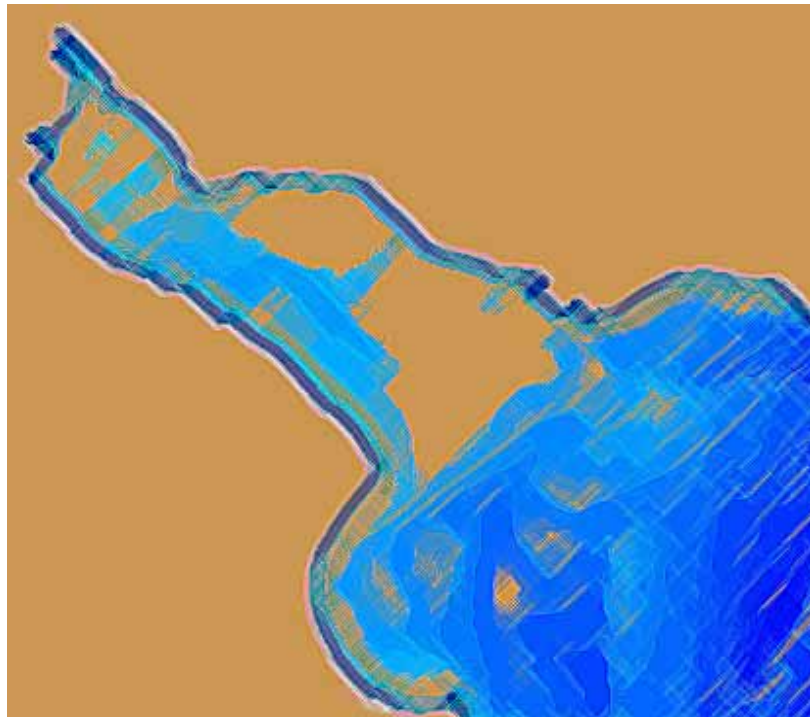


Maestría en Ciencias Ambientales  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES



# Impacto del Cambio Climático Global en las Costas del Río de la Plata



**MARIANO RÉ**

**Septiembre de 2005**

"Su forma verdadera, como tantas otras cosas en este mundo, difiere de su apariencia empírica, y, tal como podemos verificarlo en cualquier mapa, se acerca mucho a la del escorpión..."

El río sin orillas. JUAN JOSÉ SAER.

"Solo que el río parecía querer decirle algo..."

Alrededor de la jaula. HAROLDO CONTI.

**TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES**

**UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES**

# **Impacto del Cambio Climático Global en las Costas del Río de la Plata**

**Tesista:** Mariano Ré

**Director de Tesis:** Ángel N. Menéndez (FIUBA - INA)

**Co- Director de Tesis:** Vicente R. Barros (FCEyN)

**Fecha de Presentación:** 20 de Septiembre de 2005

**Lugar:** Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los  
Océanos (FCEyN – UBA)

## **Tribunal Examinador**

Walter C. Dragani (SHN - FCEyN - CONICET)

Pablo M. Jacovkis (FCEyN - FIUBA)

Mario N. Nuñez (FCEyN – CIMA/CONICET)

## Resumen

---

Las zonas costeras y, especialmente, las ciudades ubicadas en ellas, están amenazadas por una amplia variedad de peligros relacionados con el clima. La costa argentina del Río de la Plata y, en particular, la Región Metropolitana de Buenos Aires, no escapan a esta situación, siendo cada vez más vulnerables a causa del Cambio Climático.

En este trabajo, mediante avanzadas técnicas de modelación numérica de la hidrodinámica del Río de la Plata, se determinaron los mapas de riesgo de inundaciones para las condiciones actuales, y para posibles escenarios futuros.

