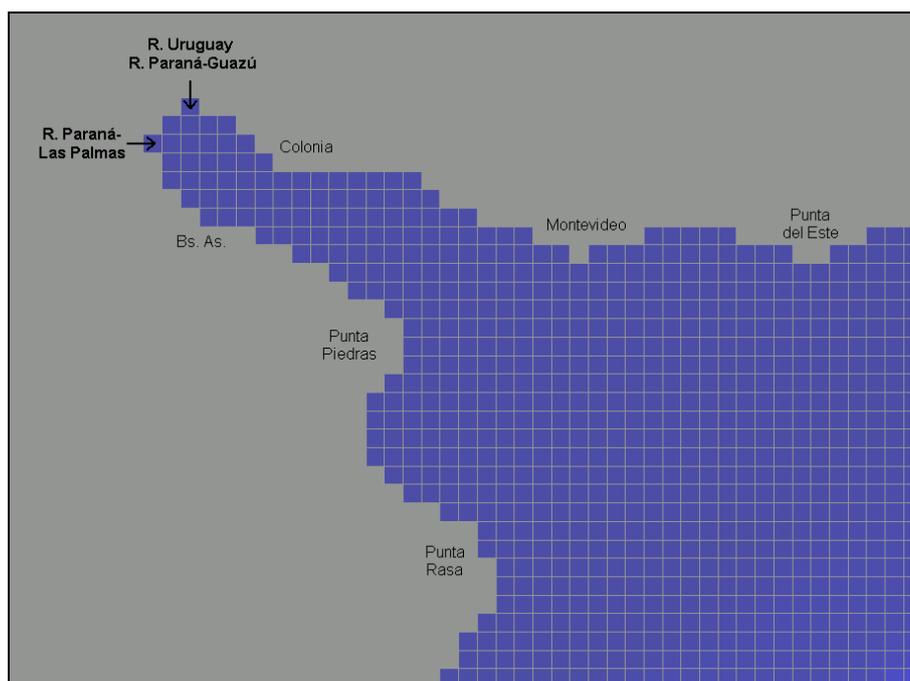


Figura 101: Figura 2.9: Secciones por donde ingresa el caudal fluvial al dominio de cálculo del modelo regional.

El ingreso de caudal puede especificarse como un valor constante a lo largo del período de simulación o como una serie temporal variable a lo largo del tiempo. En las simulaciones realizadas para este trabajo se adoptó un caudal de ingreso constante en cada una de las secciones de aporte correspondiente al caudal medio anual de los ríos Paraná – Guazú, Uruguay y Paraná – Las Palmas. En la Tabla 27 se presentan los caudales fluviales de las tres secciones de aporte.

Río	Q (m ³ /s)
Paraná – Guazú y Uruguay	20.000
Paraná - Las Palmas	5.000

Tabla 27: Tabla 2.1: Caudales de ingreso en las secciones de aporte de caudal fluvial.

Por su mayor resolución espacial en el submodelo dichos flujos son impuestos a través de tres secciones.

VI-3.2.2. Elevación de la superficie libre

En la frontera oceánica del dominio de cálculo se debe especificar la elevación de la superficie libre. La elevación de la superficie libre puede imponerse como un valor constante en todo el período de simulación o puede especificarse como una serie temporal de nivel variable.

En las simulaciones realizadas para este trabajo, la condición de borde en la frontera oceánica fue utilizada para imponer el efecto de la marea astronómica sobre el dominio de cálculo del modelo regional. Para imponer el efecto de la marea astronómica se calcula la elevación de la superficie libre en 63 nodos, distribuidos en toda la frontera oceánica, a partir de la superposición de las siguientes 13 componentes armónicas de la marea: M2, N2, S2, K2, 2N2, O1, Q1, K1,

P1, Mf, Mm, Mtm, MSqm. A partir de los valores de nivel calculados en dichos nodos, el modelo interpola linealmente para cada paso de tiempo calculando así el nivel en los nodos restantes de dicha frontera.

El submodelo por otra parte recibe como condiciones de borde la solución interpolada del modelo regional, tanto superficie libre como velocidades. Se aplicó la condición de radiación de Flather (Flather, 1976) la cual permite la propagación de las ondas hacia el exterior del dominio:

$$v = v_r(t) \pm \frac{c}{H} \eta - \eta_r(t)$$

Ecuación 36

Donde η es el nivel de superficie libre calculado con el modelo, v_r y η_r los valores prescritos de velocidad normal y elevación de superficie libre en la frontera abierta, c es la velocidad de fase de las ondas y H la profundidad local. En este caso la solución de referencia prescrita es la obtenida a partir de la solución del modelo regional.

En la Tabla 28 se resumen las condiciones de borde utilizadas en ambos modelos.

Modelo	Superficie	Frontera abierta		Fronteras terrestres	Fondo
		ER			
Regional	Tensión rasante ejercida por el viento (CD variable) y presión atmosférica en superficie obtenidas del modelo WRF	Interpolación de η obtenida de FES2004	Blumberg & Kantha (Solución de referencia: η obtenida de FES2004, Td = 150-1500s)	Descargas de los Ríos Uruguay y Paraná (caudal constante Q). Componentes nulas de velocidad (U,V)	Tensión de rasante (Rugosidad absoluta = 0.0001)
Río de al Plata	Tensión rasante ejercida por el viento (CD variable) y presión atmosférica en superficie obtenidas del modelo WRF	Interpolación de η , U y V obtenidas del modelo regional	Flather (Solución de referencia: η & U,V obtenidas del modelo regional)	Descargas de los Ríos Uruguay y Paraná (caudal constante Q). Componentes nulas de velocidad (U,V)	Tensión de rasante (Rugosidad absoluta = 0.00065)
U,V	Componentes zonal y meridional de la velocidad				
ER	Esquema de Relajación				
CD	Coeficiente de "Drag"				

Tabla 28: Condiciones de borde del modelo regional y submodelo.

VI-3.2.3. Forzantes atmosféricos

Los principales forzantes a considerar en la modelación hidrodinámica de la circulación del Atlántico Sur y en particular en el Río de la Plata son el viento y la presión en superficie.

Dado que esta implementación fue realizada con objetivos operacionales, a los efectos de obtener los campos de viento y presión a ser utilizados como forzantes se utilizó el modelo atmosférico WRF (Weather Research & Forecasting) en lugar de otras fuentes posibles como podían haber sido los campos de Re-analysis.

En lo que sigue se presenta una muy breve descripción del modelo y su implementación del para el dominio de interés.

VI3.2.3.1. El modelo WRF

El modelo WRF fue desarrollado por varias agencias Norteamericanas entre ellas National Center of Atmospheric Research (NCAR), National Oceanic and Atmospheric Administration's (NOAA), National Centers for Environmental Prediction (NCEP) and Forecast System Laboratory (FSL), Air Force Weather Agency (AFWA) & Naval Research Laboratory (NRL), Center for Analysis and Prediction of Storms (CAPS) - University of Oklahoma, Federal Aviation Administration (FAA) y la comunidad universitaria de investigación. El modelo ofrece una diversidad de opciones para la parametrización de procesos físicos, además de sistemas avanzados de asimilación de datos que continúan siendo desarrollados y testeados en conjunto con el modelo. El mismo puede ser aplicado a diferentes escalas espaciales que van de algunos metros a miles de kilómetros. Por tanto este modelo es de utilidad en la obtención de previsiones numéricas del tiempo de carácter tanto operacional como de investigación.

La versión implementada consta de los siguientes módulos:

- WRFSI (WRF Standard Initialization)
- WRF V2.1 (Dynamic Solver)

El primero de estos módulos permite entre otras cosas definir el dominio a utilizar, generar datos "estáticos" tales como el uso de suelo, topografía, tipo de suelo, etc. interpolarlos al dominio de interés, así como preparar las condiciones iniciales y de borde a ser ingresadas al dominio a partir de datos de otro modelo de mayor escala.

El segundo módulo es el componente clave del sistema de modelación el cual está compuesto de varios programas de inicialización para simulaciones idealizadas y con datos reales, y el programa de integración numérica, cuyas principales características son:

- Ecuaciones no hidrostáticas completamente compresibles, con opción hidrostática
- Términos completos de Coriolis y curvatura
- Anidamiento en dos sentidos con múltiples anidamientos y niveles de anidado
- Anidamiento en un sentido
- Coordenada que sigue el terreno
- El espaciamiento vertical en la grilla puede variar con la altura
- Factores de escala para varias proyecciones:
 - Estereográfica polar
 - Lambert-conformal
 - Mercator
 - Grilla C de Arakawa
- Opciones de pasos de tiempo de Runge-Kutta de segundo y tercer orden
- Opciones de advección (horizontal y vertical) desde segundo a sexto orden

- Condiciones de borde laterales:
 - Casos idealizados: periódicos, simétricos, etc.
 - Casos reales: Especificados con zona de relajación
- Completas opciones físicas para superficie terrestre, capa límite planetaria, radiación, microfísica y parametrización de cúmulos.

VI3.2.3.2. Implementación

La implementación realizada tiene por objeto el acople con el modelo de circulación del Océano Atlántico MOHID a través del campo de vientos en 10m y la presión atmosférica en superficie. El dominio utilizado en este modelo cubre la región [61,5°; 19°] Oeste - [76°; 14°] Sur, con una resolución espacial de 60Km (ver Figura 102). Las condiciones de borde e iniciales fueron obtenidas a partir de los pronósticos del modelo global GFS. Se publican en el sitio web de NCEP cuatro pronósticos diarios (iniciados a las 00, 06, 12 y 18 UTC) con un horizonte de pronóstico de 180 horas, una resolución temporal de 3 horas y espacial de 1° * 1°.

La implementación fue realizada con las siguientes características:

- Capa límite de superficie : Monin-Obukhov (Monin & Obukhov, 1954)
- Capa límite : YSU (Hong & Pan, 1996)
- Transferencia radiante de Onda Larga : RRTM (Mlawer et al., 1997)
- Transferencia radiante de Onda Corta : MM5 (Dudhia, 1989)
- Parametrización de convección húmeda: Kain-Fritsch (Kain & Fritsch, 1993)
- Esquema de microfísica de nubes: WSM3 (Hong et al., 2004)

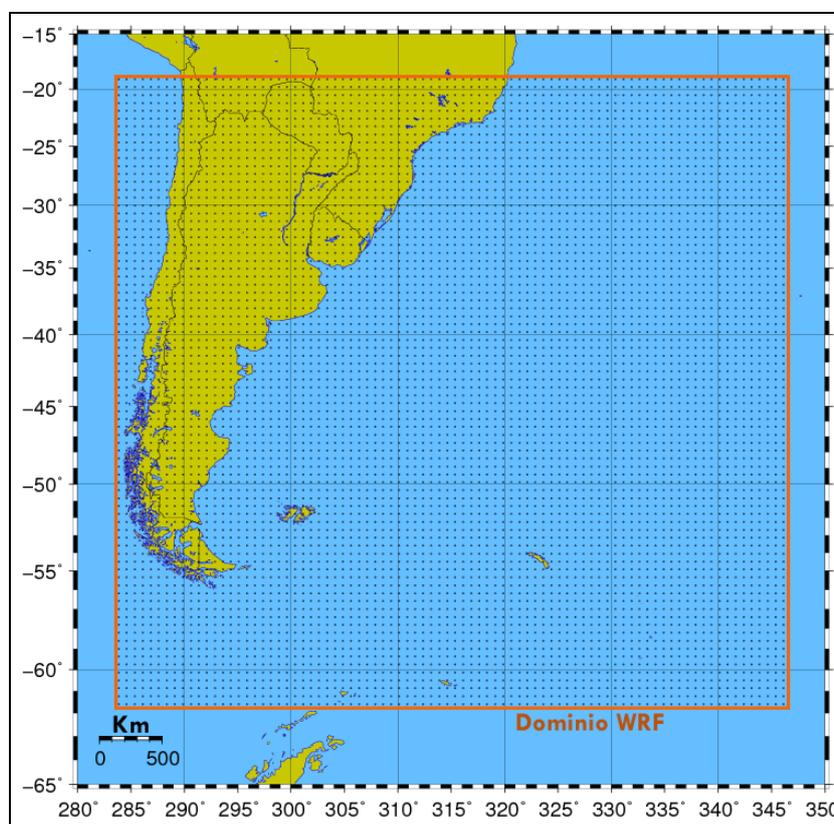


Figura 102: Domino utilizado por el modelo WRF, grilla horizontal con resolución de 60Km.

Lamentablemente los datos de pronósticos de GFS de NCEP no se encuentran disponibles para el año 2004. Por esta razón el período simulado se acotó a los meses de mayo y junio de del año 2007, para el cual se cuenta con datos de niveles registrados en varias estaciones mareográficas del Río de la Plata.

Las simulaciones realizadas tienen inicio a las 00 UTC y una duración de 96 horas, guardando resultados cada 3 horas. Los dos meses simulados fueron formados a partir de simulaciones consecutivas de 96 horas. Si bien a los efectos de este estudio no tiene interés utilizar esta modalidad de simulación en la que se realizan pronósticos retrospectivos, interesa trabajar con dicha implementación a los efectos de continuar con el desarrollo y comprensión de las capacidades es de esta herramienta.

VI3.2.3.3. Validación

A los efectos de evaluar cualitativamente la calidad de los resultados obtenidos con el modelo WRF, se muestra a continuación una comparación entre las series simuladas de viento con las series observadas en las estaciones Punta Brava y Pilote Norden.

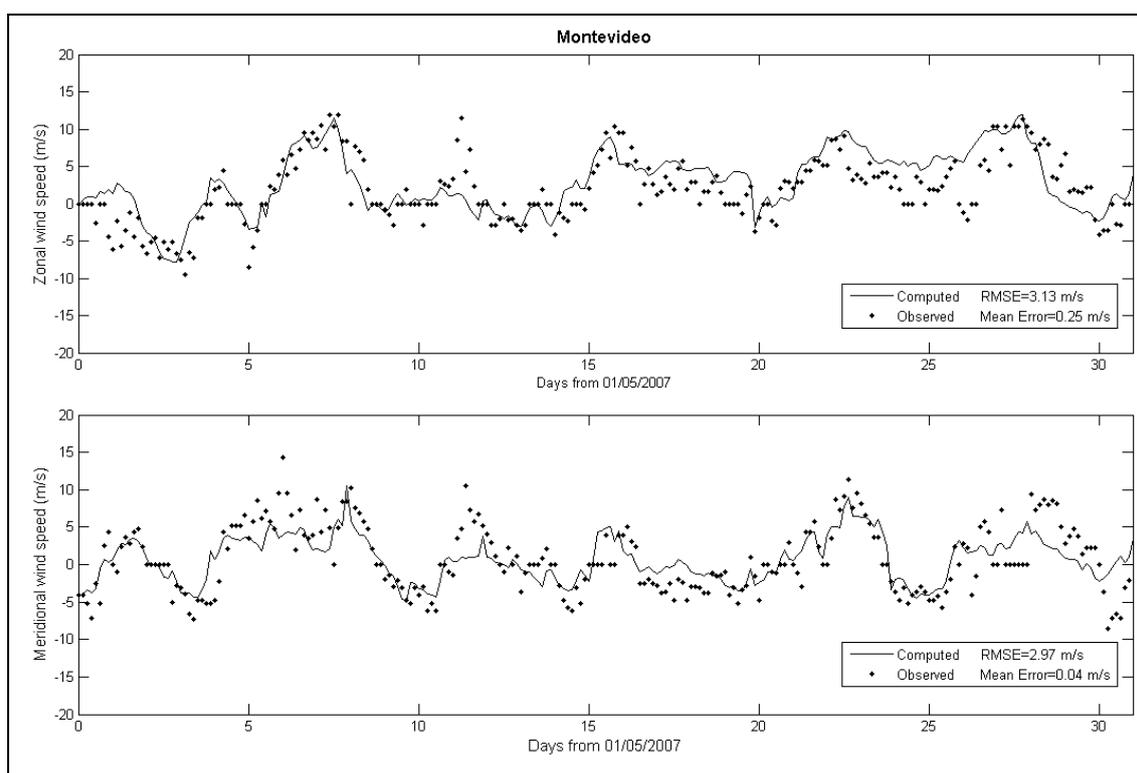


Figura 103: Comparación de las series de viento simulada y observada en la estación de Punta Brava durante mayo de 2007.

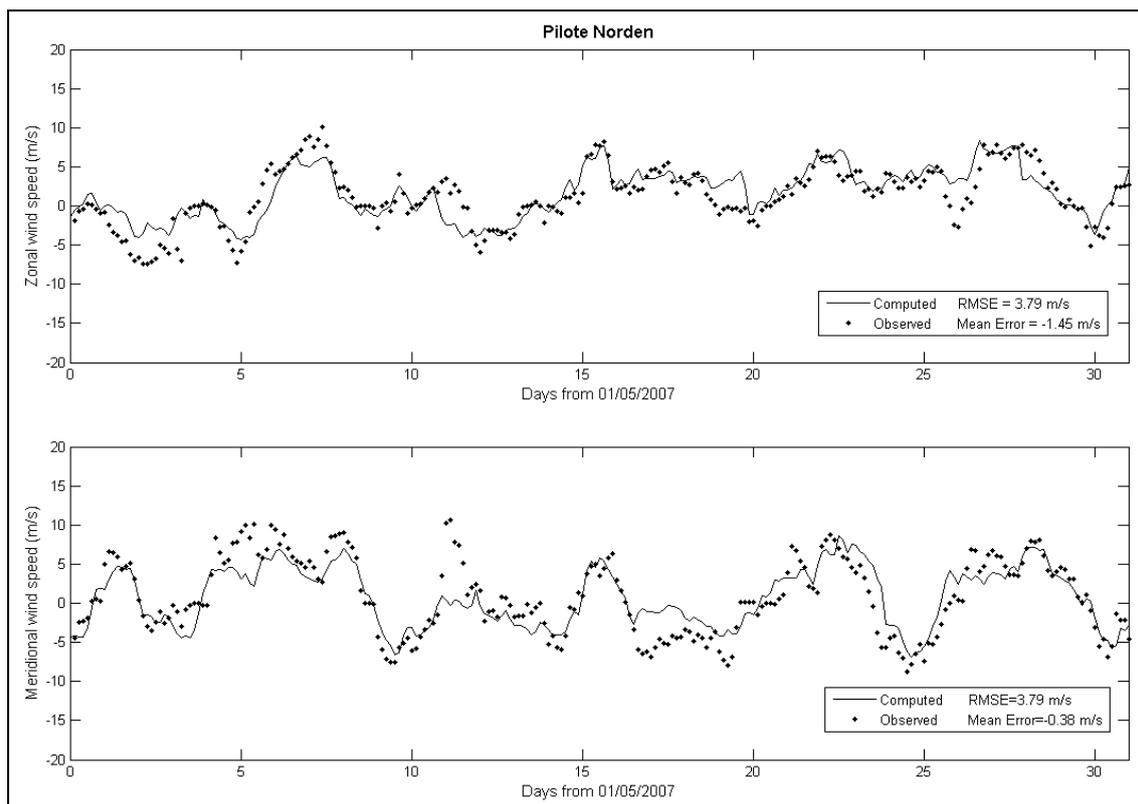


Figura 104: Comparación de las series de viento simulada y observada en la estación de Pilote Norden durante mayo de 2007.

Se puede ver que en ambas estaciones los resultados del modelo son muy buenos capturando las señales tanto en amplitud como en fase.

VI-3.2.4. Condiciones iniciales

Además de las condiciones de borde, el modelo requiere la especificación de una condición inicial para las variables del sistema que son el nivel de la superficie libre y la velocidad.

Las condiciones iniciales utilizadas son del tipo de Dirichlet, y se imponen especificando directamente los valores de las variables en todos los puntos del dominio durante el instante inicial. Para la elevación de la superficie libre se utiliza un valor de referencia uniforme en todo el dominio de cálculo, igual a 0,91 m mientras que para el campo de velocidades la condición inicial es el reposo y solamente es necesario un tiempo corto de arranque para que las velocidades se ajusten a la acción de los forzantes considerados.

VI-4. Calibración y validación del modelo

A los efectos de calibrar el modelo hidrodinámico se realizó una primera calibración considerando únicamente el forzante astronómico y luego una segunda etapa de calibración considerando forzante astronómico y atmosférico (marea "real"). En lo que sigue se presentan los detalles de dichos procesos de calibración. Finalmente se realizó una validación de los resultados utilizando el forzante astronómico y atmosférico.

VI-4.1. Calibración con marea astronómica

Tal como se mencionó anteriormente la marea astronómica se ingresa como condición de borde en el modelo regional, imponiendo las fases y amplitudes obtenidas a partir del atlas de marea FES2004. A los efectos de la calibración dichas amplitudes y fases fueron modificadas buscando obtener los resultados de mayor calidad en estaciones mareográficas del Río de la Plata. El submodelo del Río de la Plata recibe como condiciones de borde las series interpoladas espacial y temporalmente del modelo regional. Los ajustes se realizaron comparando los resultados del modelo regional en las estaciones de Mar del Plata y La Paloma, y los resultados del submodelo en las estaciones de Punta del Este, Montevideo, Pilote Norden, Colonia y Buenos Aires (ver Figura 13).

A partir de las series simuladas en dichas estaciones se calcularon las amplitudes y fases de las componentes principales de la marea, las cuales se compararon con los valores teóricos esperados. Dichos valores teóricos fueron calculados a partir de un análisis armónico de las series completas registradas en cada estación.

Componente	Período (hr)	Marea observada		Marea calculada		Error medio cuadrático (m)
		Amplitud (m)	Fase (grados)	Amplitud (m)	Fase (grados)	
M ₂	12,42	0,3466	212,7	0,2978	222,2	0,0509
K ₁	23,93	0,1615	124,1	0,1333	167,3	0,0813
S ₂	12,00	0,0553	281,8	0,0185	318,6	0,0297
O ₁	25,82	0,1812	33,7	0,2205	8,8	0,0709
M ₄	6,21	0,0360	358,5	0,1185	4,4	0,0578
N ₂	12,66	0,1004	174,5	0,1028	195,7	0,0262
Q ₁	26,87	0,0388	357,1	0,0290	322,9	0,0161
P ₁	24,07	0,0442	105,5	0,0222	7,2	0,0369
En la K ₂	11,97	0,0206	293,7	0,0332	53,7	0,0353

Tabla 29 y la Tabla 30 se presenta la comparación de las componentes armónicas obtenidas con el modelo regional. En la Figura 105 se muestra una comparación entre las series de niveles simuladas y las correspondientes series teóricas. Ambas series fueron calculadas por superposición de nueve de las componentes principales de la marea, ocho de las cuales fueron introducidas a partir de la solución del FES2004 en la frontera oceánica mientras que la componente M₄ es una componente de aguas someras que se genera por interacción entre otras componentes durante su propagación. Los errores medios cuadráticos obtenidos en esta comparación son de 0,14m en Mar del Plata y 0.08m en La Paloma.

Componente	Período (hr)	Marea observada		Marea calculada		Error medio cuadrático (m)
		Amplitud (m)	Fase (grados)	Amplitud (m)	Fase (grados)	
M ₂	12,42	0,3466	212,7	0,2978	222,2	0,0509
K ₁	23,93	0,1615	124,1	0,1333	167,3	0,0813
S ₂	12,00	0,0553	281,8	0,0185	318,6	0,0297
O ₁	25,82	0,1812	33,7	0,2205	8,8	0,0709
M ₄	6,21	0,0360	358,5	0,1185	4,4	0,0578
N ₂	12,66	0,1004	174,5	0,1028	195,7	0,0262
Q ₁	26,87	0,0388	357,1	0,0290	322,9	0,0161
P ₁	24,07	0,0442	105,5	0,0222	7,2	0,0369
K ₂	11,97	0,0206	293,7	0,0332	53,7	0,0353

Tabla 29: Amplitudes y fases de la marea observada y calculada en la estación Mar del Plata.

Componente	Período (hr)	Marea observada		Marea calculada		Error medio cuadrático (m)
		Amplitud (m)	Fase (grados)	Amplitud (m)	Fase (grados)	
M ₂	12,42	0,1168	213,1	0,1568	196,4	0,0395
K ₁	23,93	0,0500	68,6	0,0697	122,7	0,0417
S ₂	12,00	0,0209	328,4	0,0154	336,0	0,0043
O ₁	25,82	0,0458	33,7	0,0802	332,4	0,0528
M ₄	6,21	0,0721	22,2	0,0705	21,4	0,0014
N ₂	12,66	0,0590	183,9	0,0496	184,4	0,0066
Q ₁	26,87	0,0147	40,8	0,0098	300,8	0,0139
P ₁	24,07	0,0110	83,1	0,0217	3,2	0,0159
K ₂	11,97	0,0104	336,2	0,0360	57,4	0,0269

Tabla 30: Amplitudes y fases de la marea observada y calculada en la estación La Paloma.

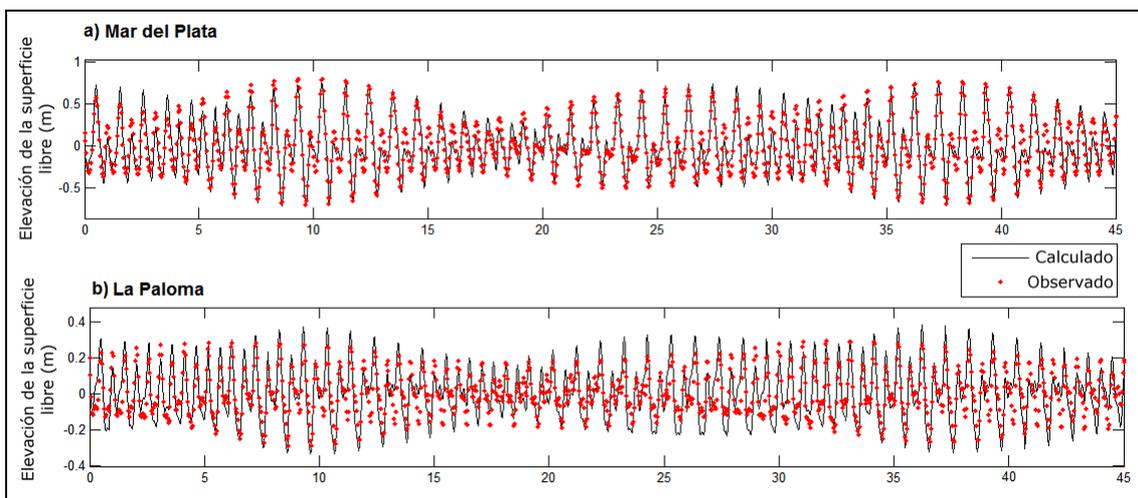


Figura 105: Comparación de las series de niveles observadas y simuladas con el modelo regional en las estaciones de a) Mar del Plata y b) La Paloma (Superposición de 9 componentes principales: M₂, K₁, S₂, O₁, M₄, N₂, Q₁, P₁, K₂).

Se puede ver que el modelo regional reproduce correctamente las características de la marea astronómica en Mar del Plata. Las componentes M₂ y N₂ son las que mejor se representan, mientras que las mayores diferencias en términos de

desfasajes se presentan para las componentes K2 y M4. El modelo levemente subestima la amplitud en Mar del Plata y la sobreestima en La Paloma.

Los resultados del submodelo enfocado al Río de la Plata son aceptables, en la Figura 106 se muestra una comparación de la serie temporal asociada a la componente principal en el Río de la Plata que es la M2. Únicamente un pequeño desfase se observa en las estaciones de Montevideo y Colonia.