Se desarrolló un modelo hidrodinámico, denominado RPP-2D, con el objetivo de simular la generación de ondas de tormenta en el Río de la Plata y su Frente Marítimo. Este modelo se calibró para ajustarse a la marea astronómica predicha, los niveles medios estacionales y la frecuencia de ocurrencia de niveles en Buenos Aires para la década presente, y las grandes ondas de tormenta. La verificación del modelo se realizó comparando los niveles medios estacionales, y la frecuencia de ocurrencia de niveles en Buenos Aires para cada año de la década presente, datos de nivel del mar obtenidos por el satélite TOPEX/Poseidon, y velocidades de corrientes medidas con correntógrafos.

Se realizó un análisis de sensibilidad del nivel del Río de la Plata a la variación de cada uno de los forzantes, estableciéndose la importancia relativa de los cambios en el nivel medio del mar, los vientos y los caudales de los tributarios.

Los escenarios futuros planteados representan condiciones medias y máximas previstas para las décadas de 2030 y 2070. Como resultado de las simulaciones se obtuvieron los niveles medios estacionales en todo el dominio del modelo y la respuesta del sistema ante eventos de tormentas con distintas recurrencias. A partir de la información de niveles a lo largo de toda la costa argentina del Río de la Plata, se trazaron los mapas de riesgo de inundación.

Se concluye que el aumento del nivel medio del mar es el mayor condicionante de cambios en el sistema. La influencia del viento le sigue en orden de importancia, resultando significativa en el interior del río. Para los escenarios futuros, las áreas inundadas permanentemente en la costa argentina del Río de la Plata no resultan ser de grandes extensiones. Pero la elevación del nivel medio del mar se manifestará en un aumento del riesgo de inundación debido a eventos de tormenta.

## Abstract

---

Coastal zones and, specially, cities located on them, are threatened by a wide variety of hazards related to climate. The Argentine coast of the Rio de la Plata and, in particular, the Metropolitan Region of Buenos Aires, are not away of this situation, being increasingly vulnerable to Climate Change.

In this work, by means of advanced techniques of numerical modeling for the hydrodynamics of the Rio de la Plata, flood risk maps for current conditions, and for possible future scenarios, were determined.

A hydrodynamic model, called RPP-2D was developed, with the objective of simulating the generation of storm surges in the Rio de la Plata and its Maritime Front. This model was calibrated to adjust to astronomical tides, to mean seasonal water levels and frequency occurrence of water levels in Buenos Aires for the present decade, and to large storm surges. The verification of the model was accomplished comparing the mean seasonal water levels and the frequency occurrence of water levels in Buenos Aires for each year of the present decade, sea level data obtained by the TOPEX/Poseidon satellite, and water current velocities measured with current-meters.

A sensitivity analysis of the Rio de la Plata level to the variation of each one of the forcings was performed, establishing the relative importance of changes in mean sea level, winds, and discharge from the tributaries.

The chosen future scenarios represent mean and maximum conditions foreseen for the decades of 2030 and 2070. As result of the simulations, the mean seasonal levels in for the whole domain of the model and the response of the system to storm surges with different return periods were obtained. Using the level water information along the whole Argentine coast of the Rio de la Plata, flood risk maps were obtained.

It is concluded that the sea mean level rise is the major conditionant of changes in the system. The influence of wind is second in order of importance, being significant in the interior of the river. For the future scenarios, the areas permanently flooded along the Argentine coast of the Rio de la Plata are small in extension. But the mean sea level rise will manifest in an increase of flood risk due to storm surges.

## Agradecimientos

---

Quiero expresar mi agradecimiento a todos aquellos que estuvieron ligados al proceso de producción de esta Tesis. A Ángel Menéndez, quien condujo la ejecución de este trabajo, por su constante apoyo y asesoramiento en todos los aspectos de la elaboración de esta obra, así como por la confianza en mí depositada. A Vicente Barros, por su atención y sus continuos consejos e ideas. También a los miembros del Tribunal Examinador por invertir parte de su tiempo en la evaluación de este trabajo, a los integrantes del PIRNA (Programa de Investigación en Recursos Naturales y Ambiente de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Buenos Aires) por la colaboración en la realización de los mapas de riesgo, a Enrique D'Onofrio y Mónica Fiore del SHN (Servicio de Hidrografía Naval) quienes elaboraron y suministraron valiosa información mareológica, y a los miembros del LCR (Laboratorio de Climatología Regional del Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires) que aportaron datos necesarios para forzar el modelo. Además, manifiesto mi gratitud para con los integrantes del equipo del Programa de Hidráulica Computacional (INA, Instituto Nacional del Agua) y el Laboratorio de Modelación Matemática (FIUBA, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires), y el resto de los compañeros del Laboratorio de Hidráulica del INA.

Sosteniendo, el andamio de afectos: a mis viejos, Marta y Oscar, quienes incansablemente cooperaron en la concreción de este y otros objetivos, a mis hermanos, Valeria y Fernando, los que calurosamente acompañaron este andar, a Clau, la que sabe de juegos con luz y poco a poco aprendió de inundaciones, y a mis amigos, especialmente a Hugo Buttigliero, quien me indicó que por ahí era el camino.

Esta Tesis de Maestría fue realizada en el marco de los siguientes proyectos: *"Impact of Global Change on the Coastal Areas of the Rio de la Plata: Sea Level Rise and Meteorological Effects"*, Proyecto AIACC (Assessment of Impacts and Adaptation to Climate Change), financiado por GEF (Global Environment Facility) e implementado por UNEP (United Nations Environment Programme), 2002-2004, e *"Inundaciones: génesis, costo socioeconómico, adaptación y prevención"*, Proyecto Estratégico de la Universidad de Buenos Aires, 2002-2004.

# Índice

---

<b>RESUMEN .....</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>5</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>6</b>
<b>ÍNDICE .....</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>10</b>
I - 1 PLANTEO DEL PROBLEMA .....	10
I - 2 ÁREAS COSTERAS ARGENTINAS DEL RÍO DE LA PLATA .....	12
I - 3 USOS DEL RÍO DE LA PLATA .....	12
I - 4 CARACTERÍSTICAS DEL RÍO DE LA PLATA .....	13
I - 5 IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL RÍO DE LA PLATA.....	14
<b>CAPÍTULO II EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL .....</b>	<b>15</b>
II - 1 CAMBIO CLIMÁTICO .....	15
<i>II - 1.1 EL SISTEMA CLIMÁTICO .....</i>	<i>15</i>
<i>II - 1.2 EFECTO INVERNADERO.....</i>	<i>16</i>
II - 2 EVALUACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO .....	17
<i>II - 2.1 PROYECCIÓN CLIMÁTICA .....</i>	<i>17</i>
<i>II - 2.2 ESCENARIO DE EMISIONES.....</i>	<i>18</i>
<i>II - 2.3 MODELOS CLIMÁTICOS .....</i>	<i>19</i>
<i>II - 2.4 AUMENTO DEL NIVEL MEDIO DEL MAR.....</i>	<i>20</i>
II - 3 ZONAS COSTERAS Y CAMBIO CLIMÁTICO .....	20
II - 4 ANTECEDENTES.....	21
<i>II - 4.1 INTRODUCCIÓN.....</i>	<i>21</i>
<i>II - 4.2 ESTUDIOS SOBRE IMPACTOS COSTEROS DEL CAMBIO CLIMÁTICO.....</i>	<i>22</i>
<i>II - 4.2.1 Áreas costeras de Polonia.....</i>	<i>22</i>
<i>II - 4.2.2 Áreas costeras de Estonia .....</i>	<i>22</i>
<i>II - 4.2.3 Costa Este de Australia, New South Wales.....</i>	<i>23</i>
<i>II - 4.2.4 Sistema Mar del Norte / Mar Báltico .....</i>	<i>23</i>
<i>II - 4.2.5 Estuario de Weser, Alemania .....</i>	<i>24</i>
<i>II - 4.2.6 Costas de la isla Prince Edgard (Canadá).....</i>	<i>25</i>
<i>II - 4.2.7 Costas del área metropolitana de Nueva York (Estados Unidos) .</i>	<i>25</i>
<i>II - 4.2.8 Comunidad costera de Nueva Jersey (Estados Unidos).....</i>	<i>26</i>