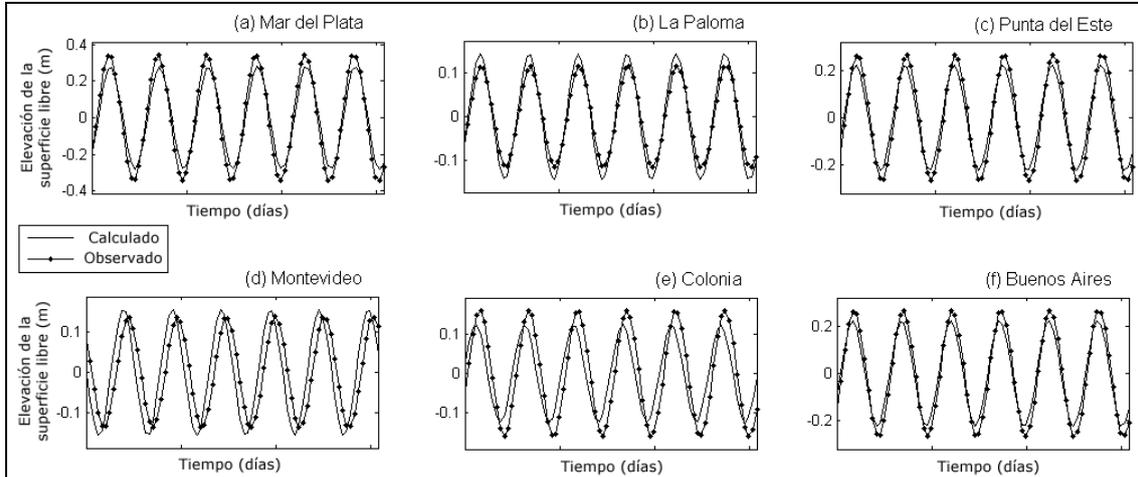


Figura 106: Comparación de las componente M2 observada y modelada (con el submodelo) en las estaciones de (a) Mar del Plata, (b) La Paloma, (c) Punta del Este, (d) Montevideo, (e) Colonia y (f) Buenos Aires.

La calidad en la representación de los armónicos con el submodelo varía los distintos puntos del estuario evaluados. En la estación Mar del Plata, los peores resultados se obtienen para las componentes M2 y K2. Por otro lado en la estación La Paloma, la componente M4 es una de las mejor representadas, junto con las componentes M2, N2 y S2. En Punta del Este las amplitudes de la marea astronómicas son muy pequeñas, aún así las principales componentes M2, N2 y S2 son bien representadas. En la estación de Montevideo, los mayores errores son los obtenidos para las componentes P1, K3 y K1, mientras que los menores se tiene para las componentes M2, N2 y S2. En Colonia y Buenos Aires, las componentes diurnas y de aguas someras M4 presentan los mayores errores (Tabla 31). El error medio cuadrático comparando la suma de las nueve componentes principales simuladas con las teóricas se muestra en la Tabla 32.

Componente	Período (hr)	Colonia					Buenos Aires				
		Marea observada		Marea calculada		Error medio cuadrático (m)	Marea observada		Marea calculada		Error medio cuadrático (m)
		Amplitud (m)	Fase (grados)	Amplitud (m)	Fase (grados)		Amplitud (m)	Fase (grados)	Amplitud (m)	Fase (grados)	
M ₂	12,42	0,1638	194,9	0,1267	164,2	0,0596	0,2701	211,8	0,2265	202,0	0,0427
K ₁	23,93	0,0744	36,0	0,0104	271,5	0,0589	0,1034	33,8	0,0140	299,6	0,0768
S ₂	12,00	0,0270	290,4	0,0056	290,6	0,0151	0,0461	310,4	0,0087	320,3	0,0265
O ₁	25,82	0,1248	217,2	0,0484	209,4	0,0576	0,1425	220,4	0,0575	218,9	0,0636
M ₄	6,21	0,0082	244,9	0,0260	222,6	0,0130	0,0247	321,4	0,0493	336,6	0,0183
N ₂	12,66	0,0644	149,9	0,0357	142,1	0,0206	0,1000	167,6	0,0591	175,8	0,0297
Q ₁	26,87	0,0388	167,0	0,0064	85,9	0,0281	0,0361	176,3	0,0069	88,2	0,0267
P ₁	24,07	0,0230	40,7	0,0140	150,5	0,0217	0,0268	34,7	0,0168	160,3	0,0276
K ₂	11,97	0,0087	321,3	0,0191	30,9	0,0135	0,0169	337,5	0,0322	72,8	0,0283

Tabla 31: Amplitudes y fases de las componentes de marea observadas y simuladas con el submodelo del Río de la Plata en las estaciones Colonia y Buenos Aires.

	Mar del Plata	La Paloma	Punta del Este	Montevideo	Buenos Aires
Error medio cuadrático (m)	0,144	0,079	0,069	0,096	0,107

Tabla 32: RMSE (m) en las estaciones de control utilizando el submodelo del Río de la Plata.

VI-4.2. Calibración y validación con marea real

Al introducir los forzantes atmosféricos (viento y presión en superficie) es necesaria una calibración a los efectos de representar la marea “real” (resultante de la astronómica y meteorológica). La tensión rasante ejercida por el viento en la superficie y la condición de radiación de Blumberg & Kantha tienen una influencia significativa en los resultados del modelo. Por tanto sus parámetros asociados fueron utilizados como parámetros de calibración del modelo. En el caso de la tensión rasante por efecto del viento el parámetro utilizado es el conocido coeficiente de “drag” (C_D). Fueron evaluadas configuraciones con distintos valores constantes de C_D , así como una formulación con C_D variable (Large & Pond, 1981). Por otra parte en la condición de radiación el parámetro de calibración es el tiempo de relajación, para el cual se evaluaron distintos valores en celdas oceánicas y costeras con una transición en celdas intermedias. Otros parámetros como la rugosidad de fondo y viscosidad horizontal mantuvieron el mismo valor utilizado en las simulaciones con marea astronómica (Tabla 28).

A los efectos de calibrar el modelo se simuló el período de junio y julio de 2006, meses en los que se cuenta con datos en las estaciones mareográficas de Mar del Plata, Punta del Este, Montevideo, Pilote Norden y Colonia. Por otra, para validar esta calibración el período escogido son los meses de mayo y junio de 2007, meses en los que se cuenta con registros en las estaciones de Mar del Plata, La Paloma, Punta del Este, Montevideo, Colonia y Pilote Norden.

En la Figura 107 se presenta una comparación entre las series observada y simulada con el modelo regional en la estación de Mar del Plata durante el período de calibración. Los resultados del modelo fueron obtenidos utilizando para el forzante atmosférico simulaciones de 96 horas concatenadas de forma tal de cubrir los dos meses de interés. La comparación muestra resultados muy buenos, lo que muestra que el modelo es capaz de reproducir las principales oscilaciones sin desfases significativos. El RMSE durante el mes de junio es de 0,317m, mientras que para el mes de julio es de 0,330m.

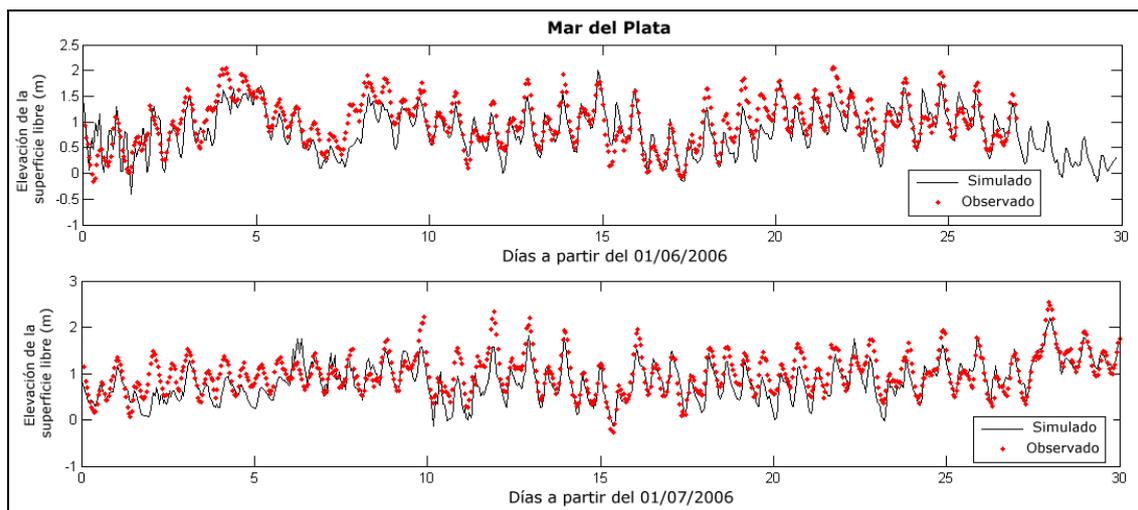


Figura 107: Comparación entre las series de niveles observada y simulada con el modelo regional en la estación de Mar del Plata durante junio y julio de 2006.

En el período de validación (mayo-junio de 2007) los resultados mantuvieron su calidad, siendo el RMSE obtenido en Mar del Plata de 0,285m y 0,318m en cada mes. Por otra parte en la Figura 108 se puede observar que en la estación de La Paloma durante el período de validación el modelo representa satisfactoriamente las grandes ondas de marea meteorológica. El RMSE durante los meses de validación, es de 0,255m y 0,300m respectivamente.

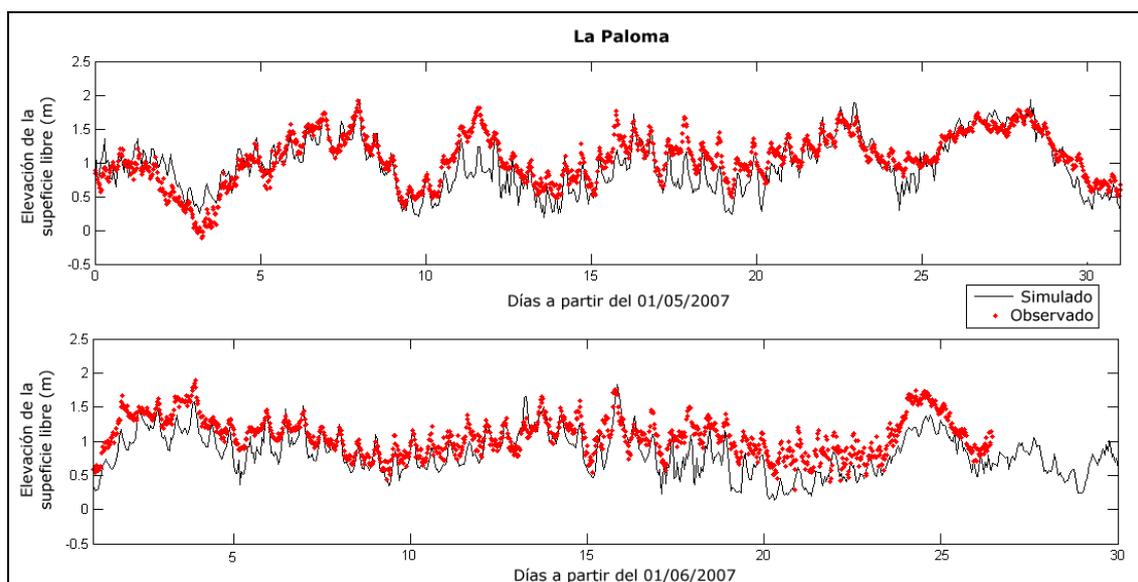


Figura 108: Comparación entre las series de niveles observada y simulada con el modelo regional en la estación de La Paloma durante mayo y junio de 2007.

En lo que respecta al submodelo el principal parámetro de calibración fue el coeficiente de “drag”. Al igual que para el modelo regional los mejores resultados fueron obtenidos con la formulación de Large & Pond. Se utilizó para estas simulaciones un paso temporal de resolución de 20 segundos.

En la Figura 109 se comparan los resultados obtenidos con el submodelo y las series observadas en las estaciones de La Paloma, Punta del Este y Colonia durante la primera quincena de mayo de 2007 y en las estaciones de Mar del Plata y Montevideo durante la segunda quincena de mayo de 2007. Nuevamente los

resultados muestran ser de muy buena calidad. Sin embargo parece que las estaciones interiores presentan una calidad menor a la obtenida en las estaciones exteriores. Esto puede deberse a los efectos de la batimetría local la cual tiene más influencia en zonas de baja profundidad, efectos locales por efecto de la costa, variaciones de las descargas de los ríos afluentes, entre otras razones posibles. En la Tabla 33 se presentan los RMSE asociados a cada estación.

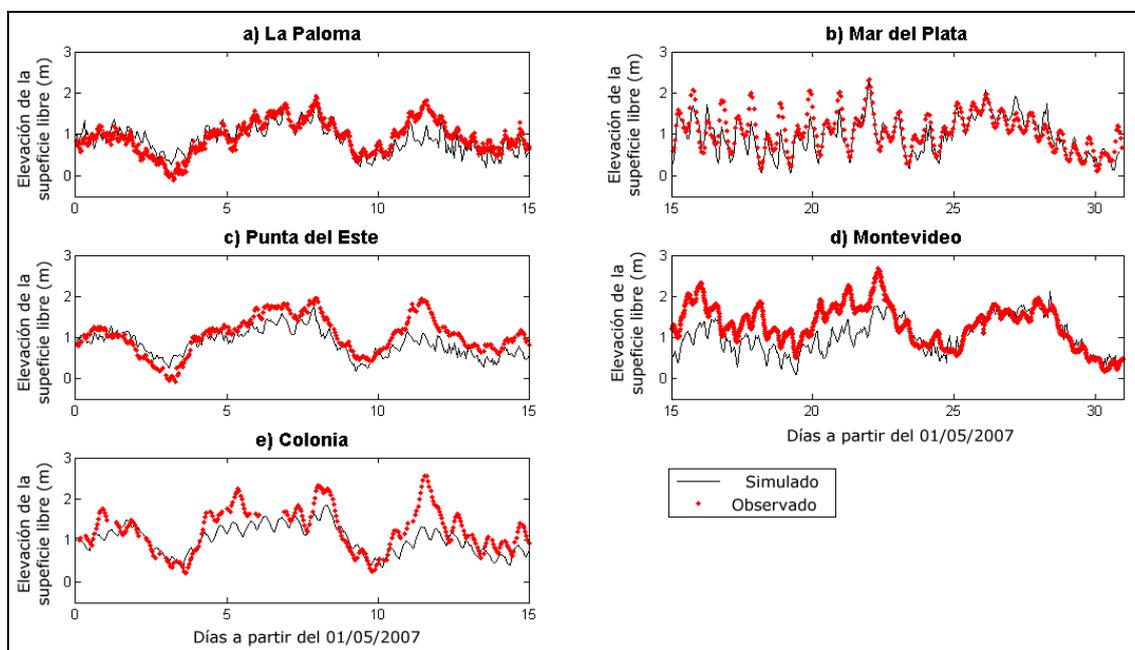


Figura 109: Comparación entre las series observadas y simuladas con el submodelo en (a) La Paloma, (b) Mar del Plata, (c) Punta del Este, (d) Montevideo, (e) Colonia. Mayo de 2007.

	Mar del Plata	La Paloma	Punta del Este	Montevideo	Colonia
Error medio cuadrático (m)	0,285	0,259	0,329	0,430	0,378

Tabla 33: RMSE (m) en las estaciones de control utilizando el submodelo del Río de la Plata.

VI-5. Caracterización de los eventos y forzantes durante el período simulado

El período simulado que se utilizó a los efectos de estudiar los mecanismos de generación y propagación de la marea meteorológica en el Río de la Plata corresponde a los meses de mayo y junio de 2007. Durante dicho período se cuenta con información de niveles en las estaciones mareográficas de Mar del Plata, La Paloma, Punta del Este, Montevideo, Colonia y Pilote Norden. Sin embargo, las estaciones de Colonia y Punta del Este no fueron consideradas por presentar un elevado número de datos faltantes en forma dispersa lo cual dada la metodología seguida para la obtención de las series residuales las torna poco útiles.

En este apartado se realiza para el período simulado de interés, un breve análisis de las series residuales, sus eventos y su vinculación con los forzantes atmosféricos tal como se hizo en los capítulos anteriores para las series de 2004.

VI-5.1. Eventos en las series residuales de niveles y su vinculación con el viento en Pilote Norden

En la Figura 110 se muestran las series residuales de niveles en las cuatro estaciones consideradas durante los meses de mayo y junio de 2007. Con mayor o menor claridad se han identificado ocho eventos en las series residuales. Como se puede ver las amplitudes son para varios de ellos del orden de un metro y en algún caso mayor.

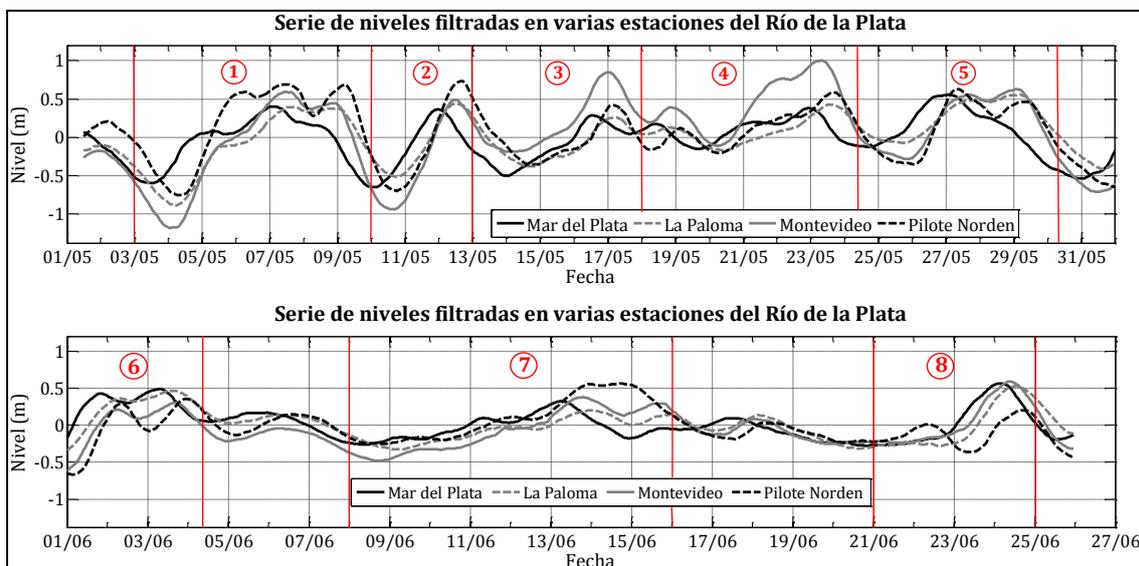


Figura 110: Series residuales de niveles en las estaciones de Mar del Plata, La Paloma, Montevideo y Pilote Norden, durante mayo (arriba) - junio (abajo) de 2007.

En la Figura 111 y Figura 112 se observan las series residuales en las estaciones de Mar del Plata y Pilote Norden junto con los vientos en esta última estación proyectados en las direcciones NE-SW y NW-SE. Se puede ver que el comportamiento observado en el apartado V-4.1 se mantiene en este período. Los cinco eventos identificados durante el mes de mayo claramente son precedidos por vientos del SW, mientras que nuevamente se insinúa que la componente SE tiene que ver con la amplificación de la señal. Por otra parte en el mes de junio durante el evento ocurrido entre el 11/06 y 16/06 evidentemente la componente SE tuvo un rol importante. El día 22/06 tiene lugar un pequeño máximo relativo en la estación Pilote Norden que no es registrado en la estación de Mar del Plata, el mismo tuvo lugar luego de prácticamente un día y medio de fuertes vientos del SE. Este tipo de evento es el asociado al forzante local, mientras que el resto parece ser generado en forma remota y luego amplificado en mayor o menor medida en función del viento local.

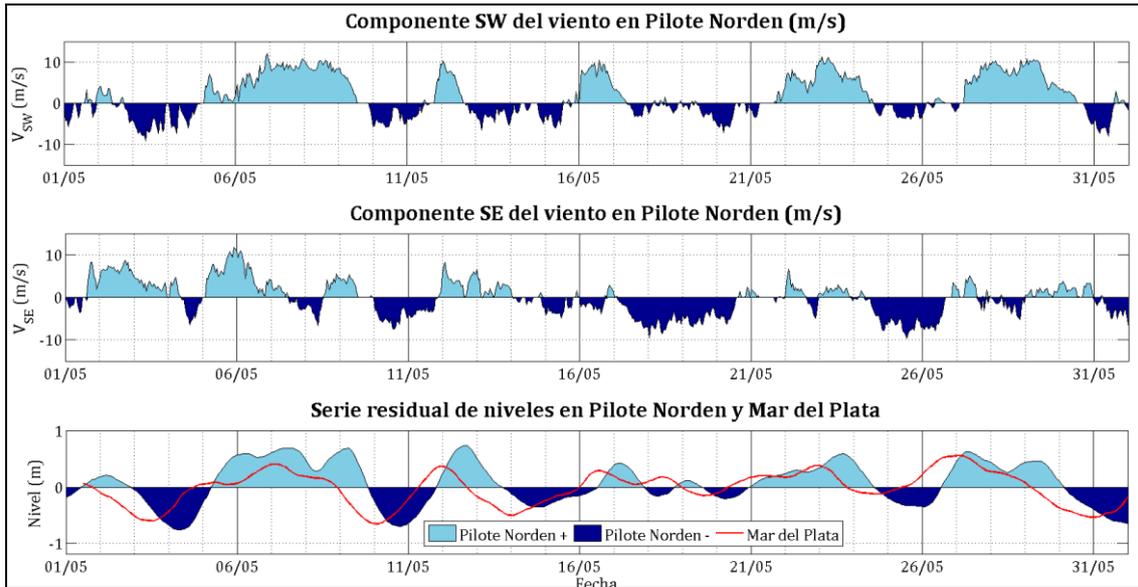


Figura 111: Series proyectadas de viento en Pilote Norden y series residuales de niveles en Mar del Plata y Pilote Norden durante mayo de 2007.

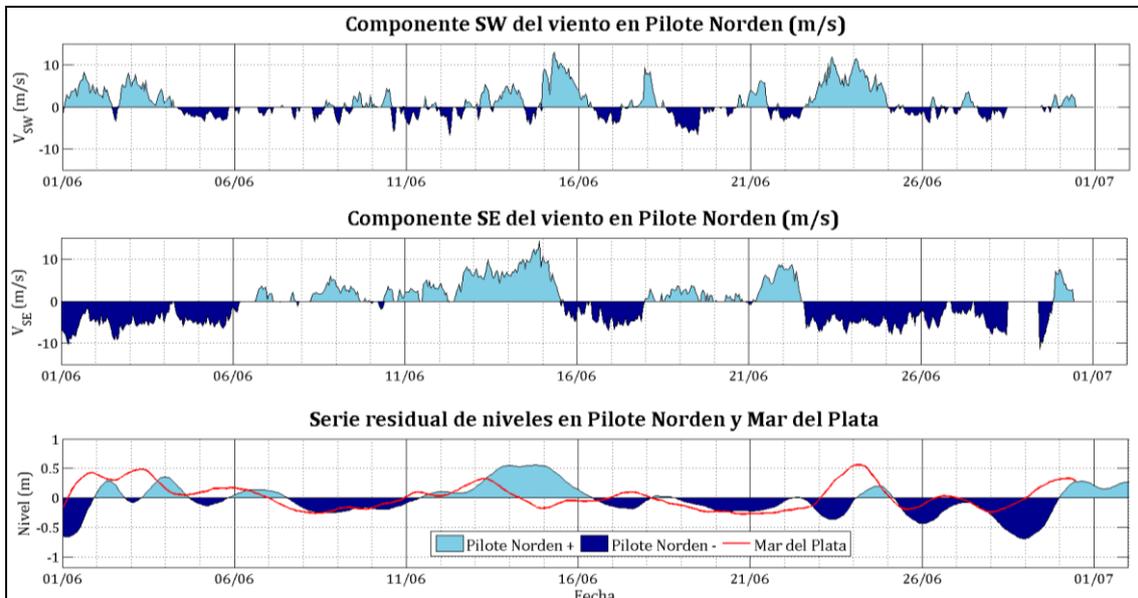


Figura 112: Series proyectadas de viento en Pilote Norden y series residuales de niveles en Mar del Plata y Pilote Norden durante junio de 2007.

VI-5.2. Situación sinóptica durante los eventos simulados

A continuación se describe la situación sinóptica durante algunos de los eventos más relevantes. Nuevamente para esta descripción la información utilizada son los datos de Re análisis de NCEP.

En la Figura 113 se presenta lo ocurrido durante el evento que tuvo lugar entre el 09 y 13 de mayo de 2007. Previo a la ocurrencia de los niveles mínimos, el 09/05 18hs se puede apreciar un centro de alta presión sobre el Río de la Plata y Río Uruguay, el cual acompañado por una región de baja presión en el sur, inducen vientos del NW sobre la plataforma. En el Río de la Plata los vientos son de baja intensidad. Cuando los niveles mínimos alcanzan el estuario (10/05 18hs) el centro de alta presión antes mencionado se ha desplazado al este y se encuentra ubicado sobre el océano Atlántico y en el sur de la plataforma los vientos son del

oeste mientras que en latitud 40° S se mantienen del NW. El estuario aún presenta vientos de poca intensidad. El 11/05 12hs, instante previo a la ocurrencia del evento de niveles máximos, el centro de alta presión antes mencionado continuó desplazándose al este y se encuentra sobre el océano, sin embargo, aparece otro centro de alta presión en el sur Argentino. Este último, acompañando de una región de baja presión en el sur del océano, inducen vientos del SW en toda la plataforma continental argentina. Finalmente cuando tienen lugar los niveles máximos en el Río de la Plata, el centro de alta presión ubicado en el sur argentino se ha desplazado al norte, generando vientos del W en el sur del plataforma y del SW para latitudes inferiores a 42°S. Sobre el Río de la Plata los vientos son del SW.

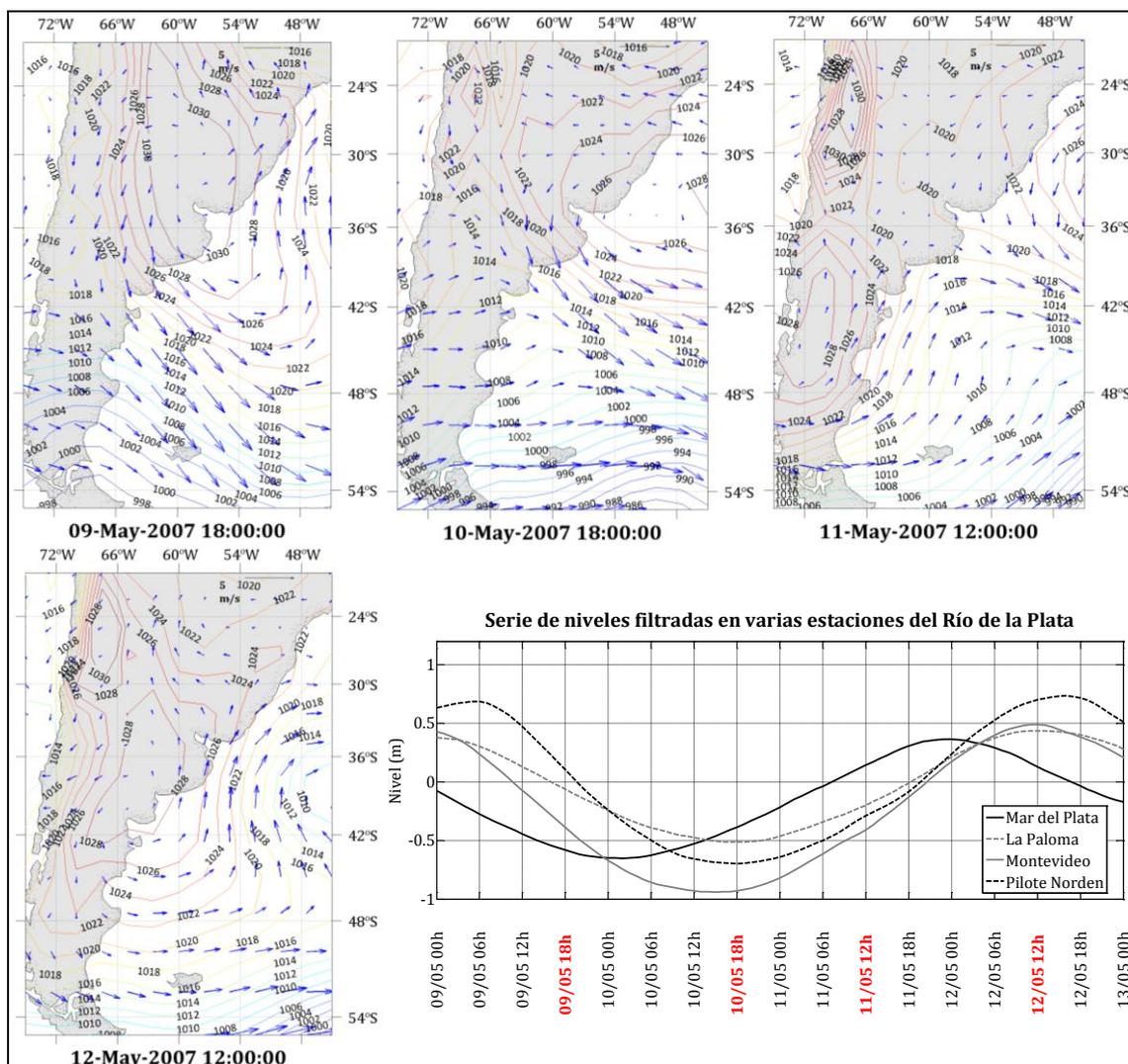


Figura 113: Evolución de los forzantes a escala sinóptica para el evento ocurrido entre el 09 y 13 de mayo de 2007 (evento N° 2).

El evento N° 3 tuvo lugar entre el 13 y 19 de mayo de 2007, la Figura 114 muestra la situación sinóptica durante instantes relevantes del mismo. El 13/05 12hs se puede observar un centro del alta presión sobre el océano al sur de Uruguay, la circulación que éste induce es de vientos del SE en el Río de la Plata y vientos del NW en el sur de la plataforma continental argentina. El 14/05 12hs el centro de alta presión disminuye en intensidad y se ha desplazado al norte ubicándose sobre el Río de la Plata, razón por la cual sobre el mismo no ocurren vientos significativos. Además una región de baja presión se extiende sobre el sur

argentino en latitudes altas, generado vientos del W en el sur de la plataforma. Previo a la ocurrencia de evento de niveles máximos (16/05 00hs) se observa que el centro de alta presión se alejó al este sobre el océano, mientras que la región de baja presión al sur se ha desplazado al este y se encuentra en una configuración tal que induce vientos del SW sobre la plataforma argentina. Por último el día 17/05 00hs tiene lugar el máximo nivel en las estaciones interiores al Río de la Plata, instante en el cual sobre el estuario ocurren vientos del SW y sobre la plataforma vientos del W.

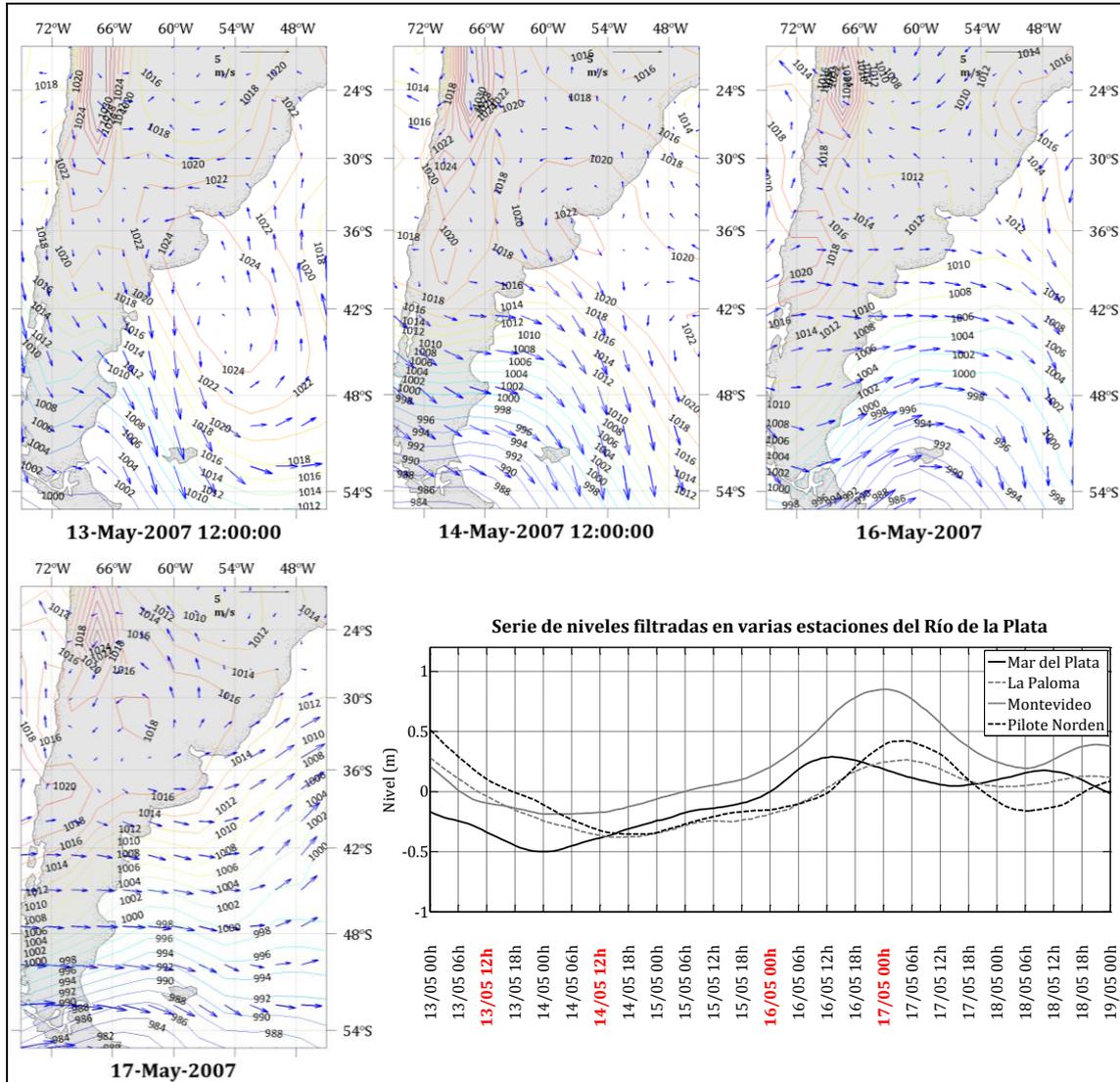


Figura 114: Evolución de los forzantes a escala sinóptica para el evento ocurrido entre el 13 y 19 de mayo de 2007 (evento N° 3).

En la Figura 115 se presenta el evento N° 6, el cual tiene lugar entre el 30 de mayo y 05 de junio de 2007. El día 30/05 00hs la situación sinóptica muestra un centro de alta presión sobre Argentina en latitud 38° aproximadamente. Este extenso anticiclón genera vientos del NW en el sur de la plataforma y vientos del SW sobre el estuario. El 31/05 12hs cuando tienen lugar los mínimos niveles en el Río de la Plata, se tiene una situación muy similar a la obtenida en el composite de eventos de niveles mínimos. El centro de alta presión se ha desplazado al noreste y se encuentra sobre el océano, mientras que una región de baja presión se extiende

sobre el sur argentino e induce vientos del NW en la plataforma continental. Un día después (01/06 12hs) la región de baja presión se ha desplazado al este y extendido sobre el océano generando vientos del SW en la plataforma, mientras que en el estuario se observan vientos del W. Finalmente cuando ocurren los niveles máximos en el estuario, los vientos en el mismo continúan siendo del W y sobre la plataforma aún persisten los vientos del SW. La presencia de esta región de baja presión que continúa forzando vientos del SW en la plataforma seguramente es la que lleva a la existencia de otro máximo en los niveles casi en forma continua.

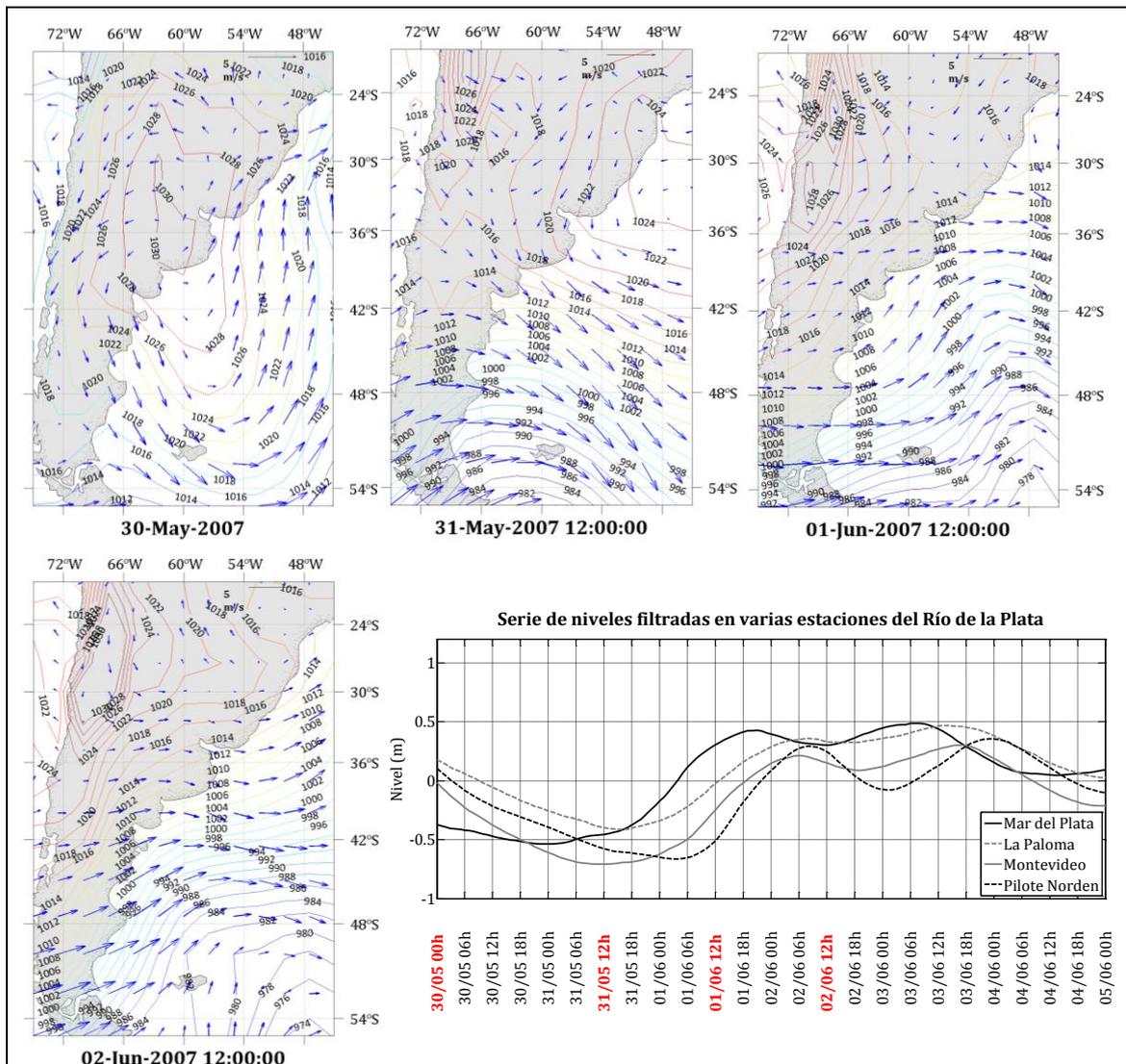


Figura 115: Evolución de los forzantes a escala sinóptica para el evento ocurrido entre el 30 de mayo y 05 de junio de 2007 (evento N° 6).

Por último en la Figura 116 se presenta el último evento considerado, el cual tuvo lugar entre los días 21 y 25 de junio. La particularidad de este evento es el pequeño máximo relativo que se observa el 22/06 únicamente en la estación Pilote Norden, previo a la ocurrencia del nivel máximo de mayor importancia el día 24/06. Previo a la ocurrencia del máximo en Pilote Norden, el 21/06 12hs. un centro de alta presión al sur de Uruguay y sobre el continente genera vientos del SE sobre el estuario. El 22/06 06hs cuando tiene lugar el máximo únicamente en la estación

Pilote Norden, el centro de alta presión se ha desplazado y alejado al este sobre el océano, sin embargo en su trayectoria siempre mantuvo vientos del E sobre el estuario (ver Figura 112). El día 23/06 00hs instante previo a la ocurrencia de los niveles máximos en todas las estaciones, un profundo ciclón generado al sur del Brasil se desplazó en dirección sureste y se encuentra sobre el océano generando vientos del SW en la plataforma y el estuario. Finalmente el 24/06 00hs el centro de baja presión se desplaza bastante más al sur y continúa induciendo vientos del SW en toda la plataforma y sobre el estuario. Este evento no presenta modificaciones significativas en su amplitud en la medida que se propaga de Mar del Plata hacia las estaciones interiores.

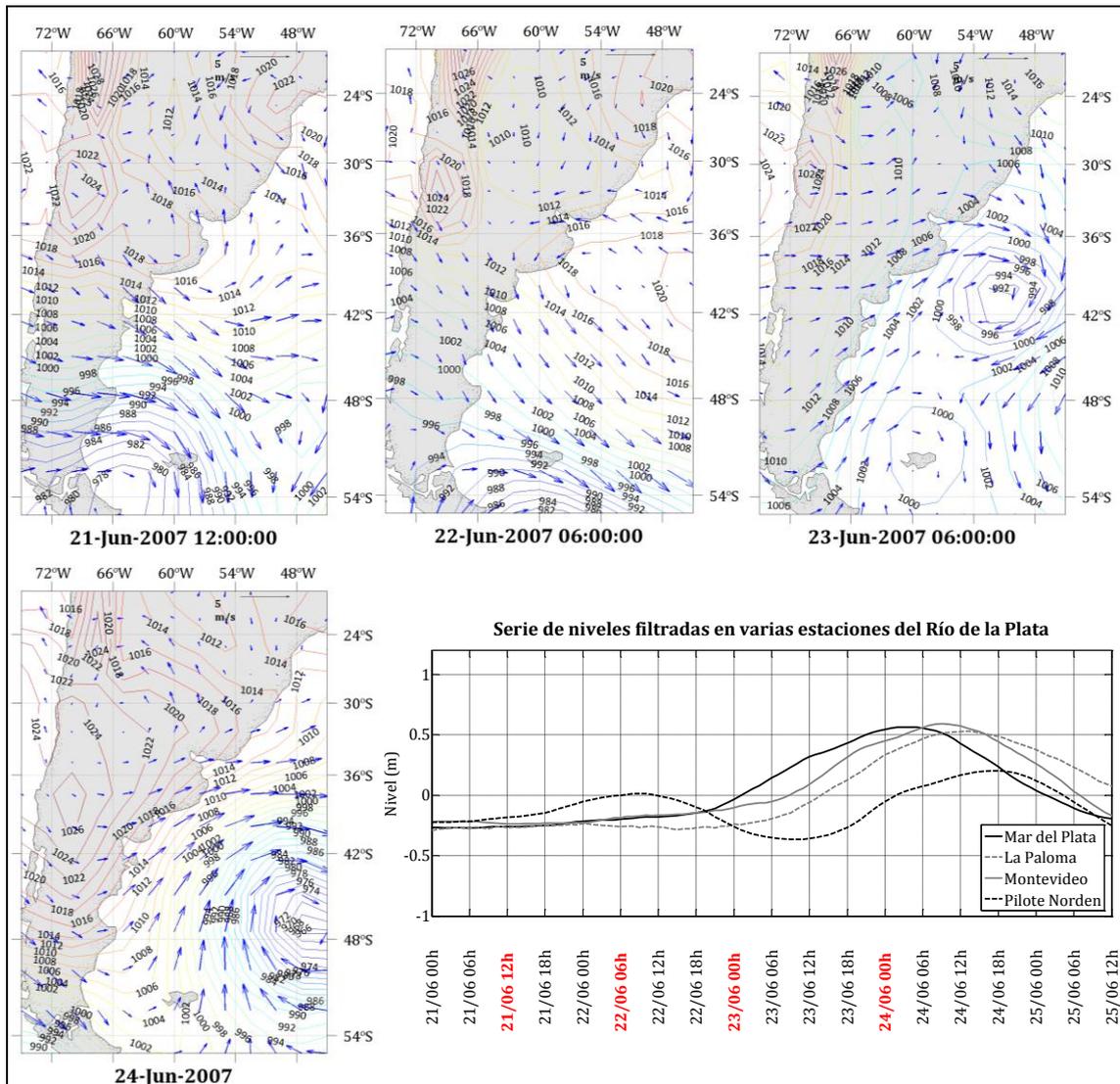


Figura 116: Evolución de los forzantes a escala sinóptica para el evento ocurrido entre el 21 y 25 de junio de 2007 (evento N° 8).

Los eventos aquí descritos a modo de ejemplo buscan reforzar las ideas surgidas en el capítulo anterior. Por un lado se observan situaciones que se repiten respecto a las mostradas en 2004, y por otro el comportamiento en general es coherente con el descrito anteriormente. La generación de los eventos principalmente parece ser remota, debida a vientos del SW sobre la plataforma continental argentina. Luego la amplificación de dichos eventos al propagarse

dentro del estuario estaría vinculada al efecto local del viento, observándose eventos que en ausencia de vientos del SE no sufren amplificación alguna. Finalmente existen eventos aislados en que el forzante local induce eventos que se observan únicamente en las estaciones más interiores del estuario, estos eventos vienen dados por condiciones de persistentes vientos del SE.

VI-6. Simulaciones realizadas

VI-6.1. Metodología

En base a la implementación pre-operacional antes descrita es posible realizar varios tipos de simulaciones combinando los forzantes impuestos y el dominio en el cual se aplican. Como se mencionó en la introducción en este apartado se presentan dos grandes grupos de simulaciones con objetivos distintos.

El primer grupo de simulaciones se presenta en el punto VI-6.2 y tiene por objetivo evaluar la respuesta del modelo a los forzantes atmosféricos a escala regional. En este sentido se realizaron simulaciones con el dominio regional incluyendo tanto el viento en 10 m como la presión en superficie, y luego simulaciones con cada uno de esos forzantes por separado.

Los resultados de las simulaciones considerando ambos forzantes permitieron observar la superficie libre en todo el dominio y así tener una idea de cómo y dónde se generan las ondas de marea meteorológica que se registran en el Río de la Plata. Por otra parte, se realizaron mapas de correlación de la serie simulada en la estación Pilote Norden con las series simuladas en el resto de los puntos del dominio para distintos lag's temporales. Estos mapas tienen por objeto identificar de donde proviene la señal que se observa en Pilote Norden y además dan información del tiempo de propagación de dicha señal. Se puede pensar que es un análisis de correlaciones con lag's temporal análogo al realizado sobre las series observadas en el apartado IV-3.2, solo que ahora se tiene series simuladas en una enorme cantidad de puntos con el agregado de que la mayoría están fuera del estuario y permiten ver de dónde proviene la señal.

Estas simulaciones con el modelo regional que consideran cada forzante por separado tienen por objetivo tener una idea acerca del "peso" relativo de cada uno en la generación de los eventos de marea meteorológica. El análisis de los resultados se basó principalmente en la comparación de las series modeladas en las estaciones con datos en este período, sin embargo a los efectos de cuantificar el peso relativo de los forzantes basta comparar las simulaciones con ambos forzantes y con cada uno por separado siendo irrelevante la existencia de datos observados. Aún así acotarse a estas cuatro estaciones resulta de interés por sus ubicaciones geográficas, teniendo las estaciones de Mar del Plata y La Paloma a la entrada del estuario, Montevideo en el zona media y Pilote Norden en la zona interior.

Finalmente, el segundo conjunto de simulaciones se basan en la utilización del submodelo acotado al Río de la Plata y buscan identificar la importancia del forzante local. En este sentido se realizaron simulaciones considerando ambos forzantes, viento y presión, tanto en dominio regional como en el subdominio. Por otra parte se realizaron simulaciones en las que en el dominio regional no se impusieron forzantes atmosféricos, o sea que simplemente se propaga la marea

astronómica hasta el subdominio, el cual la utilizará como condición de borde, mientras que el submodelo sí fue forzado con viento y presión en superficie. Teniendo como referencia la solución del submodelo con ambos forzantes en ambos dominios, la comparación con las series obtenidas considerando el forzante atmosférico únicamente en el subdominio permite ver qué tanto de la señales se captura únicamente con el forzante local.

Vale la pena mencionar que se realizó una simulación únicamente considerando el forzante astronómico en ambos dominios a los efectos de poder restar dicha solución a aquellas que si incluyen forzantes atmosféricos y así obtener la solución residual. A diferencia de lo hecho con las series observadas de niveles en las cuales se aplicó una filtro de 24 horas, aquí se optó por restar las solución de marea astronómica para eliminar su efecto debido al costo computacional que implica aplicar el filtro en cada punto del dominio.

En la Tabla 34 se presenta un resumen de las simulaciones y análisis descritos en los párrafos anteriores.

Denominación	Modelo Regional		Submodelo Río de la Plata	
	Viento	Presión en superficie	Viento	Presión en superficie
R svp_S svp	No	No	No	No
R cvp_R cvp	Si	Si	Si	Si
R cv	Si	No	-	-
R cp	No	Si	-	-
R svp_S cvp	No	No	Si	Si

Diferencia	Objetivo	Herramientas
R cvp_S cvp	R svp_S svp Visualizar los mecanismos y zonas de generación de la marea meteorológica que llega al Río de la Plata	Mapas de superficie residual en todo el dominio. Mapas de correlacion con lag en todo el dominio con la serie en P.Norden.
R cv	R svp_S svp Evaluar la contribución que cada forzante tiene en la generación y propagación de las ondas de marea meteorológica	Comparación de series residuales R cv, R cp, R cvp_S cvp en varias estaciones.
R cp	R svp_S svp Evaluar la contribución del forzante local en la generación y propagación de la marea meteorológica en el Río de la Plata	Comparación de series residuales R svp_S cvp, R cvp_S cvp en varias estaciones.

Tabla 34: Resumen de simulaciones y análisis realizados.

VI-6.2. Respuesta del modelo regional a los forzantes atmosféricos

VI-6.2.1. Simulaciones con viento y presión en superficie

Antes de analizar los resultados de las diversas simulaciones realizadas con el modelo en todo el dominio, es importante evaluar la calidad de los resultados en el Río de la Plata. En la Figura 117 se muestran las series residuales de niveles observadas y simuladas en las estaciones mareográficas consideradas. Se puede ver que el modelo a menos de algunas diferencias de amplitudes, captura muy bien todos los eventos ocurridos durante los dos meses simulados.

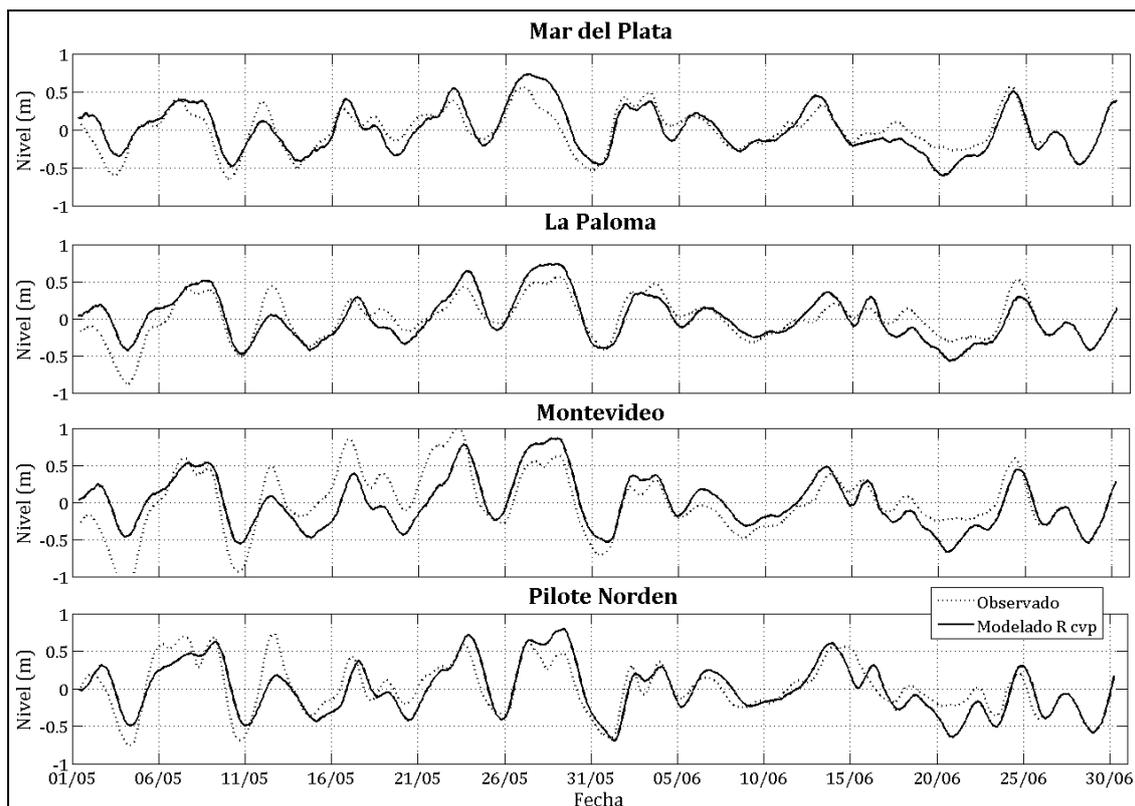


Figura 117: Comparación de series residuales observadas y simuladas con el modelo regional en las estaciones de Mar del Plata, La Paloma, Montevideo y Pilote Norden durante mayo - junio de 2007.

De esta forma, sabiendo que el modelo es capaz de reproducir los eventos de interés es posible pasar a observar que sucedió en cada evento con la superficie residual en todo el dominio y su vinculación con los forzantes atmosféricos. En lo que sigue se seleccionaron algunos eventos, y se presenta la superficie residual en varios instantes relevantes de los mismos.

En la Figura 117 se muestran las series simuladas y observadas en las estaciones de Mar del Plata y Pilote Norden durante el evento ocurrido entre los días 19 y 25 de mayo de 2007. Como se puede ver, la amplitud del evento es sobreestimada por el modelo, pero es bien representado en lo que respecta a su fase. En color rojo se han indicado los instantes en los que se presenta al superficie residual de niveles en todo el dominio regional.

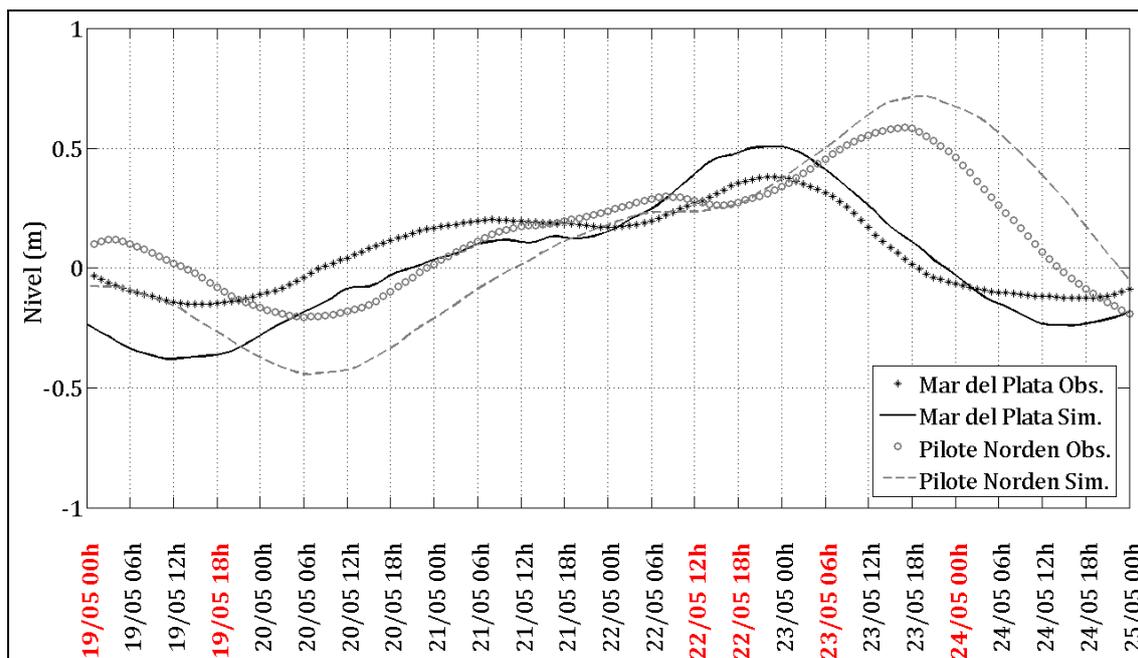


Figura 118: Series residuales observadas y simuladas con el modelo regional (R_cvp) en las estaciones de Mar del Plata y Pilote Norden entre el 19 y 24 de mayo de 2007.