II - 4.2.9	<i>Costa Norte de Australia, Queensland</i> .....	27
II - 4.2.10	<i>Mar Báltico, Suecia</i> .....	28
II - 4.3	<i>SÍNTESIS METODOLÓGICA</i> .....	29
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>FORZANTES DEL SISTEMA</b> .....	<b>32</b>
III - 1	INTRODUCCIÓN .....	32
III - 2	MAREA.....	32
III - 3	TRIBUTARIOS.....	33
III - 4	CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA .....	34
III - 5	NIVEL MEDIO.....	35
<b>CAPÍTULO IV</b>	<b>MODELACIÓN HIDRODINÁMICA</b> .....	<b>38</b>
IV - 1	ANTECEDENTES DE MODELACIÓN EN EL RÍO DE LA PLATA.....	38
IV - 2	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO .....	39
IV - 2.1	<i>SOFTWARE HIDROBID II</i> .....	39
IV - 2.2	<i>DOMINIO DE CÁLCULO</i> .....	40
IV - 2.3	<i>BATIMETRÍA</i> .....	41
IV - 2.4	<i>MODELO DIGITAL DEL TERRENO</i> .....	43
IV - 2.5	<i>CONDICIONES DE BORDE</i> .....	44
IV - 2.5.1	<i>Consideraciones generales</i> .....	44
IV - 2.5.2	<i>Onda de Marea</i> .....	45
IV - 2.5.3	<i>Tributarios</i> .....	46
IV - 2.5.4	<i>Campos de vientos</i> .....	46
IV - 2.6	<i>PASO DE CÁLCULO</i> .....	48
IV - 3	CALIBRACIÓN DEL MODELO .....	49
IV - 3.1	INTRODUCCIÓN .....	49
IV - 3.2	ESCENARIO DE MAREA ASTRONÓMICA PREDICHA .....	49
IV - 3.3	NIVEL MEDIO ESTACIONAL PARA CONDICIONES ACTUALES .....	54
IV - 3.4	CURVA DE FRECUENCIA DE NIVELES DE AGUA EN BUENOS AIRES.....	56
IV - 3.5	SIMULACIÓN DE GRANDES ONDAS DE TORMENTA .....	57
IV - 4	VERIFICACIÓN DEL MODELO .....	59
IV - 4.1	NIVELES MEDIOS DE LA DÉCADA DE 1990 .....	59
IV - 4.2	FRECUENCIAS DE NIVELES DE LA DÉCADA DE 1990 .....	62
IV - 4.3	NIVEL DEL MAR OBSERVADO POR EL SATÉLITE TOPEX/POSEIDON.....	63
IV - 4.4	VELOCIDADES DE CORRIENTES.....	67
<b>CAPÍTULO V</b>	<b>PESO RELATIVO DE LOS FORZANTES</b> .....	<b>69</b>