En la Figura 119 se presenta el campo residual de niveles y el forzante atmosférico en los tres primeros instantes resaltados en la Figura 118; los dos primeros muestran como el evento de niveles mínimos es generado por vientos que se alejan de la costa provenientes de la dirección NW. Entre los dos primeros instantes es posible observar como las depresiones en la superficie ubicadas aproximadamente en 45°S, dieciocho horas después se han propagado y se encuentran ubicadas en torno a los 35°S ingresando al Río de la Plata.

Posteriormente en los instantes correspondientes a los días 22, 23 y 24 de mayo se muestra la evolución y generación del evento de niveles máximos. El día 22/05 12hs se puede ver como un sistema de bajas presiones sobre el océano Atlántico induce vientos del SW sobre la plataforma argentina generando en la superficie libre una sobre elevación acumulada sobre la costa entorno a las 40°S. En los siguientes instantes presentados se aprecia claramente como esta sobre elevación se propaga "recostada" al continente y finalmente ingresa al Río de la Plata.

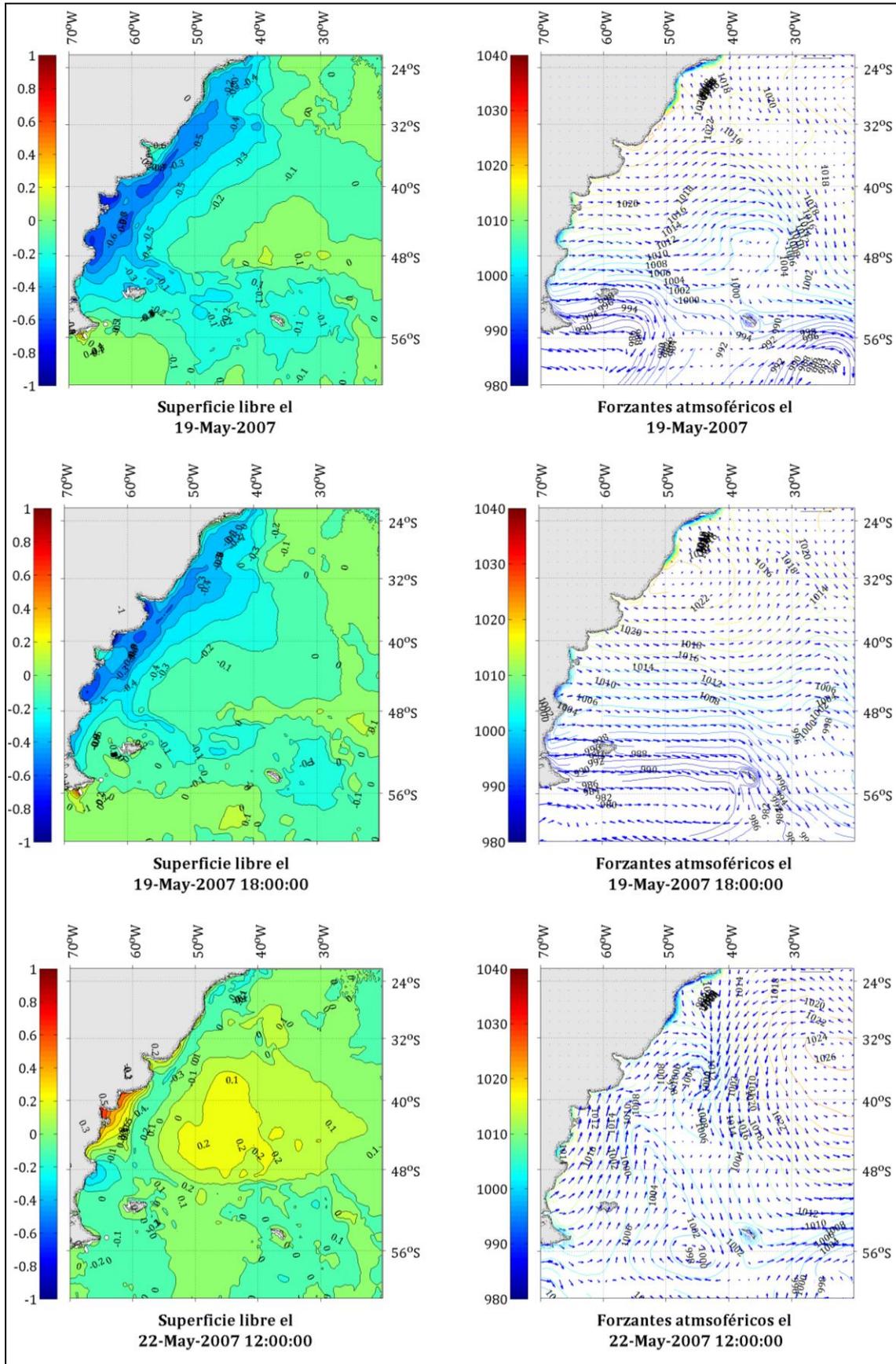


Figura 119: Superficies residuales durante varios instantes correspondientes al evento ocurrido entre el 19 y 25 de mayo de 2007.

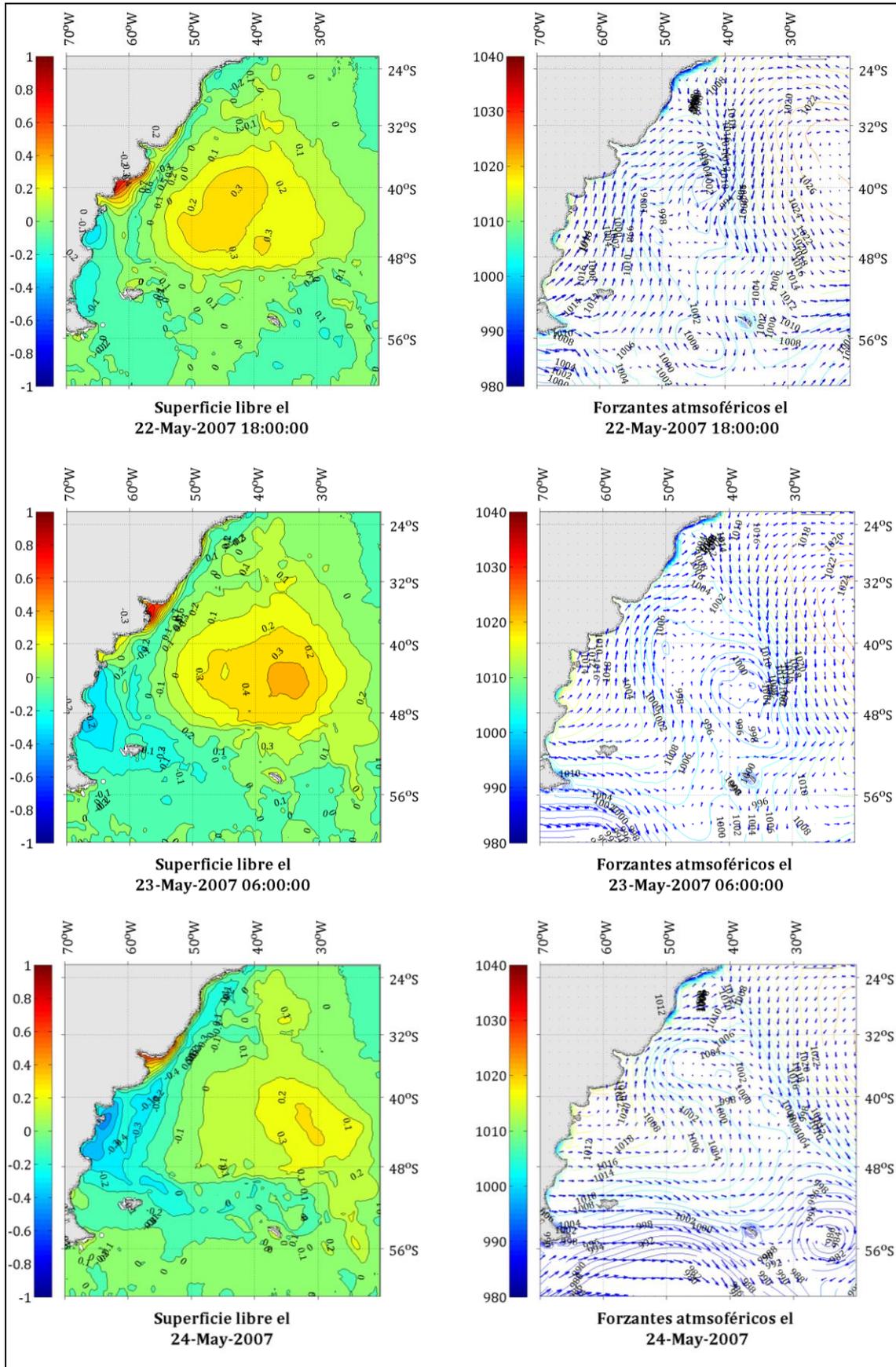


Figura 120: Superficies residuales durante varios instantes correspondientes al evento ocurrido entre el 19 y 25 de mayo de 2007.

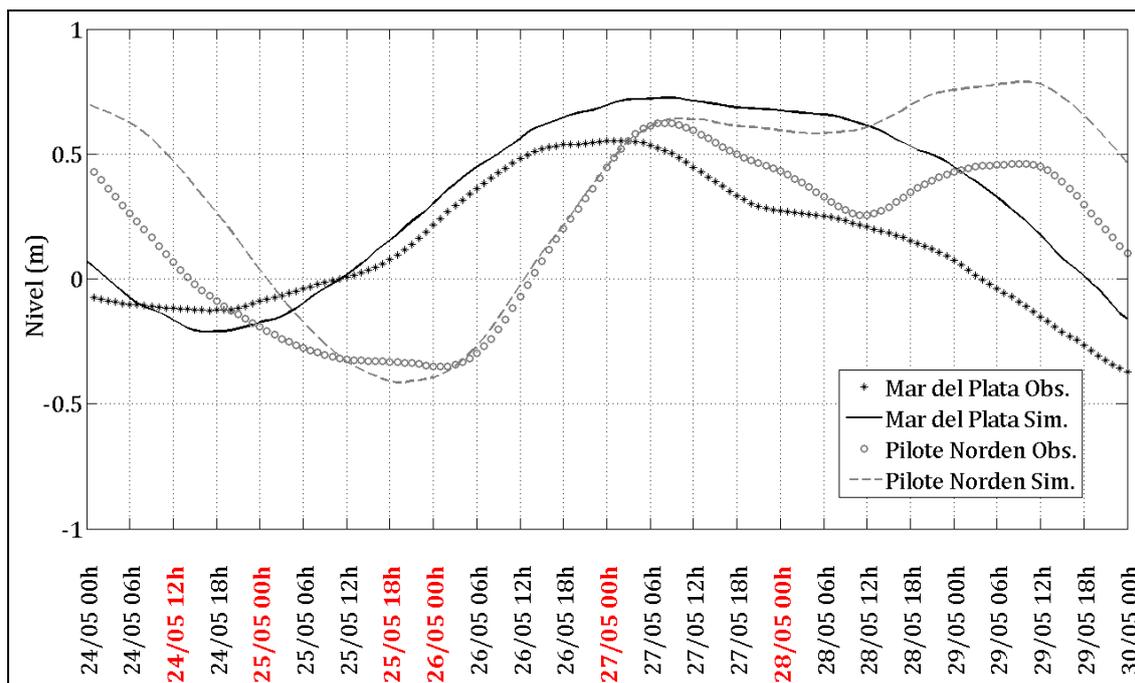


Figura 121: Series residuales observadas y simuladas con el modelo regional (R_cvp) en las estaciones de Mar del Plata y Pilote Norden entre el 24 y 30 de mayo de 2007.

En la Figura 121 se muestran las series observadas y simuladas en las estaciones de Mar del Plata y Pilote Norden durante el evento ocurrido entre el 24 y 30 de mayo de 2007. Se puede ver que el modelo representa muy bien el nivel mínimo, mientras que la señal del máximo es muy bien capturada a menos de una sobreestimación de su amplitud. Los tres primeros instantes muestran (Figura 121 y Figura 122) como un centro de alta presión sobre el Río de la Plata y una región de baja presión en el sur de argentina inducen vientos del NW en la plataforma, los cuales generan una depresión de la superficie residual que se propaga de sur a norte por la costa e ingresa al Río de la Plata. Se puede ver como sobre el final del día 25/05 la región de baja presión se desplaza al este y conforma un ciclón bien formado aproximadamente en latitud 56°S que induce vientos del SW en el sur de la plataforma. El 26/05 00hs se observa como las regiones sometidas a este tipo de vientos manifiestan un incremento de niveles próximo a la costa. Veinticuatro horas después (27/05 00hs) se observa que el ciclón se ha desplazado al noreste y el campo de vientos es del SW en toda la plataforma y el Río de la Plata. La región de niveles residuales positivos amentó su amplitud y se ha desplazado al norte ingresando al Río de la Plata. Finalmente el 28/05 00hs el ciclón se ha desplazado al norte y mantiene vientos del SW en la región próxima al Río de la Plata, región en la cual continúa ingresando la señal generada en el sur del plataforma.

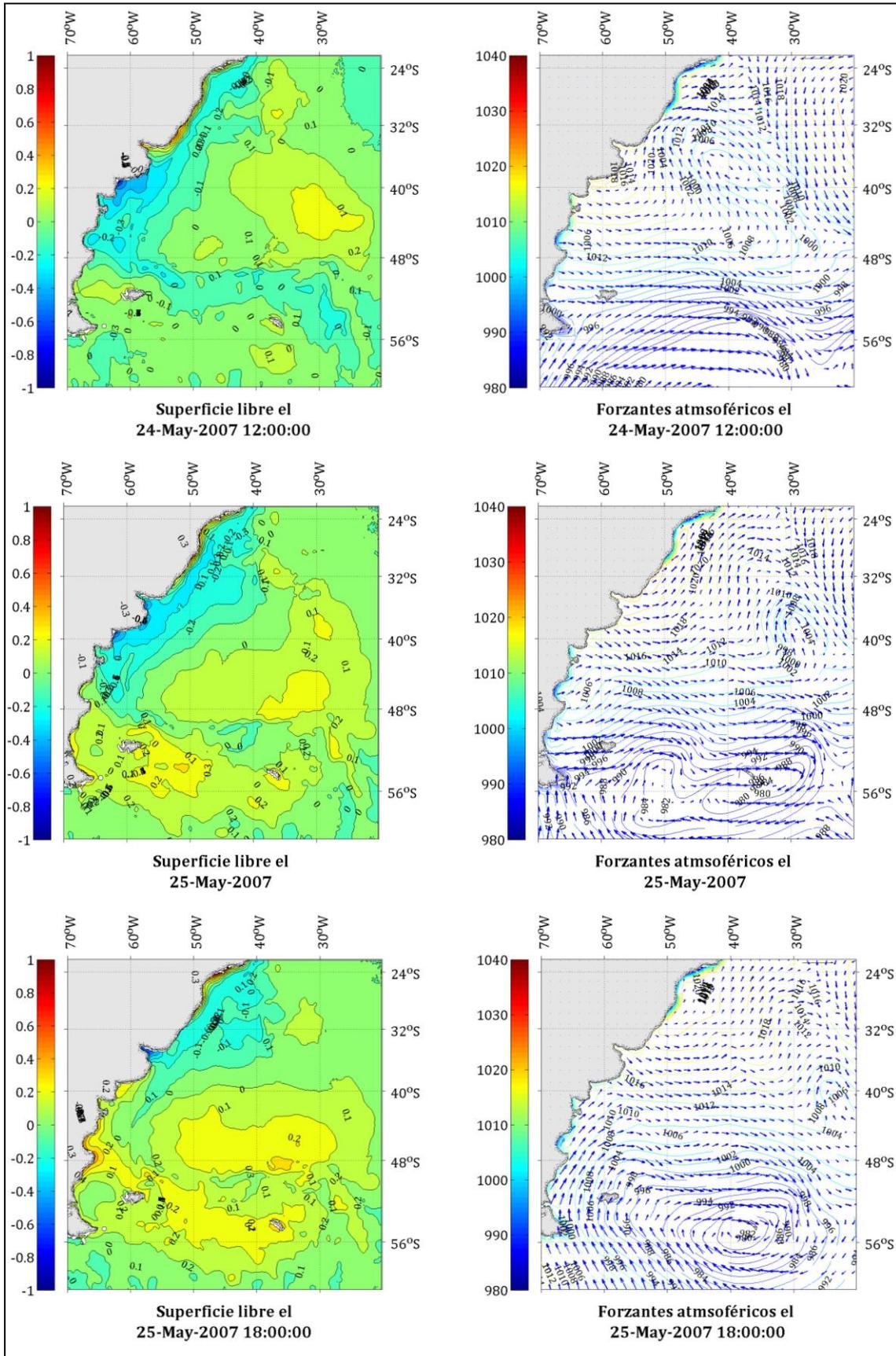


Figura 122: Superficies residuales durante varios instantes correspondientes al evento ocurrido entre el 19 y 25 de mayo de 2007.

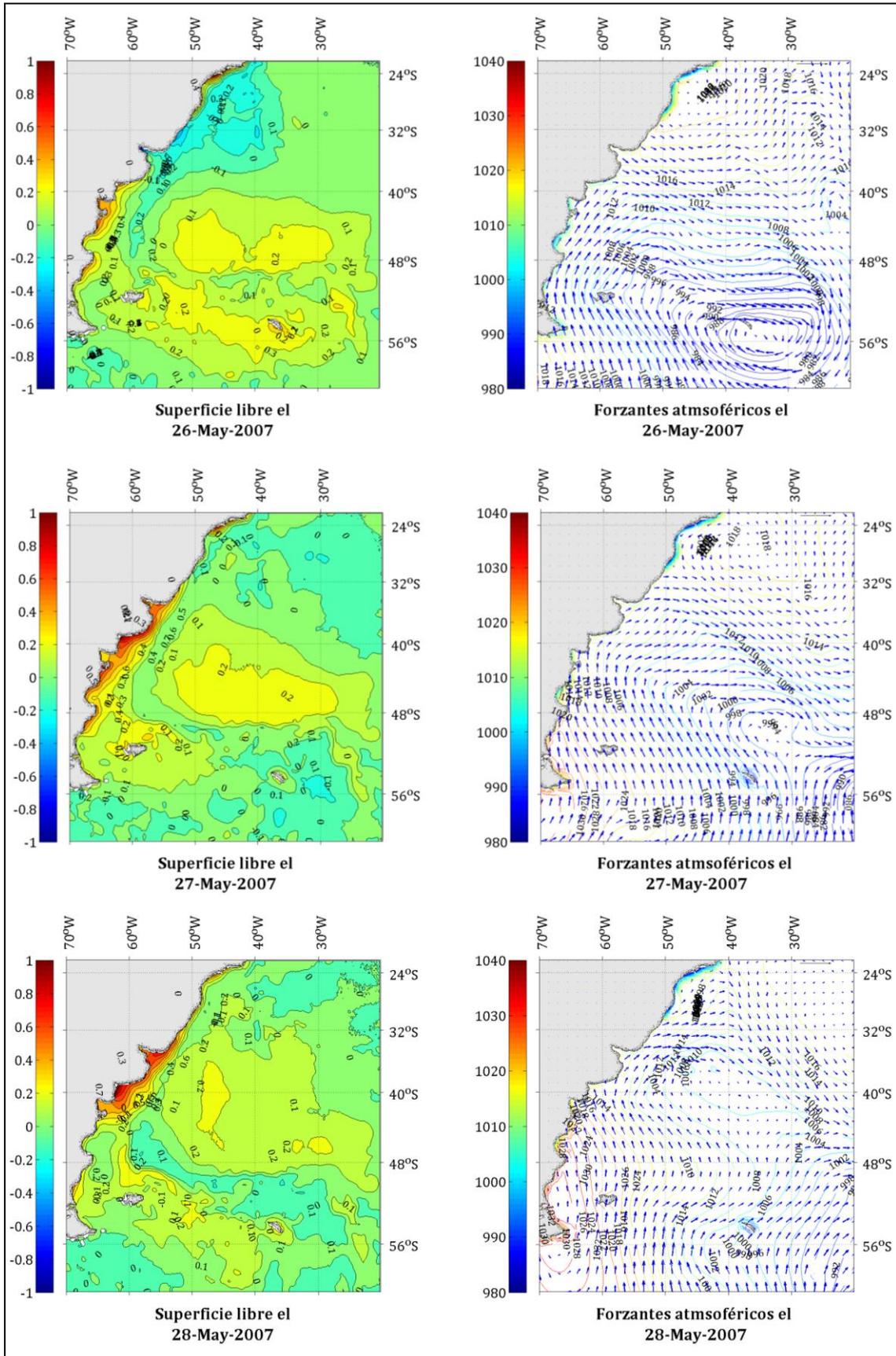


Figura 123: Superficies residuales durante varios instantes correspondientes al evento ocurrido entre el 19 y 25 de mayo de 2007.

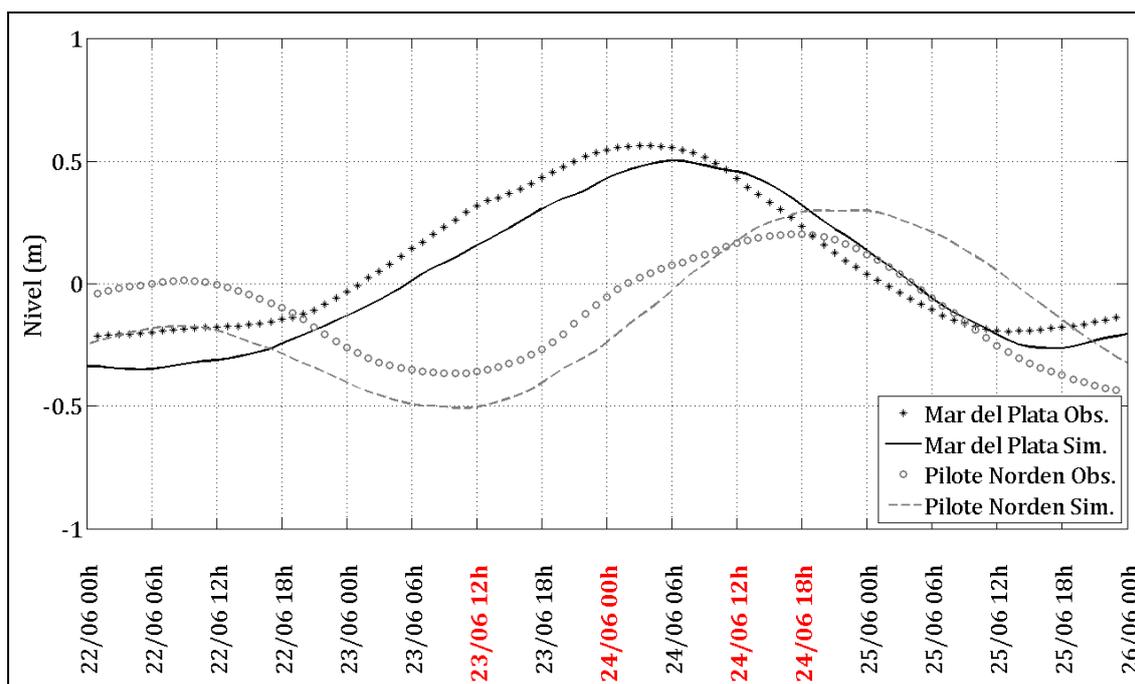


Figura 124: Series residuales observadas y simuladas con el modelo regional (R_cvp) en las estaciones de Mar del Plata y Pilote Norden entre el 24 y 30 de mayo de 2007.

Por último, se presenta el octavo evento identificado en el período simulado, el cual tuvo lugar entre el 22 y 26 de junio. Este evento es muy bien representado por el modelo como se puede ver en la Figura 124.

En la Figura 125 se puede ver que el día 23/06 12hs un profundo ciclón se encuentra ubicado sobre el océano (latitud 16°S aprox.) induciendo vientos del SW en la plataforma. Doce horas después se observa como se ha generado en la costa una anomalía positiva en la superficie residual. El 24/06 12hs dicha anomalía, al igual que en los eventos anteriores se ha desplazado e ingresando al estuario, todo esto bajo condiciones de vientos del SW generado por el profundo ciclón ubicado sobre el océano.

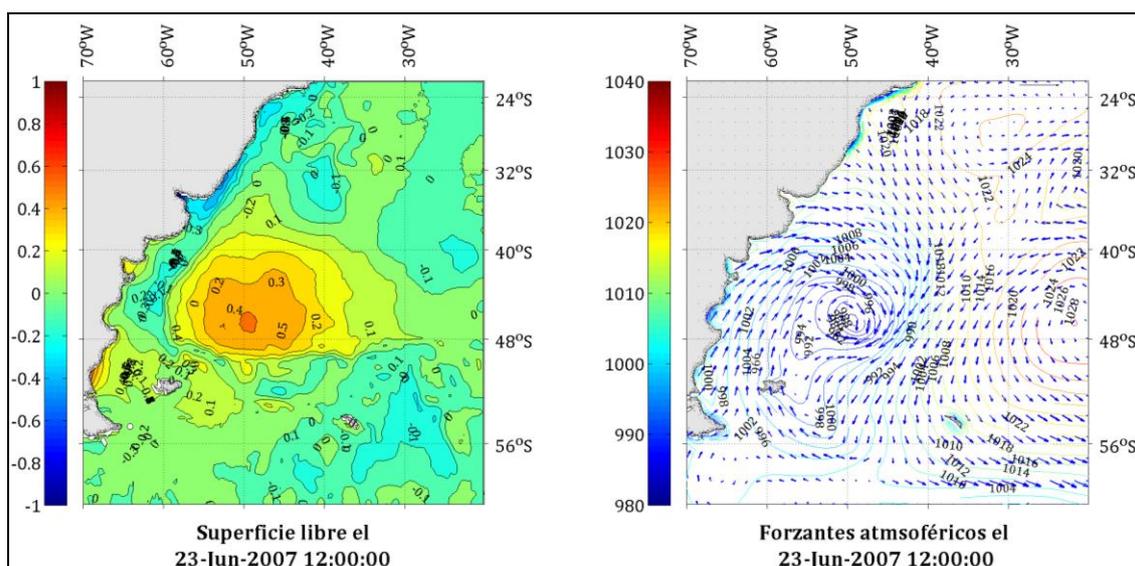


Figura 125: Superficie residual el 23/06 12hs. correspondiente al evento ocurrido entre el 19 y 25 de mayo de 2007.

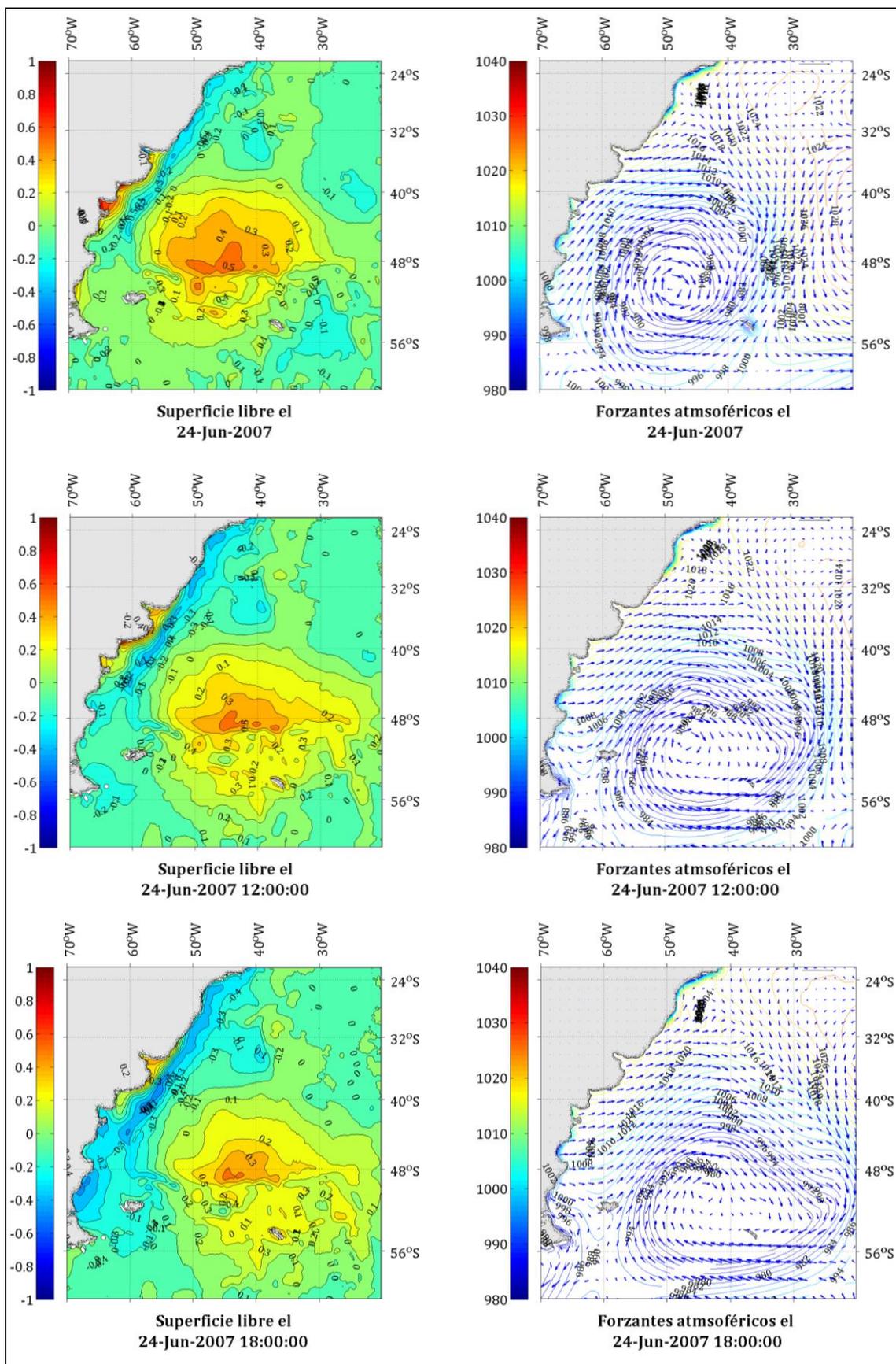


Figura 126: Superficies residuales durante varios instantes correspondientes al evento ocurrido entre el 19 y 25 de mayo de 2007.

Por otra parte se realizaron mapas de correlación entre la serie simulada en la estación Pilote Norden y las series simuladas en el resto de los puntos del dominio para distintos lag's temporales. De esta forma para cada lag se puede realizar un mapa de los valores de correlación. En base a las observaciones realizadas a partir del análisis de las superficies residuales durante los eventos ocurridos en el período simulado se observó que las señales en Pilote Norden se generan en el sur del plataforma argentina. En la medida que esta afirmación sea correcta en los mapas de correlación debería observarse una zona de alta correlación que se encuentre cada vez más al sur en la medida que aumenta el lag temporal.

En la Figura 127 se muestran los mapas de correlación para varios lags temporales, además de los contornos para valores de correlación comprendidos entre 0 y 0,8; las zonas con valores superiores a 0,8 se han rellenado para facilitar su visualización. Dicho valor de correlación es arbitrario, escogido simplemente por ser un valor sumamente elevado, y que se utiliza como rango de alta correlación en este trabajo.

La primera figura para lag cero muestra una zona de alta correlación acotada al Río de la Plata y levemente a la costa sur de Brasil. Para lag 17 horas se puede ver que la región de máxima correlación se encuentra más al sur y en particular los valores de máxima correlación se encuentran en Mar del Plata, lo cual es consistente con el tiempo de viaje estimado en el apartado IV-2.3 entre dichas estaciones. Para lag's cada vez mayores se puede ver como la región de alta correlación se mantiene y se desplaza al sur recostada al continente. Finalmente con un lag de 40 horas la región con correlaciones superiores a 0,8 se extiende aproximadamente en la latitud 45°S. Sin embargo vale la pena destacar que hasta lag 70 horas se mantienen valores de correlación cercanos a 0,5 - 0,6 en la región sur del continente (latitudes cercanas a 53°S).

En resumen, tanto del análisis de las superficies residuales de los eventos ocurridos durante el período simulado y en base a los mapas de correlación realizadas, el modelo confirma que gran parte de las ondas de marea meteorológica que se registran en el Río de la Plata tiene su origen en el sur del plataforma argentina. A su vez el modelo permite observar más claramente el comportamiento sugerido en capítulos anteriores respecto a la influencia de los vientos del NW y SW; se confirma cómo los vientos de la primera dirección inducen regiones de anomalías negativas de nivel, mientras que vientos provenientes de la segunda inducen anomalías positivas. Estas luego se propagan de sur a norte "recostadas" al continente.

Tal como fue presentado en los antecedentes, es posible comprender que los vientos del SW generen por transporte de Ekman una sobre elevación en la costa, que luego se propaga como una onda de Kelvin de sur a norte. Naturalmente, coexisten otros tipos de ondas como las de plataforma, sin embargo dichas ondas tienen un comportamiento distinto en su propagación, siendo más lentas y de menor amplitud.

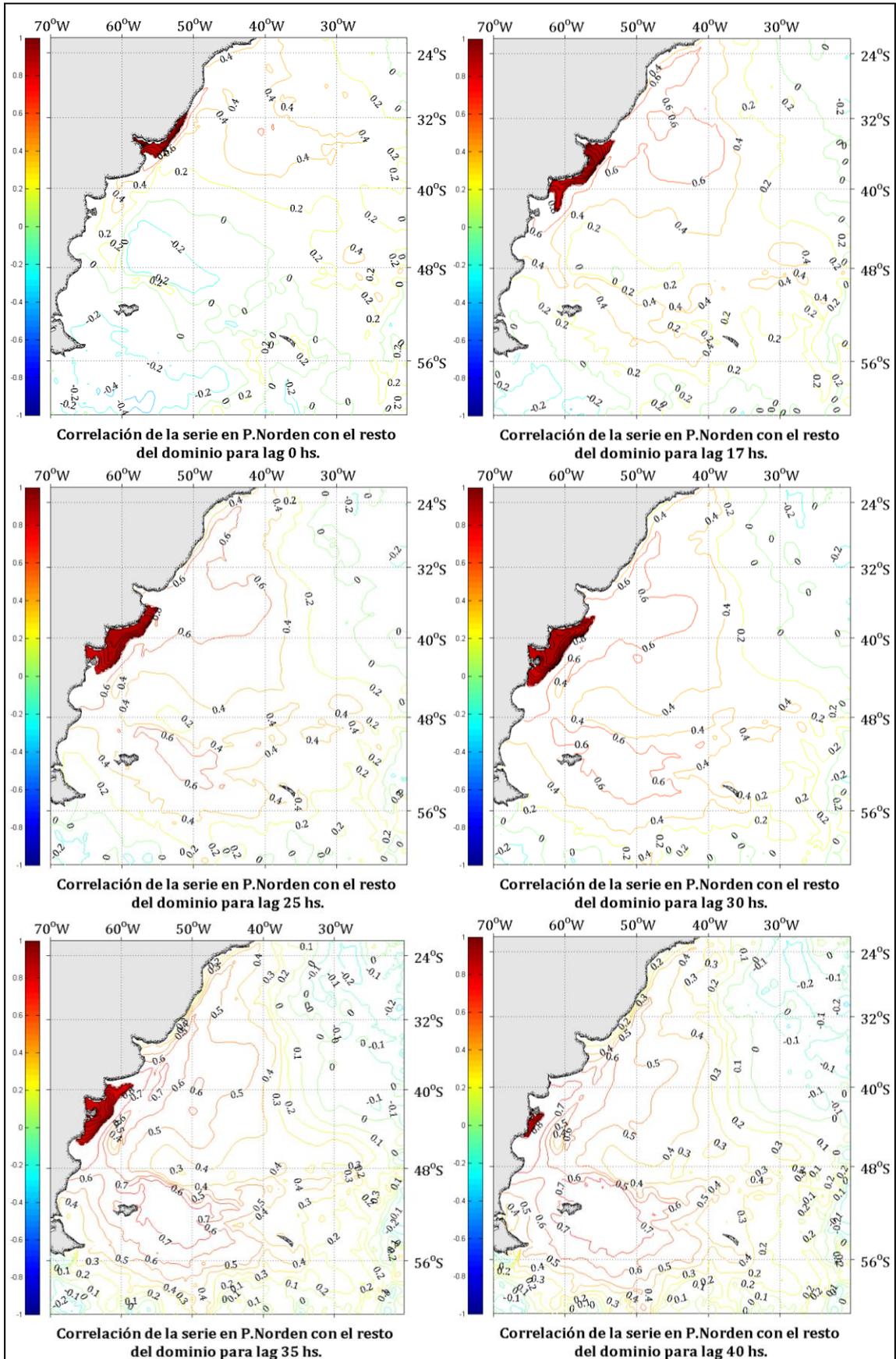


Figura 127: Superficies residuales durante varios instantes correspondientes al evento ocurrido entre el 19 y 25 de mayo de 2007.

VI-6.2.2. Simulaciones con viento y presión por separado

El objetivo de estas simulaciones es obtener una idea del peso relativo del viento frente a la presión en superficie como generadores de ondas de marea en el Río de la Plata. En la Figura 128 y en la Figura 129 se comparan las series observadas, modeladas con viento y presión, y modeladas únicamente con viento o con presión.

Una primera observación que vale la pena destacar es que la suma lineal de las simulaciones con viento y presión por separado prácticamente coincide con los resultados de la simulación con ambos forzantes.

Se puede ver que a excepción del evento ocurrido entre los días 25/05 y 30/05 la simulación que únicamente tiene como forzante la presión en superficie captura muy poco los eventos de las series observadas. Las amplitudes de la simulación con presión son acordes a lo esperado según la relación de barómetro inverso, salvo en algún evento particular como el que tiene lugar a fines de mayo donde la solución con presión realiza un aporte superior al del viento y del orden de 50 cm.

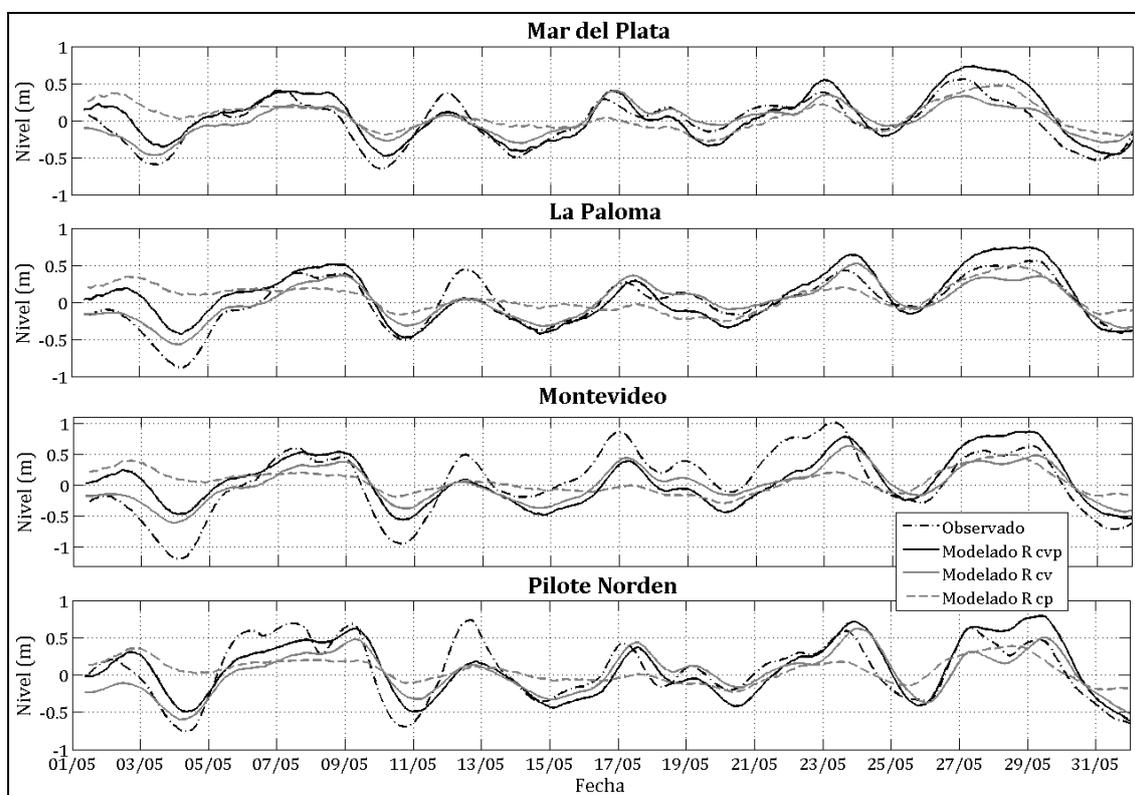


Figura 128: Serie observada, y series modeladas R_{cvp} , R_{cv} y R_{cp} en las estaciones de Mar del Plata, La Paloma, Montevideo y Pilote Norden durante mayo de 2007.

Resulta interesante observar que el máximo relativo que se observa el día 22/06 únicamente en la estación Pilote Norden, es capturado por la simulación con viento únicamente en dicha estación, mientras que la simulación con presión no realiza aporte alguno.

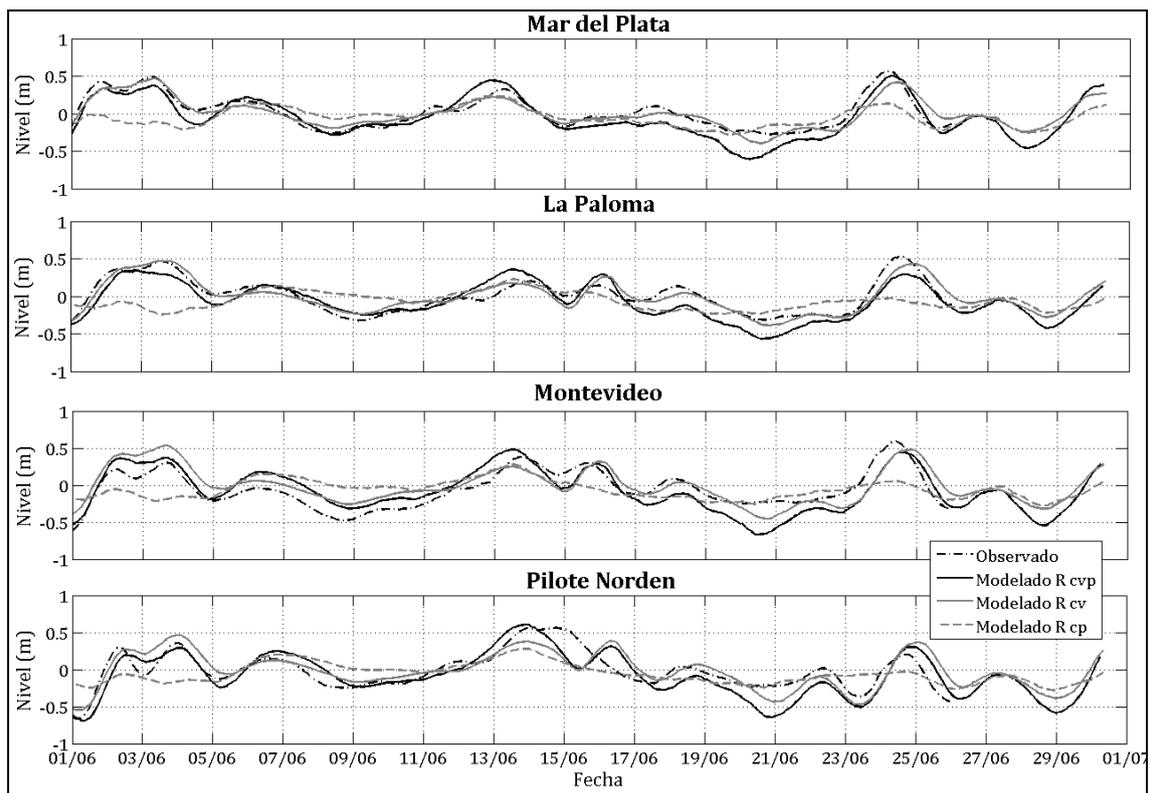


Figura 129: Serie observada, y series modeladas R_cvp, R_cv y R_cp en las estaciones de Mar del Plata, La Paloma, Montevideo y Pilote Norden durante junio de 2007.

VI-6.3. Influencia del forzante local en el Río de la Plata

En la Figura 130 se compara la serie obtenida con el modelo regional y submodelo forzados con viento y presión en superficie, con la serie obtenida forzando únicamente el submodelo con viento y presión. De esta forma es posible evaluar cuánto de la señal es posible generar únicamente a partir del forzante a escala local. Se puede ver que al igual que el efecto de la presión en el modelo regional, las amplitudes generadas por dicho forzante a escala local son pequeñas.

Se puede ver que las afirmaciones antes realizadas acerca de la influencia del forzante local en la amplificación de las ondas en el Río de la Plata son coherentes con lo observado en estas series. Durante eventos como por ejemplo los ocurridos los días 16/05 y 14/06 los cuales no presentan una amplificación significativa desde la estación Mar del Plata a Pilote Norden, no se observa un aporte del forzante local. Se observan otros eventos de nivel máximo ocurridos el 25/05 y 30/05 donde el forzante local hace un pequeño aporte, mientras que existen eventos de menor porte como los ocurridos el 15/06 y 22/06 que pueden ser atribuidos casi en su totalidad al efecto del forzante local.

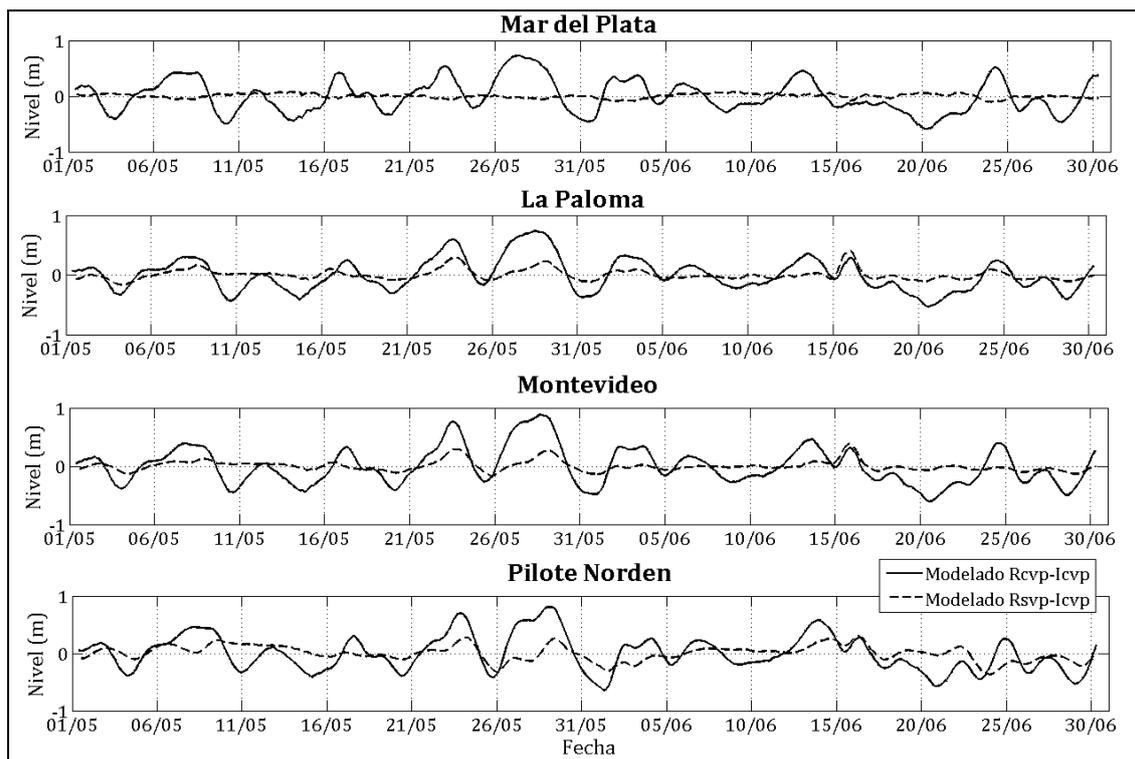


Figura 130: Series residuales obtenidas de las simulaciones R cvp_I cvp y R svp_I cvp durante los meses de mayo y junio de 2007.

VI-7. Síntesis

En este capítulo se han presentado los análisis realizados utilizando el modelo hidrodinámico MOHID. Fue presentada una breve descripción de la implementación utilizada, la cual se desarrolló en el marco de un proyecto de investigación anterior. El período simulado escogido para su análisis se corresponde con los meses de mayo y junio de 2007. Dado que el mismo no coincide con el que fue estudiado en los capítulos anteriores, se presentó aquí una breve caracterización de las series residuales de niveles y los forzantes meteorológicos.

Empleando la implementación regional del modelo se constató que gran parte de los eventos observados en las series residuales de niveles tienen origen en la plataforma continental argentina. Los eventos máximos son forzados bajo condiciones de viento SW, las cuales se entienden inducen una onda de Kelvin que luego se propaga de sur a norte para finalmente ingresar al Río de la Plata. Los eventos de nivel mínimo suelen generarse bajo condiciones de vientos W- NW. Fueron presentados diversos ejemplos de este comportamiento visualizando la superficie libre en conjunto con los forzantes. Además, mapas de correlación de la serie simulada en la estación Pilote Norden con el resto del dominio para distintos lag's temporales, no solo confirmaron las afirmaciones anteriores acerca de la región de generación de la marea meteorológica sino que además brindan una estimación del tiempo de viaje de dichas ondas. En ese sentido se obtuvo que la zona de máxima correlación se ubica en Mar del Plata para un lag de aproximadamente 17 horas, resultado consistente con el obtenido en el apartado

IV-3.2. Hasta lag's cercanos a 40 horas se observan regiones de correlación mayor a 0,8 en latitudes mayores a 40°S.

Las simulaciones con el modelo regional imponiendo el viento y la presión en superficie por separado, mostraron que el primero de estos forzantes tiene mayor relevancia. Aún así, existen eventos puntuales en los que la presión genera un aporte del mismo orden que el viento.

Las simulaciones con el submodelo enfocado al Río de la Plata mostraron que el forzante local realiza un aporte de segundo orden en la amplitud de los eventos, a excepción nuevamente de algunos eventos puntuales de escasa amplitud que únicamente se presentan en el interior del río.

De esta forma los análisis realizados con modelo numérico han complementado los presentados en capítulos anteriores, dando mayor solidez a las conclusiones extraídas anteriormente. La posibilidad de observar la evolución de la superficie libre en conjunto con los forzantes en un extenso dominio, y de realizar simulaciones idealizadas con forzantes por separado y en distintas escalas espaciales, permitió confirmar aquellos comportamientos que se insinuaban a partir de la observación de los forzantes y las series residuales en estaciones del Río de la Plata.

-- Capítulo VII --

Conclusiones

En este trabajo se han estudiado las ondas de marea meteorológica en el Río de la Plata, su vinculación con los forzantes atmosféricos que las generan y las características de su propagación en el estuario.

Se ha sistematizado una gran cantidad de información de niveles observados en varias estaciones mareográficas del Río de la Plata y su frente marítimo, incorporando información a la base de datos pre existente en el IMFIA. La base de datos actual cuenta con un volumen de información muy importante el cual resulta de suma utilidad no sólo para el estudio de los propios datos sino también como insumo para la calibración y validación de modelos numéricos. En lo que respecta a información de variables atmosféricas (viento y presión en superficie) la cantidad de información recopilada es de menor volumen, sin embargo incluye algunas series puntuales de datos observados con una longitud no despreciable e incluye además datos de Re-analysis que presentan la ventaja de estar distribuidos en el espacio.

Fue presentado un análisis exploratorio de todos los datos de niveles disponibles en el Río de la Plata y su frente marítimo a los efectos de familiarizarse con su comportamiento y características. Posteriormente fueron evaluadas tres metodologías a los efectos de remover las oscilaciones astronómicas, optándose por la aplicación de un filtro pasa bajos de 24 horas para obtener lo que se denominaron series residuales de niveles. Estas series residuales son las que se atribuyen a forzantes no astronómicos y se observó que en términos de varianza representan en todas las estaciones estudiadas más de un 50% de la varianza original de las series. Esto pone de manifiesto la importancia que tienen en esta región las oscilaciones no astronómicas, las cuales esencialmente tienen origen meteorológico, y justifican la necesidad de su estudio.

A partir de un análisis conjunto de las series de niveles en diferentes estaciones mareográficas se obtuvieron varias conclusiones a cerca de las características de propagación de las oscilaciones en el río. En primer lugar un análisis de componentes principales arrojó como resultado dos componentes principales que representan en conjunto más del 93% de la varianza original, y la primera de ellas más del 80%. Este resultado muestra la existencia de una fuerte señal que se manifiesta en todas las estaciones dejando claro que gran parte de lo que sucede en las estaciones interiores al estuario es observado en la estación de Mar del Plata y por tanto tiene un origen remoto. La señal observada en dicha estación no sufre grandes modificaciones a menos de un eventual incremento en su amplitud que se observa en los coeficientes del EOF asociado a la primera componente principal y obviamente un desfase en el tiempo que en este análisis es capturado por la segunda componente principal. A los efectos de profundizar, tanto en el aspecto de amplificación como en los desfases de las señales, fueron identificados en las series residuales "eventos" los cuales se definieron como la ocurrencia de un máximo y mínimo consecutivos. Para cada uno de ellos se estimó una amplitud, un período y los respectivos tiempos de viaje tanto del nivel máximo como mínimo entre las distintas estaciones. El análisis de estas características nuevamente muestra en términos medios una amplificación de las señales presentando amplitudes medias durante el período analizado de 42 cm, 55 cm y finalmente 68 cm en Mar del Plata, Montevideo y Buenos Aires respectivamente. Por otra parte se utilizaron varias metodologías para cuantificar el tiempo de viaje medio entre estaciones, obteniendo resultados similares y concluyendo que el tiempo de viaje

de las perturbaciones a la estación Buenos Aires es de, 1 hora o menos desde las estaciones Colonia y Pilote Norden, 5-6 horas desde Montevideo y Torre Oyarvide y por último 17-19 horas desde la estación Mar del Plata. Estos resultados tienen una clara utilidad en términos de un sistema de alerta o predicción en base a una red de observación en tiempo real. A partir de la observación en tiempo real de los niveles en Mar del Plata es posible anticipar la ocurrencia de una onda de tormenta con una antelación de 17 horas.

Posteriormente se buscó comprender la vinculación entre las perturbaciones observadas en las series residuales de niveles con los forzantes atmosféricos. Una primera aproximación consistió en la obtención de "composites" de campos de viento y presión en superficie para los instantes de niveles extremos máximos y mínimos. Los resultados obtenidos son similares a los publicados por varios investigadores de la región. Se puede apreciar en el caso de eventos de niveles máximos un patrón de circulación anticiclónica al sur del Río de la Plata el cual conlleva a la ocurrencia de vientos del SE que se alinean con el eje del río, y vientos del S en la plataforma argentina. Por el contrario en el caso de eventos de niveles mínimos se puede ver que los vientos actuando sobre el río son predominantemente del N - NE, mientras que en la plataforma argentina dominan vientos del N - NW. Estos resultados tienen la carencia de ser obtenidos a partir del análisis de campos simultáneos a la ocurrencia de los eventos de nivel en las estaciones del Río de la Plata y por ende nada dice a cerca de las condiciones previas bajo las que se generaron dichos eventos.

Diversos análisis, tanto sobre datos observados como con herramientas numéricas, mostraron las condiciones y regiones determinantes en la generación de la marea meteorológica en el Río de la Plata. Se concluye que la plataforma argentina juega un rol de suma importancia en la generación de las ondas de marea meteorológica que luego ingresan al Río de la Plata. Las condiciones que desencadenan eventos de niveles máximos en las series residuales de niveles del Río de la Plata se asocian a la ocurrencia de vientos provenientes del SW sobre la región antes mencionada. Por el contrario eventos de niveles mínimos en las series residuales observadas en el río tienen lugar en general luego de la ocurrencia de vientos del W - NW sobre la plataforma argentina. La gran mayoría de los eventos observados en las series residuales de niveles tienen un origen remoto, sin embargo existen eventos aislados de menor magnitud que se observan únicamente en las estaciones más interiores del Río de la Plata y se pueden atribuir al efecto de los forzantes a escala local. A su vez, el forzante local parece tener una influencia en la amplificación de los eventos que tiene origen remoto, siendo los vientos alineados con el eje del estuario los que favorecen el incremento de los niveles máximos cuando son del SE y disminuyen los niveles mínimos cuando son del NW.

Las conclusiones descritas en el párrafo anterior se consolidaron en base a los resultados de varios análisis. La comparación de series residuales de niveles en el Río de la Plata con vientos medidos en la estación Pilote Norden fue un primer indicio acerca de la importancia de los vientos provenientes del SW en la generación de eventos de niveles máximos. Luego se observó la situación sinóptica durante una gran cantidad de eventos en conjunto con las series residuales, identificando situaciones sinópticas típicas que daban lugar a las ondas de marea meteorológica en el Río de la Plata. Finalmente con la ayuda del modelo numérico fue posible observar la respuesta del cuerpo de agua a los forzantes antes

identificados, confirmando que la misma es la que se intuía a partir de la observación de los campos de viento y presión, en conjunto con las series de niveles en el Río de la Plata.

Por otra parte, el modelo numérico permitió obtener una idea acerca de la importancia relativa de los distintos forzantes atmosféricos, y la escala en la que actúan. En este sentido se realizaron simulaciones en un dominio regional con viento y presión por separado, constatando que el efecto de la presión es de menor orden en general, sin embargo existen eventos en los que tiene un efecto no despreciable. Se realizaron por otra parte simulaciones con un subdominio enfocado al Río de la Plata utilizando condiciones de borde astronómicas y aplicando el forzante atmosférico únicamente a esa escala local. Los resultados confirman que dicho forzante local en algunos casos contribuye en la amplificación de eventos, y en algunos casos puntuales es el responsable directo de eventos con una amplitud no muy significativa que tiene lugar únicamente en la región media e interior del Río de la Plata.

Se puede decir que al culminar este trabajo se ha avanzado significativamente en la respuesta a las interrogantes que fueron planteadas en la introducción. Por otra parte varios de los resultados obtenidos son consistentes con los publicados por investigadores de la región, mientras que otros tales como la importancia relativa del forzante remoto frente al local en el Río de la Plata contrastan con trabajos que han sido referencia durante muchos años como por ejemplo Balay (1953). Si bien este último es un trabajo de excelente calidad, más aún teniendo en cuenta la época en la que fue realizado, a la luz de los resultados obtenidos en esa tesis parece no identificar completamente la relevancia del rol que juega el forzante remoto en la génesis en la marea meteorológica en el Río de la Plata.

Finalmente, si bien el avance en la comprensión del fenómeno en estudio ha sido significativo, esta línea de investigación tiene mucho más por delante. Una vez comprendido que la generación de la marea meteorológica observada en el Río de la Plata tiene lugar en una gran mayoría de los casos en el sur de la plataforma argentina, se deben centrar los esfuerzos en comprender las características de su propagación en la plataforma antes de ingresar al Río de la Plata. En este trabajo únicamente se identificó la relevancia de dicha zona. Los detalles acerca de la amplificación de las ondas en la medida que se propagan por la plataforma, la interacción entre ondas de distinta naturaleza (ondas de Kelvin, ondas de plataforma, etc.), y finalmente el estudio de eventos singulares, son algunas de las tantas tareas que dejan abierta esta interesante línea de investigación.

-- Capítulo VIII --

Bibliografía

- Alessandro, A. T.** (2005). Synoptic features associated with critical water level rises in the Río de la Plata. *Meteorol. Appl.*, Vol. 12, pp. 123-133.
- Balay, M. A.** (1956). Determination of mean sea level of Argentine Sea. Influences of oscillations of the sea not caused by tides. *International Hydrographic Review* (Monaco), Vol. 33(2), pp. 31-65.
- Balay, M. A.** (1959). Causes and periodicity of large floods in Rio de la Plata (flood of 27 and 28 July 1958). *International Hydrographic Review (Mónaco)* Vol. 36(1), pp. 123-151.
- Boschi, E.E.** (1988). El ecosistema estuarial del Río de la Plata (Argentina y Uruguay). *An. Inst. Cienc. Mar Limnol.*, Univ. Nac. Autón., México, 15(2): pp. 159-182.
- Comisión Administradora del Río de la Plata, CARP - IMFIA**, (1992). Corrientes y sedimentos en el Río de la Plata.
- Dudhia, J.**, (1989). "Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model", *J. Atmos. Sci.*, 46, pp. 3077-3107.
- D'Onofrio E, Fiore M, Romero S**, (1999) "Return periods of extreme water levels estimated for some vulnerable areas of Buenos Aires". *Continental Shelf Research* Vol. 19, pp. 1681-1693.
- Ekman, V.W.** (1905). "On the influence of the earth's rotation on ocean currents". *Ark. Mat. Astron. Fys.* 2 (11), pp. 1-52.
- Escobar G, Vargas W, and Bischoff S.** (2004). "Wind tides in the Rio de la Plata estuary: meteorological conditions". *International Journal of climatology* Vol. 24, pp. 1156-1169.
- Etala, P.**, (2009). "Dynamic issues in the SE South America storm surge modeling." *Nat. Hazards* 51, pp. 79-95.
- Etala, P.**, (2009). "On the accuracy of atmospheric forcing for extra-tropical storm surge prediction." *Nat. Hazards* 51, pp. 49-61.
- Fernández M, Santoro P, Cazes G, Fossati M, Piedra Cueva I.** (2008). "Implementación de un modelo hidrodinámico del Atlántico Sur forzado por un modelo atmosférico de mesoescala". *XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Cartagena de Indias, Colombia.
- Flather, R.A.**, (1976) "A tidal model of the northwest European continental shelf." *Mem. Soc. R. Sci. Liege*, Ser. 6 10, pp. 141-164.
- Fossati, M. & Piedra-Cueva, I.** (2004). "Modelación numérica del frente salino en el Río de la Plata". *IAHR. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, San Pablo, Brasil. Artículo completo.
- Fossati, M.** (2005). "Modelación bidimensional del campo salino en el Río de la Plata". Tesis de maestría bajo la tutoría del Dr. Ing. Ismael Piedra-Cueva, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay.
- Fossati, M. & Piedra-Cueva, I.**, (2008). "Numerical modelling of residual flow and salinity in the Rio de la Plata". *Applied Mathematical Modelling*. Vol. 32, Issue 6, pp. 1066-1086.

Fossati, M., Fernández, M., Piedra-Cueva, I., (2009). "Implementation of a 3D Lagrangian Model for evaluating submarine outfalls in the Rio de la Plata coastal area". *33RD IAHR CONGRESS*. Water Engineering for a Sustainable Environment. International Association of Hydraulic Engineering & Research. Vancouver, British Columbia, Canada. August 9-14. Congreso Internacional Arbitrado. Artículo completo.

Fossati M., Moreira D., Simionato C., Cayocca F., Tessier C., Sarubbi A. y Re M. (2010). "Estudio del transporte de sedimentos en el Río de la Plata: primeros resultados de la modelación numérica". *IAHR. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Punta del Este, Uruguay. Artículo completo.

Gagliardini D., Karszenbaum R., Legeckis R. & Klemas V. (1984). "Application of Landsat MSS, NOAA/TIROS AVHRR, and Nimbus CZCS to study the La Plata River and its interaction with the ocean". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 15, pp. 21-36.

Glorioso, P., Flather, R., (1995). "A barotropic model of the currents off SE South America." *J. Geophys. Res.* 100, pp. 13427-13440.

Hong, S.-Y., Dudhia, J., and Chen, S.-H., (2004). "A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation", *Mon. Wea. Rev.*, 132, pp. 103-120.

Hong, S.-Y., and H.-L. Pan, (1996). "Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model", *Mon. Wea. Rev.*, 124, pp. 2322-2339.

Kain, J. S., and Fritsch, J. M., (1993). "Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme, The representation of cumulus convection in numerical models", *K. A. Emanuel and D.J. Raymond, Eds., Amer. Meteor. Soc.*, 246.

Kalnay E, M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne, and D. Joseph, (1996). "The NMC/NCAR 40-Year Reanalysis Project". *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 pp. 437-471.

Large, W.G., Pond, S., (1981). "Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds", *J. Phys. Ocean.* 11, pp. 324-336.

Mlawer, E. J., Taubman, S. J. , Brown, P. D., Iacono, M. J. and Clough, S. A. , (1997). "Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave." *J. Geophys. Res.*, 102 (D14), pp. 16663-16682.

Martins, F., R. Neves, P. Leitão & A. Silva (2001). "3D Modelling in the Sado Estuary using a New Generic Vertical Discretization Approach." *Oceanologica Acta* 24, S51-S62.

Mitchum, G. T., (1993) "Principal component analysis: Basic methods and extensions". *Probability Concepts in Physical Oceanography: Proc. 'Aha Huliko'a Hawaiian winter workshop, Honolulu, HI, University of Hawaii at Manoa*, pp. 185-199.

- Molinari, G. N.**, (1986). Simulación Numérica de la Circulación en el Río de La Plata, tesis de grado para la Licenciatura en Oceanografía. Instituto Tecnológico Buenos Aires.
- Monin, A.S. and Obukhov A.M.**, (1954). "Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere." *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci., USSR*, 151, pp. 163–187.
- Montero, P.** (1999). *Estudio de la hidrodinámica de la Río de Vigo mediante un modelo de volúmenes finitos*. Tesis de doctorado, Universidad Santiago de Compostela, Facultad de Física.
- O' Connor W.** (1991). "A numerical model of tides and storm surges in the Rio de la Plata Estuary". *Continental Shelf Research* Vol. 11, N° 12, pp. 1491-1508.
- Pawlowicza R.; Beardsleyb, B.; Lentz, S.** (2002). "Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T TIDE". *Computers & Geosciences* 28, pp. 929–937.
- Piedra-Cueva, I. & Fossati, M.** (2007). "Residual currents and corridor of flow in the Rio de la Plata". *Applied Mathematical Modelling*. Vol. 31, pp. 564–577.
- Piedra-Cueva, I., Terra, R., Cazes, G., Fossati, M., Fernández, M., Santoro, P.**, (2008). *Modelo Pre-operacional del Río de la Plata*. Informe Final - Proyecto PDT S/C/OP/70/01.
- Piedra-Cueva, I., Fossati, M., Santoro, P.**, (2008). "Evaluación ambiental prospectiva de la Bahía de Montevideo". Informe Final - Convenio entre la Administración Nacional de Puertos y la Facultad de Ingeniería.
- Proudman, J.** (1953). *Dynamical Oceanography*. London: Methuen and Co., 409 pp.
- Pugh, D. T.** (1987) *Tides, surges and mean sea-level*. John Wiley & Sons, Chichester. 472 pp.
- Ruiz-Villarreal, M., Montero, P., Taboada, J.J., Prego, R., Leitaño, P.C., Pérez-Villar, V.**, (2002). "Hydrodynamic Model Study of the Ria de Pontevedra under Estuarine Conditions." *Estuarine Coastal, Shelf Science* 54, pp. 101–113.
- Santoro, P., Fossati, M., Piedra-Cueva, I.** (2008). "Análisis de la circulación en la Bahía de Montevideo". *IAHR, XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Cartagena de Indias, Colombia. Artículo completo.
- Santoro, P., Fernández, M., Fossati, M., Cazes, G., Terra, R., Piedra-Cueva, I.**, (2011). "Pre-operational forecasting of sea level height for the Río de la Plata". *Applied Mathematical Modelling* 35, pp. 2462–2478
- Saraceno, M., D'Onofrio, E., Fiore M., Grismeyer, W.**, (2010). "Tide model comparison over the Southwestern Atlantic Shelf." *Cont. Shelf Res.* 30, pp. 1865 – 1875.
- Simionato, C.G., Meccia, V.L., Dragani, W.C., Nuñez, M.N.** (2006). "On the use of the NCEP/NCAR surface winds for modeling barotropic circulation in the Río de la Plata Estuary" *Estuarine Coastal and Shelf Science* 70, pp. 195-206.
- Taboada, J., Prego, R., Ruiz-Villarreal, M., Montero, P., Gómez- Gesteira, M., Santos, A. y Pérez-Villar, V.** (1998). "Evaluation of the seasonal variations in the

residual patterns in the Ría de Vigo (NWSpain) by means of a 3D baroclinic model.”
Estuarine Coastal and Shelf Science 47, pp. 661-670.

Wilks, D.S., 2006. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, 2nd Ed. International Geophysics Series, Vol. 59, Academic Press, 627 pp.

-- Capítulo IX --

Agradecimientos

A mis tutores y jefes, Ismael Piedra-Cueva y Mónica Fossati, por darme todo el espacio necesario para la realización de este trabajo y su enorme apoyo tanto en aspectos técnicos como personales.

A la Agencia Nacional de Investigación e Innovación por haberme otorgado una beca de posgrado para la realización de la maestría.

A los distintos organismos y empresas, de Uruguay y Argentina, que suministraron los datos necesarios para la realización de este trabajo.

A los docentes del IMFIA que estuvieron siempre dispuestos a asesorarme en temas relativos a su especialidad (en especial Álvaro Díaz, Gabriel Usera, Rafael Terra, Gabriel Cazes y Francisco Pedocchi).

Al profesor Marcelo Barreiro de la Facultad de Ciencias por los cursos dictados, en particular el curso Oceanografía Dinámica cuya iniciativa atendió en parte los intereses de nuestro grupo de trabajo por tener una formación en dicha temática. Así como también por el tiempo dedicado al intercambio de ideas sobre éste y otros trabajos, de los cuales siempre surgieron aportes muy interesantes.

A todos los compañeros de maestría, en especial Mariana Fernández con quien además tengo el gusto de trabajar de cerca y realizamos este camino en paralelo, apoyándonos mutuamente en los momentos difíciles.

Y finalmente, pero sin duda los más importantes, a mi madre y a mi novia por su infinito apoyo en todo durante este largo tiempo de trabajo.

-- Capítulo X --

Anexos

X-1. Información de niveles disponible

Mar del Plata

		Mes												Total
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
1982	N° de datos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	408	408
	N° de datos faltantes	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	336	8352
	% datos faltante	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	45,16	95
1983	N° de datos	744	360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1104
	N° de datos faltantes	0	312	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	7656
	% datos faltante	0	46,43	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	87
1987	N° de datos	744	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	744
	N° de datos faltantes	0	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8016
	% datos faltante	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	92
1991	N° de datos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	744	720	744	2208
	N° de datos faltantes	744	672	744	720	744	720	744	744	720	0	0	0	6552
	% datos faltante	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	0	75
1992	N° de datos	744	696	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1440
	N° de datos faltantes	0	0	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	7344
	% datos faltante	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	83
1993	N° de datos	0	0	0	0	0	720	744	744	720	744	720	744	5136
	N° de datos faltantes	744	672	744	720	744	0	0	0	0	0	0	0	3624
	% datos faltante	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0	42
1997	N° de datos	0	0	0	0	0	676	744	744	720	744	720	744	5092
	N° de datos faltantes	744	672	744	720	744	44	0	0	0	0	0	0	3668
	% datos faltante	100	100	100	100	100	6,11	0	0	0	0	0	0	42
1998	N° de datos	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	0	8016
	N° de datos faltantes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	744	744
	% datos faltante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	8
2000	N° de datos	0	696	744	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1440
	N° de datos faltantes	744	0	0	720	744	720	744	744	720	744	720	744	7344
	% datos faltante	100	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	83
2002	N° de datos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	687	687
	N° de datos faltantes	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	57	8073
	% datos faltante	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	7,66	92
2003	N° de datos	744	672	744	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2904
	N° de datos faltantes	0	0	0	720	744	720	744	744	720	744	720	0	5856
	% datos faltante	0	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100	0	67
2004	N° de datos	586	696	744	720	744	720	744	744	0	744	720	0	7162
	N° de datos faltantes	158	0	0	0	0	0	0	0	720	0	0	744	1622
	% datos faltante	21,24	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	100	18
2005	N° de datos	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	0	744	8040
	N° de datos faltantes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	720	0	720
	% datos faltante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	8
2006	N° de datos	594	0	0	620	744	648	744	744	720	744	720	0	6278
	N° de datos faltantes	150	672	744	100	0	72	0	0	0	0	0	744	2482
	% datos faltante	20,16	100	100	13,89	0	10	0	0	0	0	0	100	29
2007	N° de datos	0	0	0	0	744	720	0	0	0	0	0	0	1464
	N° de datos faltantes	744	672	744	720	0	0	744	744	720	744	720	744	7296
	% datos faltante	100	100	100	100	0	0	100	100	100	100	100	100	83
2008	N° de datos	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	743	8783
	N° de datos faltantes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	% datos faltante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Estudio de la marea meteorológica en el Río de la Plata

La Paloma

		Mes												Total
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
1982	N° de datos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	408	408
	N° de datos faltantes	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	336	8352
	% datos faltante	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	45	95
1983	N° de datos	744	360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1104
	N° de datos faltantes	0	312	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	7656
	% datos faltante	0	46	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	87
1991	N° de datos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	587	330	917	
	N° de datos faltantes	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	133	7843	
	% datos faltante	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	18	90	
1992	N° de datos	650	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	650	
	N° de datos faltantes	94	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	8134	
	% datos faltante	13	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	93	
1993	N° de datos	0	0	0	0	632	744	735	657	590	680	558	4596	
	N° de datos faltantes	744	672	744	720	744	88	9	63	154	40	186	4164	
	% datos faltante	100	100	100	100	100	12	0	9	21	6	25	48	
1997	N° de datos	0	0	0	0	720	723	739	713	740	717	741	5093	
	N° de datos faltantes	744	672	744	720	744	0	21	5	7	4	3	3667	
	% datos faltante	100	100	100	100	100	0	3	1	1	1	0	42	
1998	N° de datos	744	662	744	720	744	720	1	0	0	0	0	4335	
	N° de datos faltantes	0	10	0	0	0	0	743	744	720	744	720	4425	
	% datos faltante	0	1	0	0	0	0	100	100	100	100	100	50	
1999	N° de datos	737	672	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1409	
	N° de datos faltantes	7	0	744	720	744	720	744	744	720	744	744	7351	
	% datos faltante	1	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	83	
2000	N° de datos	0	563	696	24	0	0	0	0	0	0	0	1283	
	N° de datos faltantes	744	109	48	696	744	720	744	744	720	744	744	7477	
	% datos faltante	100	16	6	97	100	100	100	100	100	100	100	85	
2002	N° de datos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	720	744	1464	
	N° de datos faltantes	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	0	7296	
	% datos faltante	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	83	
2003	N° de datos	744	672	417	0	0	0	0	0	0	0	744	2577	
	N° de datos faltantes	0	0	327	720	744	720	744	744	720	744	720	6183	
	% datos faltante	0	0	44	100	100	100	100	100	100	100	100	70	
2004	N° de datos	505	311	744	720	744	264	744	744	720	744	744	7704	
	N° de datos faltantes	239	385	0	0	0	456	0	0	0	0	0	1080	
	% datos faltante	32	55	0	0	0	63	0	0	0	0	0	13	
2005	N° de datos	744	672	744	720	744	720	744	649	622	732	720	8504	
	N° de datos faltantes	0	0	0	0	0	0	0	95	98	12	0	256	
	% datos faltante	0	0	0	0	0	0	0	13	14	2	0	3	
2007	N° de datos	0	0	0	0	1488	1223	0	0	0	0	0	2711	
	N° de datos faltantes	1536	1296	1488	1440	0	217	1488	1488	1440	1488	1440	14808	
	% datos faltante	100	100	100	100	0	15	100	100	100	100	100	85	

Torre Oyarvide

		Mes												Total
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
1982	N° de datos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	408	408
	N° de datos faltantes	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	336	8352
	% datos faltante	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	45	95
1983	N° de datos	744	360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1104
	N° de datos faltantes	0	312	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	7656
	% datos faltante	0	46	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	87
1987	N° de datos	0	0	0	0	0	0	0	0	744	720	744	2208	
	N° de datos faltantes	744	672	744	720	744	720	744	744	720	0	0	6552	
	% datos faltante	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	75	
1991	N° de datos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	720	744	2208	
	N° de datos faltantes	744	672	744	720	744	720	744	744	720	0	0	6552	
	% datos faltante	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	75	
1992	N° de datos	744	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	744	
	N° de datos faltantes	0	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	8040	
	% datos faltante	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	92	
1993	N° de datos	0	0	0	0	0	0	591	720	744	720	744	3519	
	N° de datos faltantes	744	672	744	720	744	720	744	153	0	0	0	5241	
	% datos faltante	100	100	100	100	100	100	100	21	0	0	0	60	
1997	N° de datos	0	445	0	0	0	0	0	0	0	0	744	1189	
	N° de datos faltantes	744	227	744	720	744	720	744	744	720	744	720	7571	
	% datos faltante	100	34	100	100	100	100	100	100	100	100	100	86	
1998	N° de datos	744	672	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1416	
	N° de datos faltantes	0	0	744	720	744	720	744	744	720	744	720	7344	
	% datos faltante	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	83	
1999	N° de datos	0	672	744	24	0	0	0	0	0	0	0	1440	
	N° de datos faltantes	744	0	0	696	744	720	744	744	720	744	720	7320	
	% datos faltante	100	0	0	97	100	100	100	100	100	100	100	83	
2002	N° de datos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	744	744	
	N° de datos faltantes	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	8016	
	% datos faltante	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	92	
2003	N° de datos	744	672	744	720	744	0	0	0	0	0	0	3624	
	N° de datos faltantes	0	0	0	0	0	720	744	744	720	744	720	5136	
	% datos faltante	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	100	58	
2004	N° de datos	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	8783	
	N° de datos faltantes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	% datos faltante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Estudio de la marea meteorológica en el Río de la Plata

Punta del Este

Mes		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
1987	Nº de datos	743	672	744	720	744	720	1	0	0	0	0	0	4344
	Nº de datos faltantes	1	0	0	0	0	0	743	744	720	744	720	744	4416
	% datos faltante	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	100	50
1991	Nº de datos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	714	744	1458
	Nº de datos faltantes	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	6	0	7302
	% datos faltante	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1	0	83
1992	Nº de datos	744	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	745
	Nº de datos faltantes	0	671	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8015
	% datos faltante	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	92
1993	Nº de datos	0	0	0	0	0	720	666	675	591	474	312	744	4182
	Nº de datos faltantes	744	672	744	720	744	0	78	69	129	270	408	0	4578
	% datos faltante	100	100	100	100	100	0	10	9	18	36	57	0	53
1998	Nº de datos	0	655	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	656
	Nº de datos faltantes	744	17	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8104
	% datos faltante	100	3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	92
2002	Nº de datos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	650	650
	Nº de datos faltantes	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	94	8110
	% datos faltante	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	13	93
2003	Nº de datos	702	623	552	0	0	0	0	0	0	0	0	727	2604
	Nº de datos faltantes	42	49	192	720	744	720	744	744	720	744	720	17	6156
	% datos faltante	6	7	26	100	100	100	100	100	100	100	100	2	70
2004	Nº de datos	457	551	744	720	744	720	744	744	195	744	615	744	7722
	Nº de datos faltantes	287	145	0	0	0	0	0	0	525	0	105	0	1062
	% datos faltante	39	21	0	0	0	0	0	0	73	0	15	0	12
2005	Nº de datos	577	551	744	720	744	720	744	744	720	744	623	721	8352
	Nº de datos faltantes	167	121	0	0	0	0	0	0	0	0	97	23	408
	% datos faltante	22	18	0	0	0	0	0	0	0	0	13	3	5

Montevideo

Mes		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
1986	Nº de datos	0	0	0	0	0	0	0	743	639	654	671	744	3451
	Nº de datos faltantes	744	672	744	720	744	720	744	1	81	90	49	0	5309
	% datos faltante	100	100	100	100	100	100	100	0,13	11,25	12,10	6,81	0,00	61
1987	Nº de datos	711	640	744	360	0	0	0	0	0	0	0	0	2455
	Nº de datos faltantes	33	32	0	360	744	720	744	744	720	744	720	744	6305
	% datos faltante	4,44	4,76	0	50	100	100	100	100	100	100	100	100	72
1991	Nº de datos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	720	635	1355
	Nº de datos faltantes	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	0	109	7405
	% datos faltante	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	14,65	85
1992	Nº de datos	286	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	286
	Nº de datos faltantes	458	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8498
	% datos faltante	61,6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97
1993	Nº de datos	0	0	0	0	0	720	744	744	720	744	546	302	4520
	Nº de datos faltantes	744	672	744	720	744	0	0	0	0	0	174	442	4240
	% datos faltante	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	24,17	59,41	49
1998	Nº de datos	0	667	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	667
	Nº de datos faltantes	744	5	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8093
	% datos faltante	100	0,74	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	92
2000	Nº de datos	0	1392	1488	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2880
	Nº de datos faltantes	1488	0	0	1440	1488	1440	1488	1488	1440	1488	1440	1488	14688
	% datos faltante	100	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	83
2002	Nº de datos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	744	744
	Nº de datos faltantes	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	0	8016
	% datos faltante	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	92
2003	Nº de datos	528	418	145	0	0	0	0	0	0	0	0	744	1835
	Nº de datos faltantes	216	254	599	720	744	720	744	744	720	744	720	0	6925
	% datos faltante	29,03	37,80	80,51	100	100	100	100	100	100	100	100	0	79
2004	Nº de datos	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8784
	Nº de datos faltantes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	% datos faltante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
2005	Nº de datos	737	0	532	712	573	700	744	744	720	744	720	744	7670
	Nº de datos faltantes	7	672	212	8	171	20	0	0	0	0	0	0	1090
	% datos faltante	0,94	100	28,49	1,11	22,98	2,78	0	0	0	0	0	0	13
2006	Nº de datos	248	224	248	240	248	240	248	247	240	248	240	248	2919
	Nº de datos faltantes	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
	% datos faltante	0,00	0	0	0	0	0	0	0,40	0	0	0	0	0
2007	Nº de datos	248	224	248	238	247	235	248	128	164	248	240	248	2716
	Nº de datos faltantes	0	0	0	2	1	5	0	120	76	0	0	0	204
	% datos faltante	0	0	0	0,83	0,40	2,08	0,00	48,39	31,67	0	0	0	7
2008	Nº de datos	248	232	87	169	248	240	248	248	240	248	240	248	2696
	Nº de datos faltantes	0	0	161	71	0	0	0	0	0	0	0	0	232
	% datos faltante	0,00	0	64,9	29,58	0	0	0	0	0	0	0	0	8

Estudio de la marea meteorológica en el Río de la Plata

Buenos Aires

		Mes												Total
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
1991	N° de datos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	744	720	744	2208
	N° de datos faltantes	744	672	744	720	744	720	744	744	720	0	0	0	6552
	% datos faltante	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	0	75
1992	N° de datos	736	696	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1432
	N° de datos faltantes	8	0	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	7352
	% datos faltante	1,08	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	83
1993	N° de datos	0	0	0	0	0	715	744	744	720	744	720	744	5131
	N° de datos faltantes	744	672	744	720	744	5	0	0	0	0	0	0	3629
	% datos faltante	100	100	100	100	100	1	0	0	0	0	0	0	42
1997	N° de datos	744	672	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1416
	N° de datos faltantes	0	0	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	7344
	% datos faltante	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	83
1998	N° de datos	0	672	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	672
	N° de datos faltantes	744	0	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8088
	% datos faltante	100	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	92
2000	N° de datos	744	696	744	0	744	0	0	0	0	0	0	0	2928
	N° de datos faltantes	0	0	0	720	0	720	744	744	720	744	720	744	5856
	% datos faltante	0	0	0	100	0	100	100	100	100	100	100	100	67
2002	N° de datos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	744	744
	N° de datos faltantes	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	0	8016
	% datos faltante	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	92
2003	N° de datos	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8760
	N° de datos faltantes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	% datos faltante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2004	N° de datos	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8784
	N° de datos faltantes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	% datos faltante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Estación Colonia

		Mes												Total
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
1991	N° de datos	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	269	426	703
	N° de datos faltantes	744	672	744	720	744	720	744	736	720	744	451	318	8057
	% datos faltante	100	100	100	100	100	100	100	99	100	100	63	43	92
1992	N° de datos	376	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	377
	N° de datos faltantes	368	695	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8407
	% datos faltante	49,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	96
1993	N° de datos	0	0	0	0	0	179	593	642	692	663	110	0	2879
	N° de datos faltantes	744	672	744	720	744	541	151	102	28	81	610	744	5881
	% datos faltante	100	100	100	100	100	75	20	14	4	11	85	100	67
1997	N° de datos	0	672	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	672
	N° de datos faltantes	744	0	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8088
	% datos faltante	100	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	92
2000	N° de datos	2684	696	744	2497	2620	2563	0	0	0	0	0	0	11804
	N° de datos faltantes	291	2088	2232	383	356	317	2976	2976	2880	2976	2880	2976	23331
	% datos faltante	10	75	75	13	12	11	100	100	100	100	100	100	66
2002	N° de datos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	744	744
	N° de datos faltantes	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	0	8016
	% datos faltante	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	92
2003	N° de datos	744	672	744	0	0	0	0	0	0	0	0	744	2904
	N° de datos faltantes	0	0	0	720	744	720	744	744	720	744	720	0	5856
	% datos faltante	0	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100	0	67
2004	N° de datos	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8784
	N° de datos faltantes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	% datos faltante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	N° de datos	744	672	744	720	744	0	0	0	0	0	0	0	3624
	N° de datos faltantes	0	0	0	0	0	720	744	744	720	744	720	744	5136
	% datos faltante	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	100	100	58

Pilote Norden

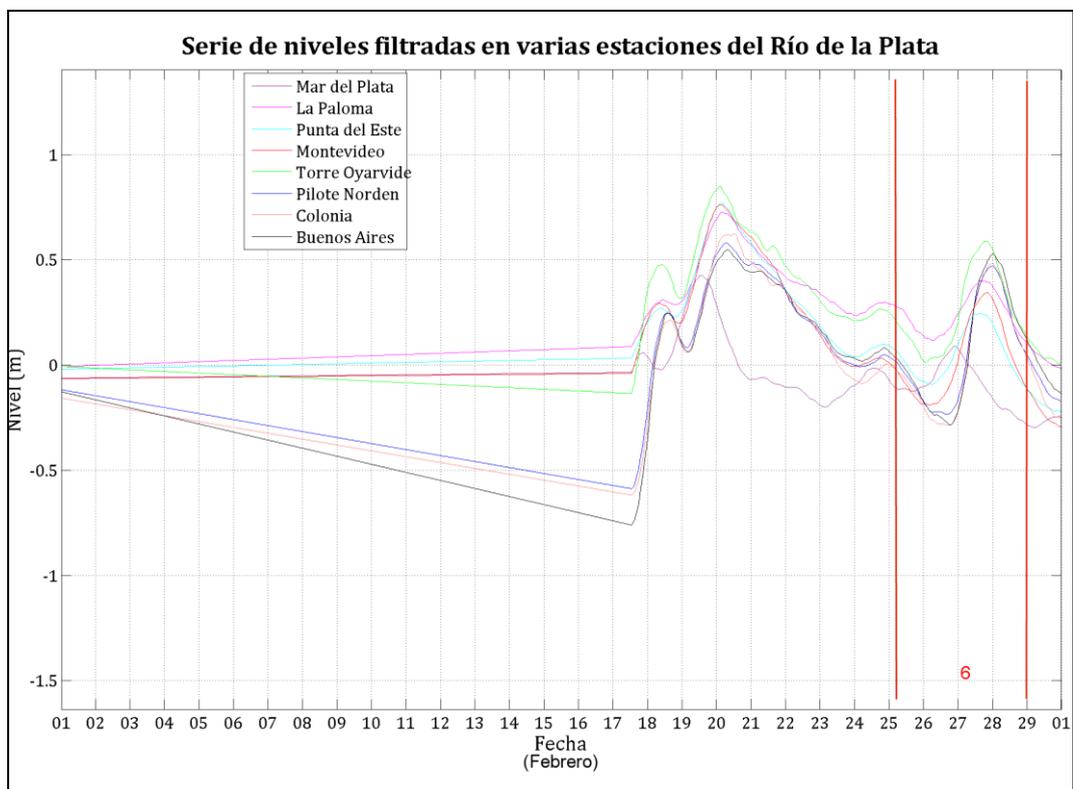
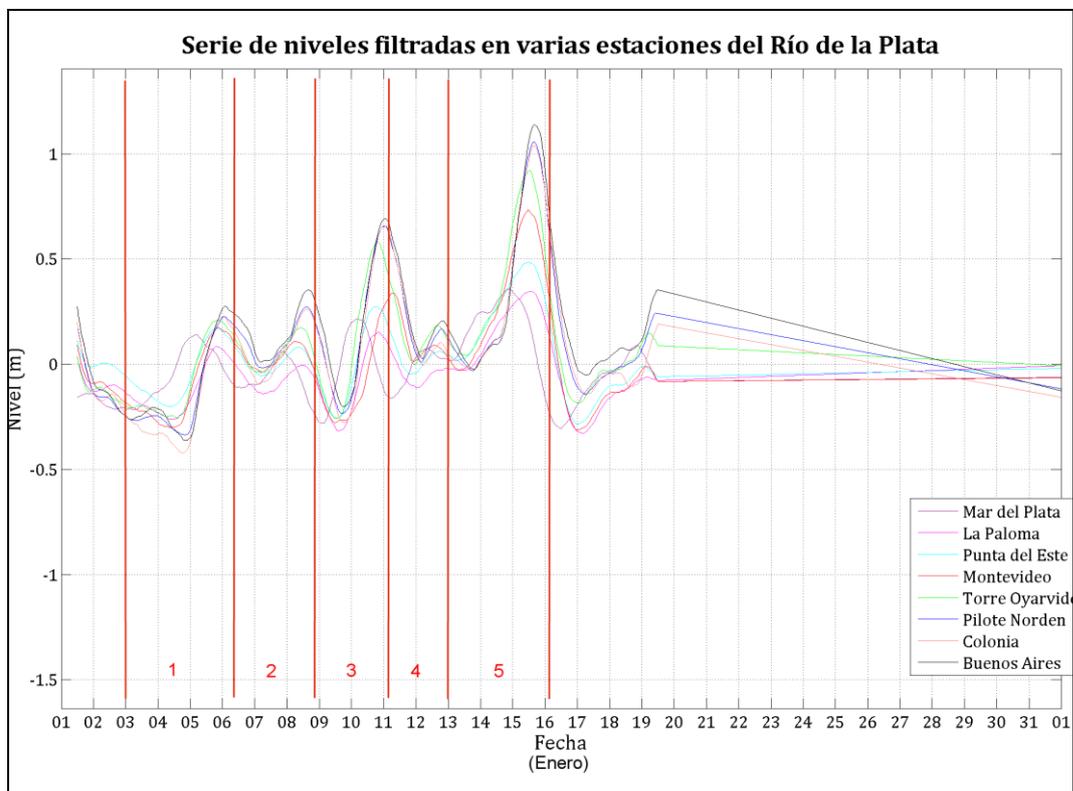
		Mes												Total
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
2004	N° de datos	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	733	8773
	N° de datos faltantes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	11
	% datos faltante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,48	0
2005	N° de datos	744	672	739	675	724	718	740	743	549	0	0	0	6304
	N° de datos faltantes	0	0	5	45	20	2	4	1	171	744	720	744	2456
	% datos faltante	0	0	0,67	6,25	2,69	0,28	0,54	0,13	23,75	100	100	100	28
2006	N° de datos	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8760
	N° de datos faltantes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	% datos faltante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2007	N° de datos	744	672	744	720	744	720	743	744	720	744	720	668	8683
	N° de datos faltantes	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	76	77
	% datos faltante	0,0	0	0	0	0	0	0,13	0	0	0	0	10,22	1
2008	N° de datos	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	697	744	8761
	N° de datos faltantes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23	0	23
	% datos faltante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,19	0	0
2009	N° de datos	722	672	703	703	744	720	744	744	720	744	720	730	8666
	N° de datos faltantes	22	0	41	17	0	0	0	0	0	0	0	14	94
	% datos faltante	2,96	0	5,51	2,36	0	0	0	0	0	0	0	1,88	1

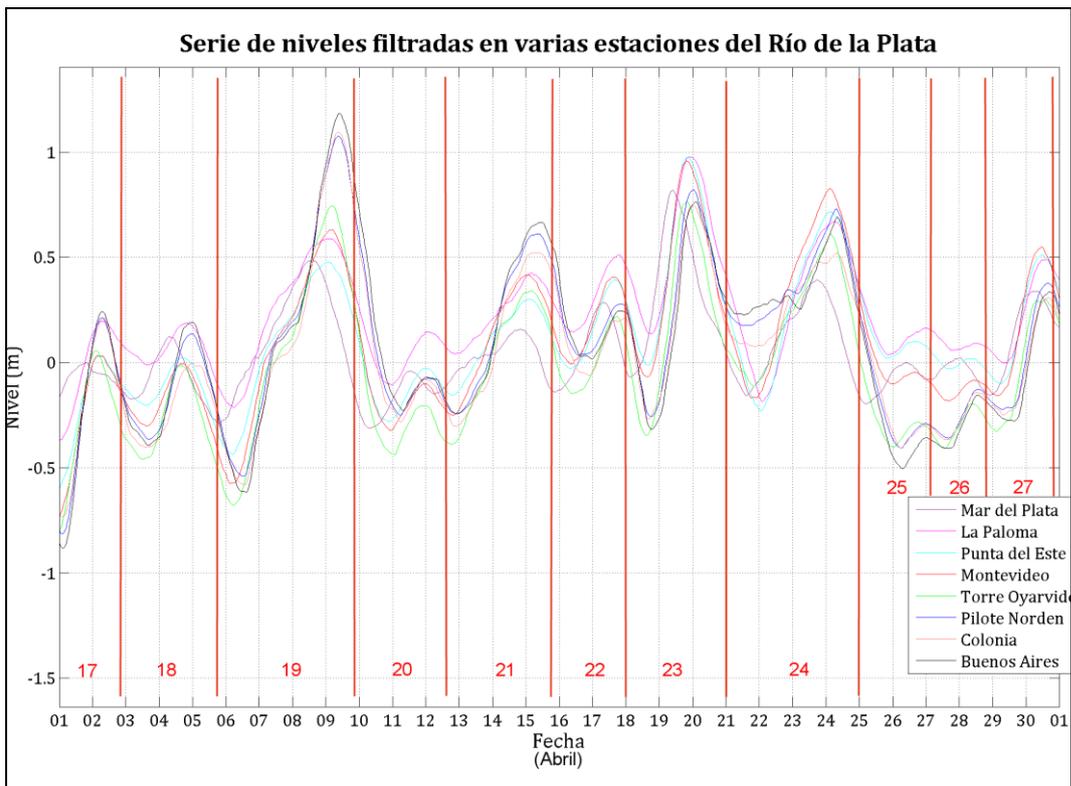
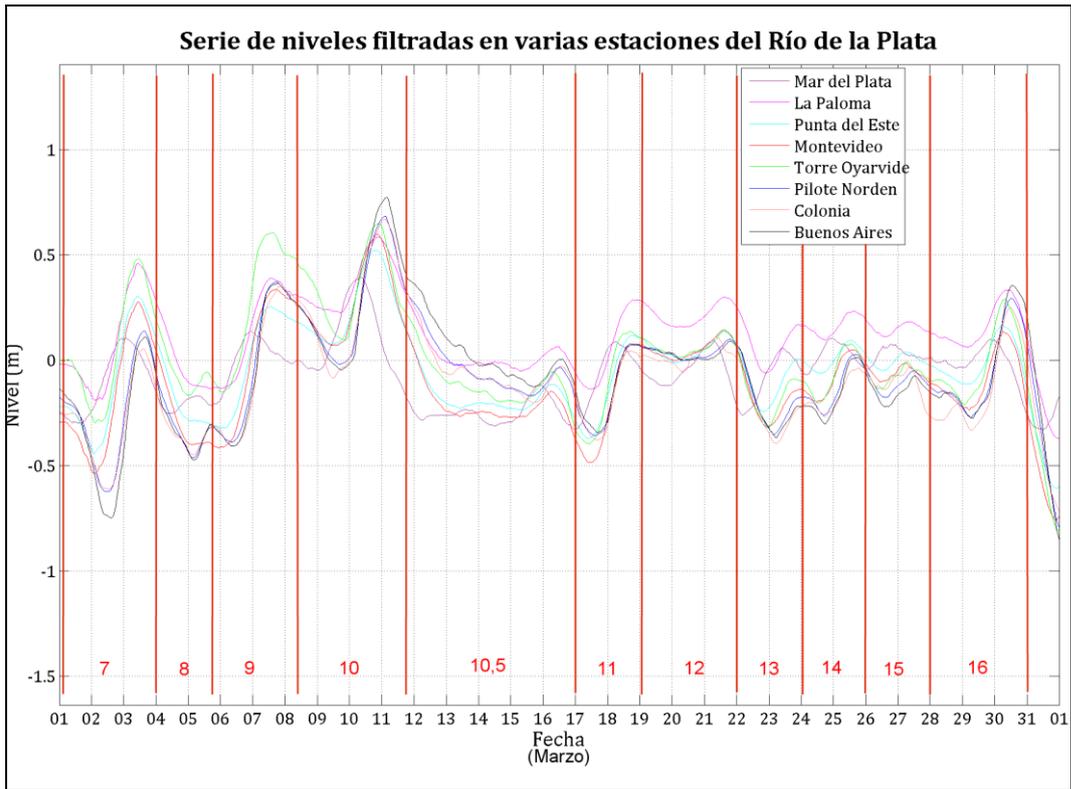
Conchillas

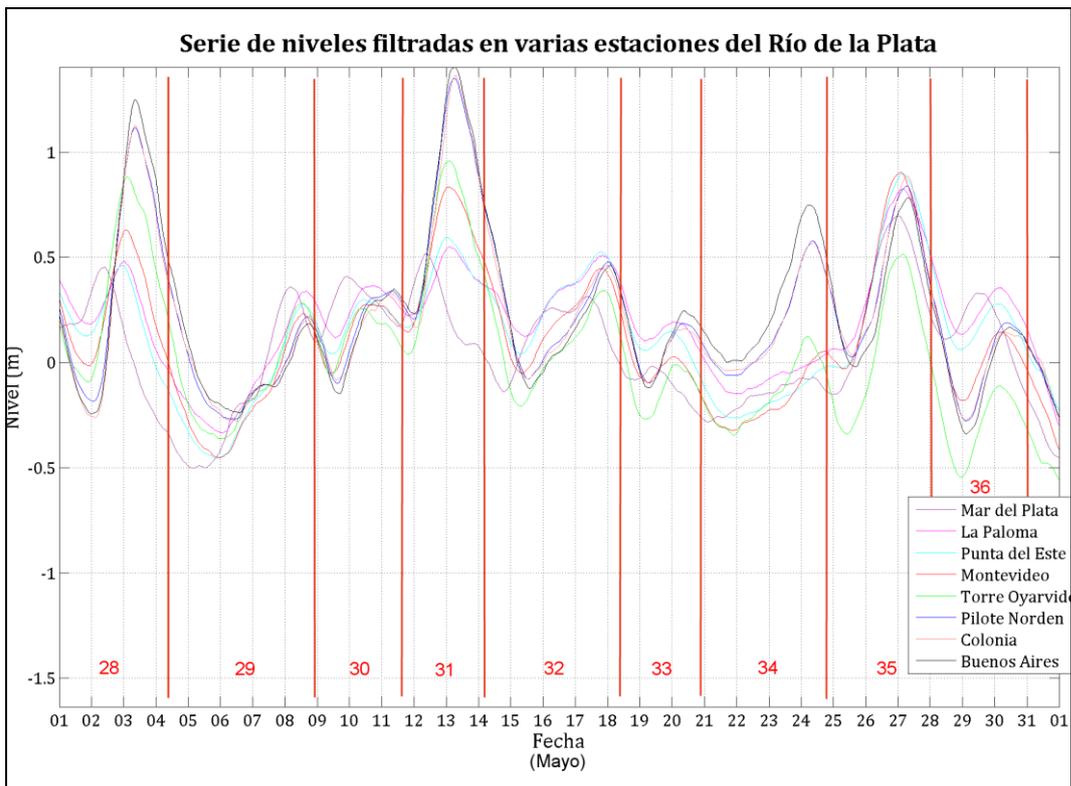
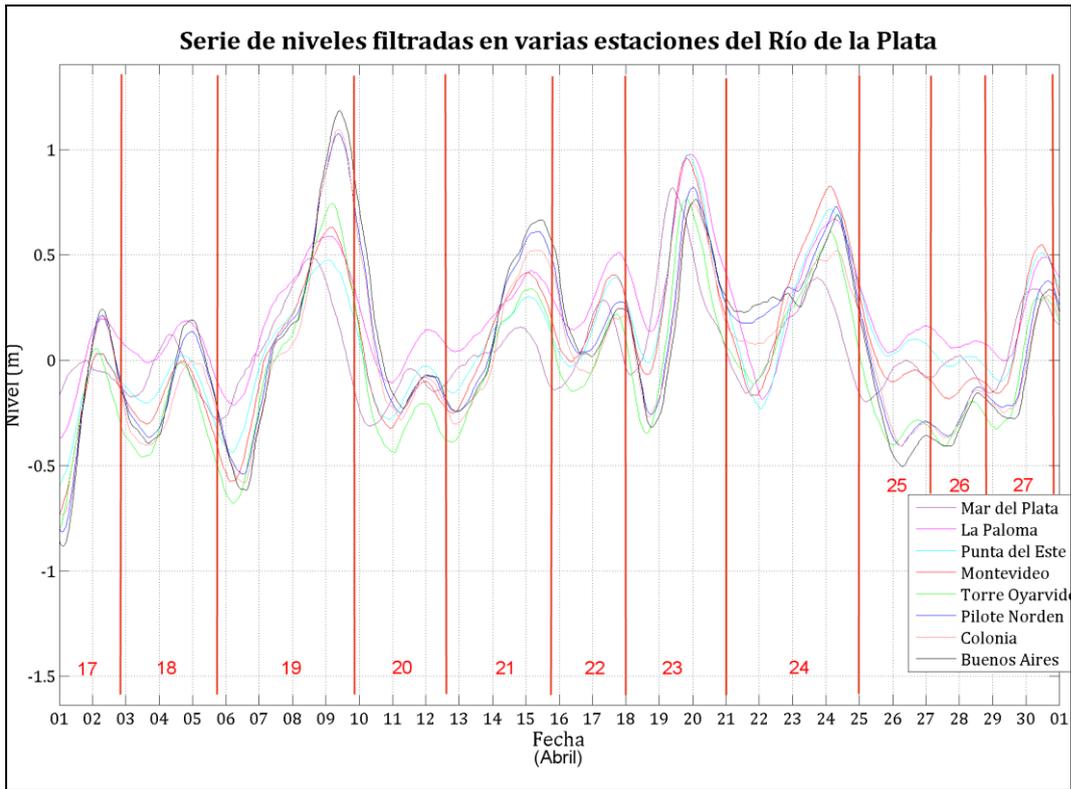
		Mes												Total
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
2007	N° de datos	0	0	0	653	744	720	744	744	346	0	264	744	4959
	N° de datos faltantes	744	672	744	67	0	0	0	0	374	744	456	0	3801
	% datos faltante	100,0	100	100	9,31	0	0	0,00	0	51,94	100	63,33	0,00	44
2008	N° de datos	742	686	744	720	744	720	744	736	695	744	720	738	8733
	N° de datos faltantes	2	10	0	0	0	0	0	8	25	0	0	6	51
	% datos faltante	0,27	1,44	0	0	0	0	0	1,08	3,47	0	0,00	0,81	1
2009	N° de datos	717	670	739	464	596	720	744	744	720	744	720	744	8322
	N° de datos faltantes	27	2	5	256	148	0	0	0	0	0	0	0	438
	% datos faltante	3,63	0,30	0,67	35,56	19,89	0	0	0	0	0	0	0,00	5

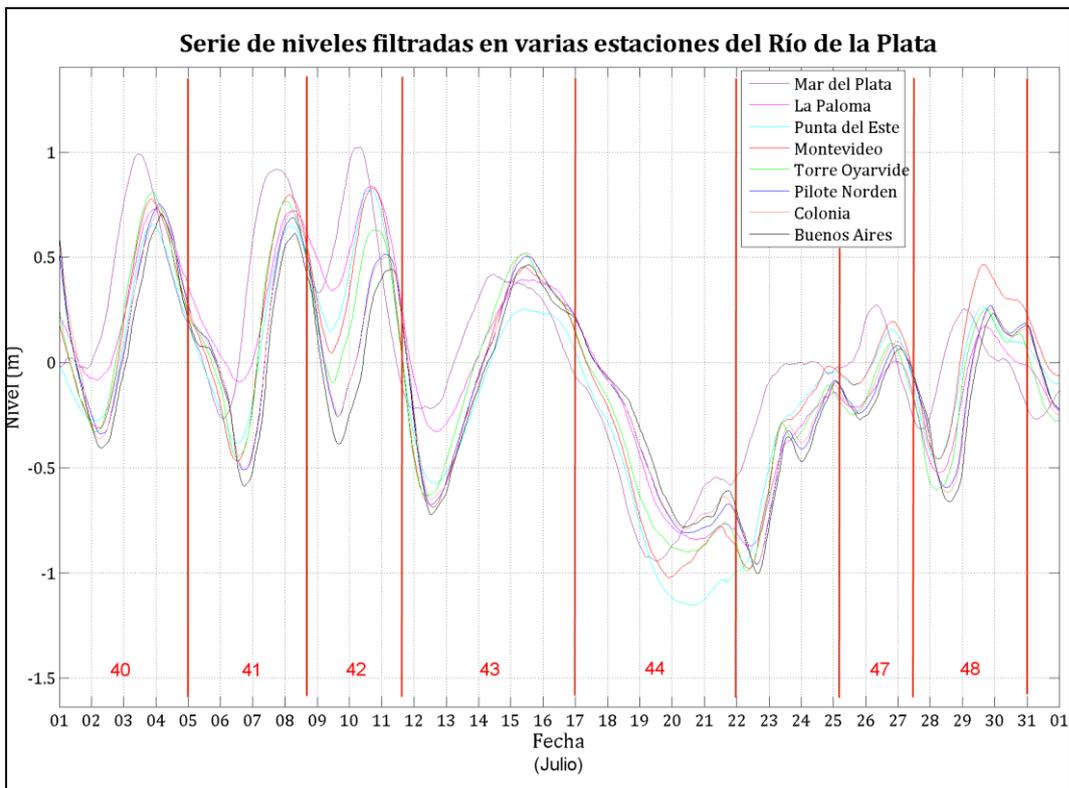
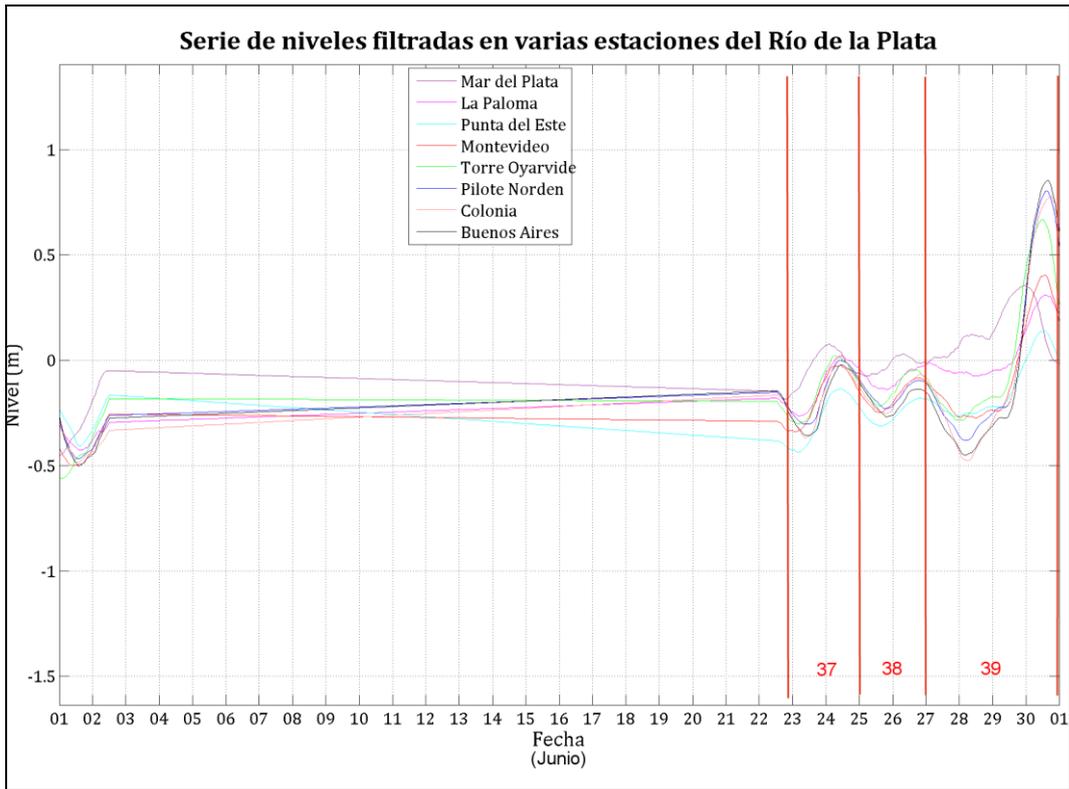
X-2. Eventos en la series de niveles residuales seleccionados para su análisis.

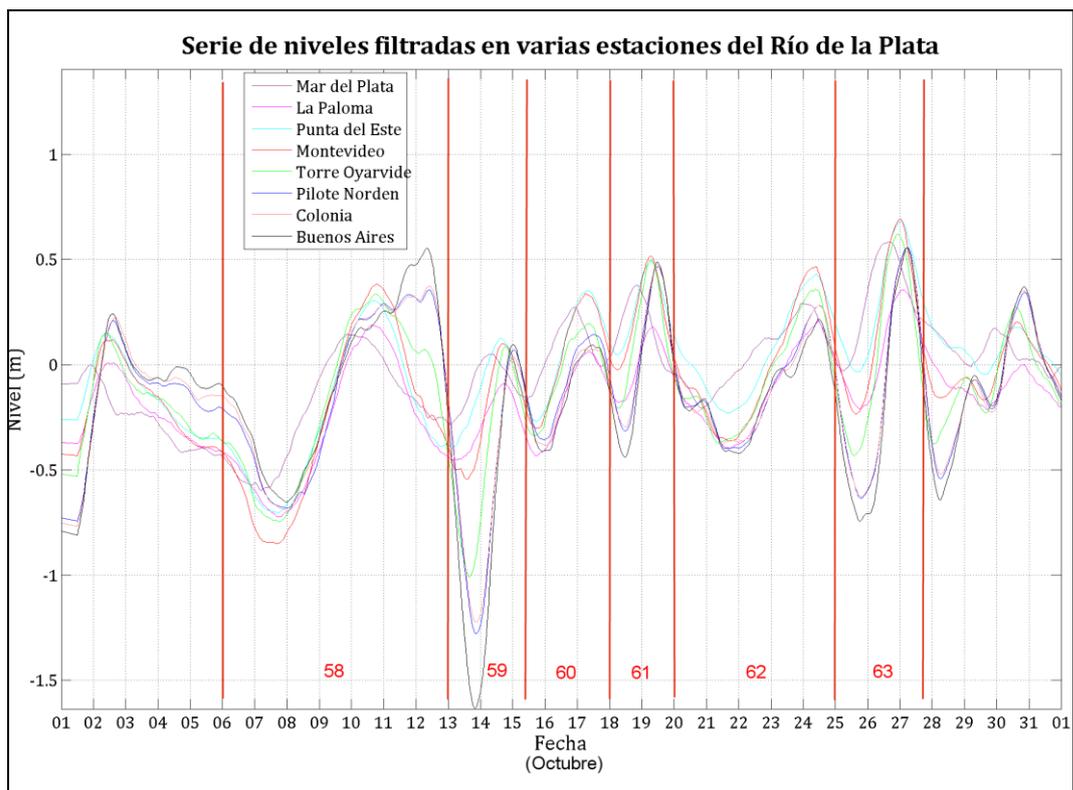
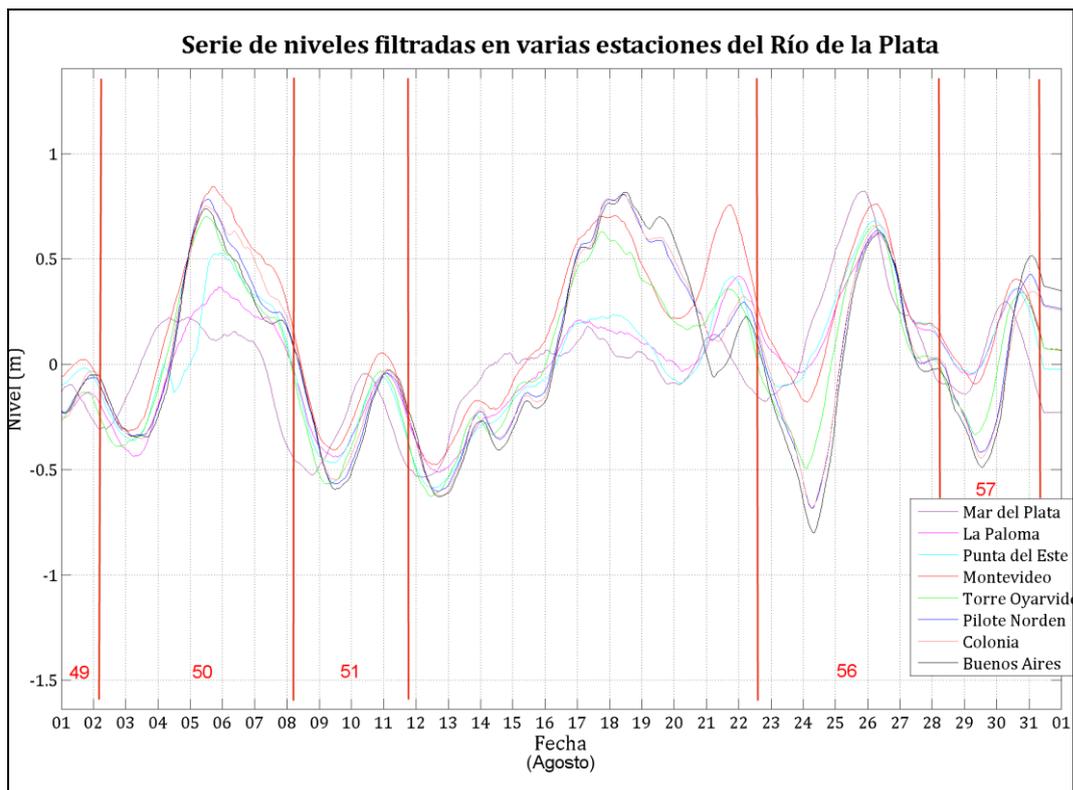
A continuación se muestran en forma gráfica las series residuales de niveles en las ocho estaciones utilizadas y una identificación de los eventos seleccionados.











La tabla que se muestra a continuación se presenta para cada evento: la amplitud (Amp), el período (T), el tiempo de viaje del máximo en la señal a partir de que fue observado en Mar del Plata (T_M) y el tiempo de viaje del mínimo en la señal a partir de que fue observado en Mar del Plata (T_m).

Estudio de la marea meteorológica en el Río de la Plata

	Mar del Plata		La Paloma				Punta del Este				Montevideo				Torre Oyarvide				Pilote Norden				Colonia				Buenos Aires			
	Amp	T	Amp	T	T _m	T _M	Amp	T	T _m	T _M	Amp	T	T _m	T _M	Amp	T	T _m	T _M	Amp	T	T _m	T _M	Amp	T	T _m	T _M	Amp	T	T _m	T _M
1	0,36	47	0,35	31	30	14	0,37	36	27	16	0,48	33	30	16	0,46	30	32	15	0,56	29	38	20	0,65	29	37	19	0,64	30	38	21
2	0,18	31	0,14	29	16	14	0,14	26	16	11	0,15	25	15	9	0,21	27	17	13	0,29	33	16	18	0,36	36	13	18	0,34	35	15	19
3	0,50	25	0,47	29	12	16	0,53	28	10	13	0,62	43	9	27	0,84	31	9	15	0,89	32	14	21	0,93	30	16	21	0,89	31	15	21
4	0,24	28	0,09	22	19	13	0,11	21	16	9	0,08	16	17	5	0,19	17	18	7	0,16	15	23	10	0,11	13	24	9	0,18	15	24	11
5	0,34	43	0,37	50	11	18	0,47	53	6	16	0,76	49	9	15	0,88	47	13	17	1,09	46	17	20	1,07	46	17	20	1,16	45	18	20
6	0,22	29	0,28	33	14	18	0,34	34	13	18	0,53	41	11	23	0,58	42	9	22	0,71	31	24	26	0,77	29	25	25	0,81	29	26	26
7	0,40	33	0,65	31	10	8	0,75	32	9	8	0,81	33	9	9	0,78	32	10	9	0,76	27	19	13	0,67	26	20	13	0,86	25	22	14
8	0,09	19	0,00	3	29	13	0,00	2	15	-2	0,01	13	16	10	0,11	13	14	8	0,15	14	17	12	0,14	14	16	11	0,12	12	18	11
9	0,36	29	0,52	36	8	15	0,57	36	9	16	0,75	43	5	19	0,76	37	8	16	0,76	32	16	19	0,76	35	16	22	0,77	34	16	21
10	0,44	31	0,36	27	17	13	0,44	33	10	12	0,53	31	13	13	0,55	24	20	13	0,70	34	15	18	0,75	38	11	18	0,82	34	17	20
10,5	0,20	33	0,12	28	19	14	0,12	23	20	10	0,12	19	23	9	0,15	25	19	11	0,13	21	27	15	0,17	19	29	15	0,13	21	29	17
11	0,42	31	0,43	31	13	13	0,49	33	11	13	0,56	34	12	15	0,53	31	11	11	0,43	32	15	16	0,42	24	17	10	0,42	24	18	11
12	0,21	37	0,14	36	10	9	0,15	35	11	9	0,14	36	9	8	0,13	35	11	9	0,10	33	17	13	0,17	25	15	3	0,09	35	15	13
13	0,32	29	0,23	24	17	12	0,25	27	14	12	0,18	25	17	13	0,23	29	19	9	0,18	20	23	14	0,19	26	24	21	0,15	16	24	11
14	0,17	19	0,14	22	14	17	0,15	22	10	13	0,25	28	7	16	0,28	24	9	14	0,29	23	13	17	0,23	25	14	20	0,31	24	14	19
15	0,12	17	0,07	15	13	11	0,09	19	10	12	0,09	18	9	10	0,13	18	11	12	0,13	21	13	17	0,11	19	11	13	0,15	20	15	18
16	0,14	25	0,27	29	9	13	0,28	25	8	8	0,37	25	10	10	0,50	29	7	11	0,57	30	11	16	0,58	28	12	15	0,63	30	12	17
17	0,33	34	0,57	31	11	10	0,64	32	11	9	0,79	31	9	8	0,87	27	11	6	1,03	29	14	11	0,95	30	14	12	1,12	28	15	11
18	0,30	27	0,20	28	12	13	0,23	27	10	10	0,30	26	11	10	0,45	27	8	8	0,50	31	13	17	0,40	34	10	17	0,58	32	12	17
19	0,77	67	0,80	64	10	11	0,92	69	9	15	1,20	70	9	16	1,42	71	9	17	1,62	68	17	22	1,67	68	17	22	1,80	68	18	23
20	0,27	33	0,25	25	16	8	0,25	26	15	8	0,22	24	16	7	0,23	20	18	5	0,18	19	23	9	0,21	17	23	7	0,16	17	25	9
21	0,31	62	0,39	55	15	8	0,46	54	14	6	0,67	54	13	5	0,73	57	13	8	0,86	57	17	12	0,82	58	14	10	0,91	62	15	15
22	0,43	34	0,37	35	11	12	0,42	32	11	9	0,41	30	12	8	0,37	31	13	10	0,24	30	17	13	0,26	18	24	8	0,23	19	27	12
23	0,89	31	0,84	29	15	13	0,99	28	13	10	1,02	28	12	9	1,11	29	12	10	1,08	31	15	15	1,02	33	13	15	1,08	31	16	16
24	0,55	51	0,86	52	11	12	0,95	50	10	9	0,99	54	6	9	0,72	55	5	9	0,55	61	3	13	0,45	59	6	14	0,46	67	-2	14
25	0,18	24	0,13	27	16	19	0,08	18	16	10	0,06	15	19	10	0,12	16	20	12	0,12	18	25	19	0,11	18	25	19	0,15	17	26	19
26	0,10	21	0,03	19	14	12	0,05	13	13	5	0,10	19	12	10	0,21	21	9	9	0,23	21	12	12	0,22	20	12	11	0,25	20	13	12
27	0,50	31	0,49	28	10	7	0,61	30	8	7	0,71	31	6	6	0,62	29	5	3	0,60	32	9	10	0,56	32	10	11	0,61	25	18	12
28	0,29	33	0,30	25	22	14	0,34	25	20	12	0,65	28	21	16	0,97	29	21	17	1,30	32	24	23	1,39	29	26	22	1,49	33	23	23
29	0,86	72	0,68	63	21	12	0,73	65	17	10	0,69	63	19	10	0,64	59	21	8	0,49	53	31	12	0,50	60	26	14	0,42	55	31	14
30	0,31	23	0,25	27	15	19	0,26	24	12	13	0,33	27	11	15	0,32	22	11	10	0,44	40	16	33	0,41	41	15	33	0,45	28	18	23
31	0,35	21	0,33	30	8	17	0,43	30	7	16	0,69	31	7	17	0,92	30	8	17	1,14	30	12	21	1,19	29	13	21	1,17	30	12	21
32	0,45	63	0,39	57	16	10	0,49	59	13	9	0,50	60	13	10	0,55	62	12	11	0,56	60	18	15	0,54	59	18	14	0,59	60	19	16
33	0,06	13	0,09	21	8	16	0,09	19	8	14	0,13	19	10	16	0,26	22	8	17	0,28	25	11	23	0,25	25	11	23	0,37	27	10	24
34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,38	-	-	-	0,47	-	-	-	0,64	-	-	-	0,61	-	-	-	0,75	-	-	-
35	0,85	49	0,76	45	7	3	0,92	44	8	3	0,94	42	9	2	0,86	42	11	4	0,81	41	15	7	0,85	41	15	7	0,81	40	17	8
36	0,22	23	0,22	28	11	16	0,22	28	11	16	0,33	28	13	18	0,43	29	11	17	0,47	30	15	22	0,42	29	14	20	0,51	32	15	24
37	0,26	33	0,25	39	2	8	0,29	35	6	8	0,31	37	3	7	0,32	26	10	3	0,30	24	16	7	0,39	25	15	7	0,34	24	17	8
38	0,10	25	0,13	30	13	18	0,13	29	8	12	0,16	28	8	11	0,17	26	7	8	0,13	24	12	11	0,19	25	12	12	0,13	23	13	11
40	1,02	40	0,81	43	7	10	0,93	42	8	10	1,09	37	11	8	1,14	43	7	10	1,09	43	11	14	1,11	45	10	15	1,11	45	11	16
41	1,19	40	0,81	38	14	12	1,03	39	10	9	1,26	39	10	9	1,22	37	10	7	1,20	36	15	11	1,22	36	15	11	1,20	37	16	13
42	0,69	27	0,49	25	12	10	0,67	27	9	9	0,78	30	10	13	0,73	30	11	14	0,77	35	14	22	0,76	35	15	23	0,83	40	15	28
43	0,64	54	0,72	63	12	21	0,81	60	11	17	1,14	68	9	23	1,15	73	5	24	1,18	71	8	25	1,17	71	8	25	1,19	72	8	26
44	0,40	43	0,07	23	28	8	0,12	22	26	5	0,24	40	8	5	0,14	27	23	7	0,14	32	21	10	0,15	29	21	7	0,17	33	20	10
48	0,57	33	0,70	34	14	15	0,72	34	12	13	0,92	32	14	13	0,86	38	11	16	0,86	33	19	19	0,88	32	20	19	0,90	33	21	21
49	0,17	24	0,10	18	20	14	0,08	18	16	10	0,09	17	16	9	0,15	19	15	10	0,17	22	19	17	0,22	21	18	15	0,18	19	20	15
50	0,53	51	0,81	63	25	37	0,89	61	24	34	1,16	63	21	33	1,09	67	12	28	1,12	47	33	29	1,11	48	31	28	1,08	44	35	28
51	0,48	40	0,40	36	19	15	0,40	36	15	11	0,46	34	17	11	0,53	41	10	11	0,52	37	18	15	0,52	38	17	15	0,57	40	16	16
56	1,00	73	0,67	60	23	10	0,79	73	9	9	0,94	52	31	10	1,15	50	30	7	1,32	49	35	11	1,35	50	34	11	1,43	49	36	12
57	0,44	30	0,41	37	2	9	0,40	33	4	7	0,50	31	6	7	0,67	34	7	11	0,84	37	11	18	0,79	38	11	19	1,01	37	12	19
59	0,33	29	0,37	35	6	12	0,52	34	4	9	0,65	26	13	10	1,09	27	14	12	1,35	28	20	19	1,26	27	20	18	1,73</			

X-3. Descripción del modelo MOHID

X-3.1. Ecuaciones Gobernantes

El modelo resuelve las ecuaciones primitivas tridimensionales para fluido incompresible. Se asume como válido el equilibrio hidrostático y se utilizan las aproximaciones de Boussinesq y de Reynolds. Las ecuaciones de cantidad de movimiento para las velocidades horizontales del flujo medio en coordenadas cartesianas se presentan en la Ecuación 37 y la Ecuación 38, las cuales expresan que la evolución temporal de las velocidades es igual al transporte advectivo, la fuerza de Coriolis, el gradiente de presiones y la difusión turbulenta. A partir de estas dos ecuaciones se determina el campo horizontal de velocidades.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial uu}{\partial x} - \frac{\partial uv}{\partial y} - \frac{\partial uw}{\partial z} + fv - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_H + \nu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_H + \nu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t + \nu \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

Ecuación 37

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial vu}{\partial x} - \frac{\partial vv}{\partial y} - \frac{\partial vw}{\partial z} - fu - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_H + \nu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_H + \nu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t + \nu \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

Ecuación 38

Donde u , v , w son las componentes del vector velocidad en la dirección x , y , z respectivamente, f es el parámetro de Coriolis, ν_H y ν_t son las viscosidades turbulentas en las direcciones horizontal y vertical, ν es la viscosidad cinemática turbulenta y p es la presión. La velocidad vertical se calcula a partir de la integración en la dirección vertical de la ecuación de continuidad para fluido incompresible (Ecuación 39), entre el fondo y la profundidad z donde se calcula w (Ecuación 40):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Ecuación 39

$$w_z = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-h}^z u dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-h}^z v dz \right)$$

Ecuación 40

La ecuación para la superficie libre (Ecuación 41) se obtiene por integración de la ecuación de continuidad sobre toda la columna de agua, es decir, entre la elevación de la superficie libre $\eta(x, y)$ y el fondo $-h$, e imponiendo las condiciones de borde cinemáticas en el fondo y en la superficie:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-h}^{\eta} u dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-h}^{\eta} v dz \right)$$

Ecuación 41

El modelo utiliza la aproximación hidrostática ya que las escalas horizontales en los cuerpos de agua estuarinos u oceánicos son mucho mayores que las verticales. Se supone entonces que las aceleraciones verticales son pequeñas respecto a los

otros términos que intervienen en la ecuación de cantidad de movimiento en la dirección vertical, y la misma se reduce al balance hidrostático que se presenta en la Ecuación 42, donde g es la gravedad y ρ la densidad.

$$\frac{\partial p}{\partial z} + g\rho = 0$$

Ecuación 42

Aplicando la descomposición de Boussinesq en donde la densidad ρ se divide en una densidad constante de referencia ρ_0 y una fluctuación de ese valor ρ' , e integrando en la dirección vertical entre la superficie libre η y la profundidad z donde se calcula la presión, se obtiene la Ecuación 43. Esta ecuación relaciona la presión en cualquier profundidad con la presión atmosférica en la superficie libre, el nivel de agua y la presión integrada entre ese nivel y la superficie.

$$p_z = p_{atm} + g\rho_0 (\eta - z) + g \int_z^\eta \rho' dz$$

Ecuación 43

A partir de la expresión determinada para la presión (Ecuación 43) es posible determinar el gradiente de presiones horizontales en las direcciones x e y , los cuales se presentan en la Ecuación 44 y la Ecuación 45, respectivamente. El gradiente de presiones resulta igual a la suma del gradiente de presiones atmosférico, el gradiente de la elevación de la superficie libre (gradiente de presiones barotrópico) y el gradiente de la distribución de densidades (gradiente de presiones baroclínico). Los gradientes de presiones que se presentan en la Ecuación 44 y la Ecuación 45 se sustituyen en la Ecuación 37 y la Ecuación 38 respectivamente, para resolver el campo horizontal de velocidades.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p_{atm}}{\partial x} + g\rho_0 \frac{\partial \eta}{\partial x} + g \int_z^\eta \frac{\partial \rho'}{\partial x} dz$$

Ecuación 44

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial p_{atm}}{\partial y} + g\rho_0 \frac{\partial \eta}{\partial y} + g \int_z^\eta \frac{\partial \rho'}{\partial y} dz$$

Ecuación 45

El modelo también resuelve las ecuaciones de transporte para la salinidad y la temperatura. El transporte de sal se expresa con la Ecuación 46, la cual expresa que la variación temporal de la salinidad es el balance entre el transporte advectivo por el flujo medio, la mezcla turbulenta y los aportes de posibles fuentes o descargas de sal expresados con F_s .

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{\partial uS}{\partial x} - \frac{\partial vS}{\partial y} - \frac{\partial wS}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu'_H \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu'_H \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu'_t + \nu'_s \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_s$$

Ecuación 46

Donde S es la salinidad, ν'_H y ν'_t son los coeficientes de difusividad horizontal y vertical de sal respectivamente; y ν'_s la difusividad molecular de sal. La densidad

ρ se calcula en función de la temperatura (T) y de la salinidad a través de una ecuación de estado simplificada:

$$\rho = \frac{5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S}{(1779.5 + 11.25T - 0.0745T^2) - (3.8 + 0.01T)S + 0.698(5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S)}$$

Ecuación 47

En definitiva, el modelo resuelve el sistema formado por: las dos ecuaciones de cantidad de movimiento horizontal (Ecuación 37 y Ecuación 38), la ecuación de continuidad (Ecuación 40), la ecuación de superficie libre (Ecuación 41), la ecuación de transporte de sal (Ecuación 46) y la ecuación de estado para la densidad (Ecuación 47), siendo las incógnitas las componentes de la velocidad, la elevación de la superficie libre, la salinidad y la densidad en cada punto del dominio. En el caso que se considere también como variable a la temperatura, se agrega la ecuación de transporte de temperatura al sistema de ecuaciones a resolver.

X-3.2. Discretización de las ecuaciones

X-3.2.1. Discretización espacial

El modelo MOHID utiliza el método de los volúmenes finitos para discretizar las ecuaciones que gobiernan el flujo. La idea básica de este método es partir de la forma integral de las ecuaciones de conservación como punto de base. De forma general la ecuación de conservación para una escalar U con una fuente Q en un volumen de control Ω se escribe de la forma siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} U d\Omega + \int_S \vec{F} \vec{n} dS = \int_{\Omega} Q d\Omega$$

Ecuación 48

Donde \vec{F} representa los flujos del escalar a través de la superficie frontera S del volumen considerado y \vec{n} la normal exterior de la superficie. Las ecuaciones de Navier Stokes y las ecuaciones de transporte de salinidad y temperatura pueden escribirse de esa forma eligiendo convenientemente las variables U y Q .

El volumen de control considerado se divide en un determinado número de pequeños volúmenes de control denominados celdas y el método resuelve los balances globales de las propiedades transportadas en dichos volúmenes aproximándolos por los flujos a través de las caras de dichas celdas. La ecuación se aplica en cada celda del dominio de cálculo y al sumar las ecuaciones en todas las celdas se obtiene la ecuación global de conservación, ya que las integrales de superficie en las caras de las celdas interiores se anulan. De esta forma el método tiene una propiedad intrínseca que es que garantiza que se cumplen las leyes de conservación a nivel global y esta es su principal ventaja.

Discretizando la Ecuación 48 en un volumen de control Ω_j donde está definida la propiedad U_j se obtiene la expresión siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial t} U_j \cdot \Omega_j + \sum_{\text{caras}} \vec{F}_m \cdot \vec{n} \cdot S_m = Q_j \cdot \Omega_j$$

Ecuación 49

De esta forma solamente son necesarios los flujos a través de las celdas, siendo el procedimiento para resolver las ecuaciones independientes de la geometría de la celda. Como el volumen puede variar a lo largo de la simulación, la geometría se actualiza en cada paso de tiempo luego de calcular las variables físicas. Además las coordenadas espaciales son independientes y cualquier geometría puede elegirse para cada dimensión. Las coordenadas horizontales pueden expresarse en varios sistemas de coordenadas, siendo los más utilizados las coordenadas métricas y las coordenadas geográficas. En la dirección vertical el MOHID permite aplicar diferentes coordenadas verticales: Sigma, cartesianas, lagrangianas, con espaciamiento fijo y armónicas.

X-3.2.2. Discretización temporal

La discretización temporal de las ecuaciones discretizadas se realiza por el algoritmo semiimplícito ADI (Alternative Direction Implicit). Este algoritmo calcula alternadamente una de las componentes de la velocidad de forma implícita mientras que la otra se calcula explícita, luego en la iteración siguiente las direcciones implícita y explícita cambian. En las ecuaciones de cantidad de movimiento el término barotrópico y el de transporte vertical se calculan implícitos. El sistema de ecuaciones resultante es tridiagonal y puede resolverse de forma eficiente y rápida.

En el código del modelo están incluidas dos discretizaciones diferentes, el esquema S21 de cuatro ecuaciones con dos niveles temporales por iteración y el esquema de Leendertse de 6 ecuaciones, tres para cada medio paso de tiempo, donde las velocidades se actualizan cada medio paso.

En el sistema S21 cada iteración se divide en dos pasos de medio tiempo, en la primera iteración se calcula la elevación de la superficie libre y una velocidad horizontal (u) de forma implícita a partir de la ecuación de cantidad de movimiento correspondiente, mientras que para la otra componente de la velocidad (v) se utiliza el valor anterior. En el segundo medio paso de tiempo se calcula nuevamente la elevación de la superficie libre y la otra componente horizontal de la velocidad de forma implícita. En todos los medios pasos de tiempo se calcula una velocidad vertical w^* a partir de la ecuación de continuidad, luego se actualiza la geometría y se corrige la velocidad vertical. La salinidad y la temperatura se calculan cada medio paso.

En el esquema de Leendertse la componente de la velocidad en la dirección explícita se calcula también cada medio paso de tiempo antes del cálculo de la elevación de la superficie libre. En este caso como se calculan las dos componentes dentro de cada medio paso de tiempo, se actualizan con mayor frecuencia las condiciones de borde y por eso es más apropiado para zonas poco profundas. Ambos esquemas son de segundo orden de aproximación ya que realizan los cálculos centrados en cada medio paso de tiempo.

X-3.3. Condiciones iniciales y de borde

Las ecuaciones para el cálculo de la elevación de la superficie libre, de la velocidad y del transporte de salinidad y temperatura forman un sistema de naturaleza parabólica, por lo que para su resolución se necesitan condiciones iniciales en todo el dominio y condiciones de borde durante toda la simulación. A continuación describe el tratamiento de las mismas.

X-3.3.1. Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales utilizadas en todas las ecuaciones son del tipo de Dirichlet, y se imponen especificando directamente los valores de las variables en todos los puntos del dominio durante el instante inicial. Para la elevación de la superficie libre en general se utiliza un valor de referencia constante para todo el dominio como condición inicial. Para las velocidades en general se utiliza la condición de reposo y solamente es necesario un tiempo de arranque corto para que las mismas se ajusten a la acción de los diferentes forzantes considerados. Para las propiedades del agua como salinidad o temperatura sucede algo similar y se imponen en general valores uniformes en todo el dominio como condición inicial.

X-3.3.2. Condiciones de borde

Superficie libre

En la superficie libre los flujos convectivos de cantidad de movimiento, salinidad y temperatura son nulos. Esta condición se impone directamente en las ecuaciones considerando que el flujo vertical en las celdas superficiales es cero. Por otro lado, el flujo difusivo de cantidad de movimiento se impone explícitamente en la capa superficial a través de la tensión de corte debida al viento. Ésta se calcula con la Ecuación 50; siendo C_D el coeficiente de drag, ρ_a la densidad del aire y \vec{W} la velocidad del viento a 10m sobre la superficie libre.

$$\nu \frac{\partial \vec{v}_H}{\partial z} = \vec{\tau}_w = C_D \rho_a \vec{W} |\vec{W}|$$

Ecuación 50

Los flujos difusivos de temperatura y salinidad también se imponen nulos en la superficie libre.

Fondo

También en el fondo la condición de borde impuesta para los flujos advectivos es que sean nulos. El flujo difusivo de cantidad de movimiento por la cara inferior de las celdas de fondo se impone como una tensión de corte que se calcula por una ley cuadrática en función de la velocidad de la celda de fondo (Ecuación 51); siendo C_f el coeficiente drag de fondo, κ la constante de Von Karman y z_o el tamaño de la rugosidad absoluta de fondo. Este término se calcula de forma implícita.

$$\nu \frac{\partial \vec{v}_H}{\partial z} = \tau_{fondo} = C_f \vec{v}_H |\vec{v}_H|$$

Ecuación 51

$$C_f = \left(\frac{\kappa}{\log\left(\frac{z + z_o^b}{z_o^b}\right)} \right)^2$$

Ecuación 52

Los flujos difusivos de temperatura y salinidad en el fondo son nulos.

Bordes laterales cerrados

Los bordes laterales cerrados son los límites del dominio de cálculo con la tierra. Desde el punto de vista convectivo son fronteras impermeables, lo cual se representa en el modelo imponiendo que los flujos laterales sean nulos en las caras de las celdas que forman parte de estas fronteras. En estas fronteras los flujos difusivos de cantidad de movimiento, temperatura y salinidad son cero.

Bordes laterales abiertos

Las fronteras laterales abiertas se introducen como forma de limitar el dominio de cálculo a la región de interés. En estas fronteras deben imponerse valores de las variables de cálculo de forma de garantizar que la información correspondiente a lo que sucede fuera del dominio ingrese a la zona de cálculo y deben permitir que las ondas del interior del dominio se propaguen a través de las mismas y que el fluido pase libremente por éstas.

En las ecuaciones hidrodinámicas se pueden imponer valores de caudal o de elevación de la superficie libre, dependiendo de la razón por la cual se definió dicha frontera. La condición de caudal se impone directamente en los flujos horizontales en las caras de contacto con esa frontera. La condición de nivel se utiliza en las fronteras influenciadas por la marea. En las caras exteriores de esas celdas se calculan las velocidades y los caudales por continuidad a partir de la elevación. También deben especificarse los valores de salinidad y temperatura del agua que ingresa por estas fronteras.

X-3.4. Viscosidad y difusividad turbulenta

El MOHID tiene implementadas varias expresiones para determinar los coeficientes de viscosidad turbulenta. Valores constantes o variables calculados según la formulación de Smagorinsky (Ecuación 53) son las opciones para determinar los coeficientes en la dirección horizontal, siendo k un parámetro de calibración del modelo.

$$\nu_H = k \cdot dx \cdot dy \cdot \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Ecuación 53

Respecto a los coeficientes de viscosidad turbulenta vertical, la forma más simple utilizada en el MOHID es definirlos como constantes. Por otro lado, el modelo permite utilizar formulaciones que dependen del número de Prandtl, de una longitud de mezcla máxima y del número de Richardson (Leenderstee, Nihoul) o formulaciones que dependen solamente de la estratificación a través del número

de Richardson (Backaus, Pacanowski). Por último el MOHID permite calcular la viscosidad vertical modelando las ecuaciones de la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación de la turbulencia, a través de la aplicación del modelo tipo $k-\varepsilon$ GOTM, que funciona acoplado con el MOHID. El modelo GOTM (General Ocean Turbulence Model) es un modelo de columna de agua unidimensional que permite elegir entre varias parametrizaciones de la mezcla vertical turbulenta.

Los coeficientes horizontales y verticales de difusividad son calculados en el MOHID a partir de los coeficientes de viscosidad turbulenta horizontales y verticales respectivamente. Se considera que la viscosidad y la difusividad se relacionan a través de un factor de proporcionalidad, el Número de Schmidt.