V - 1	INTRODUCCIÓN .....	69
V - 2	CAUDALES DE LOS TRIBUTARIOS.....	69
V - 3	VIENTOS.....	71
V - 4	NIVEL MEDIO DEL MAR.....	72
V - 5	COMPARACIÓN DE RESPUESTAS.....	73
<b>CAPÍTULO VI PROYECCIONES PARA ESCENARIOS FUTUROS.....</b>		<b>74</b>
VI - 1	INTRODUCCIÓN .....	74
VI - 2	ESCENARIOS FUTUROS.....	74
VI - 2.1	<i>LÍNEA EVOLUTIVA</i> .....	74
VI - 2.2	<i>ENSAYOS REALIZADOS</i> .....	74
VI - 3	RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES .....	79
VI - 3.1	<i>NIVELES MEDIOS ANUALES</i> .....	79
VI - 3.2	<i>NIVELES MEDIOS ESTACIONALES</i> .....	86
VI - 3.3	<i>COMPONENTES DEL CAMBIO</i> .....	90
<b>CAPÍTULO VII RIESGO DE INUNDACIÓN .....</b>		<b>95</b>
VII - 1	ESCENARIO DE RIESGO .....	95
VII - 2	METODOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN DE MAPAS DE RIESGO .....	96
VII - 3	MAPAS DE RIESGO .....	100
VII - 3.1	<i>INUNDACIÓN PERMANENTE</i> .....	100
VII - 3.2	<i>INUNDACIONES RECURRENTES</i> .....	101
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>113</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>		<b>117</b>

## Capítulo I Introducción

---

### I - 1 Planteo del problema

Las zonas costeras y las ciudades ubicadas en ellas están amenazadas por una amplia variedad de peligros relacionados con el clima, y por las actividades del hombre que los modifican. La demanda de recursos se incrementa con la exposición de la población a las amenazas costeras (Sterr *et al.*, 2000).

En 1990 se estimó que al menos doscientos millones de personas viven en planicies de inundación costeras (en el área que se inunda debido a eventos con recurrencias de 1 a 1000 años) y es posible que este número se incremente a seiscientos millones para el año 2100 (Nicholls y Mimiura, 1998). Cohen y Small (1998), postulan que la ubicación de 11 de las 15 ciudades con más de 10 millones de habitantes (entre las que se encuentra Buenos Aires y su región metropolitana) sugiere que existe una gran porción de población que habita en bajas elevaciones cerca de la línea de costa, verificando estos datos con información de distintos censos del mundo y estableciendo que el 33.5% de la población mundial vive en los primeros 100 m sobre el nivel del mar. También plantean que un porcentaje significativo de esta población vive en densidades demográficas moderadas más que en las altas densidades de las grandes ciudades, advirtiendo sobre la posibilidad de considerar no solo las poblaciones de grandes centros urbanos en los análisis de posible afectación.

Sobre la costa argentina del Río de la Plata Interior, y dentro de la zona que se extiende desde la cabecera hasta la línea imaginaria Punta Piedras (Argentina) – Montevideo (Uruguay), se desarrolla la Región Metropolitana de Buenos Aires (RMBA), el principal conglomerado urbano del país, con centro en la capital de la Argentina (Figura I-1). La población de la RMBA es de unos 14 millones de habitantes. Esta zona se localiza dentro del Eje Fluvial Industrial Rosario – La Plata, en donde actualmente se encuentran fuertemente concentrados la población y la actividad industrial de la Argentina y, en consecuencia, los principales focos de contaminación atmosférica y acuática. También, en la misma región se encuentra la ciudad de La Plata y su región metropolitana, alcanzando una población de 540000 habitantes. La Plata es el centro administrativo de la provincia de Buenos Aires y cuenta con un importante complejo portuario. Las áreas costeras argentinas del Río de la Plata, hacia el exterior del río, en la zona de la Bahía Samborombón, prácticamente carecen de centros urbanos (con excepción de la localidad de General Lavalle, con unos 3000 habitantes) así como también de infraestructura o recursos insustituibles (Figura I-2).



Figura I-1 Áreas costeras argentinas del Río de la Plata Interior.



Figura I-2 Áreas costeras argentinas del Río de la Plata Exterior.

En las últimas décadas la combinación de la degradación del medio ambiente y la vulnerabilidad ante los desastres naturales se ha tornado más crítica y más difícil

de manejar en las áreas urbanas (Kreimer *et al.*, 2001). La RMBA, al igual que muchas urbanizaciones costeras, es susceptible a eventos extremos de inundaciones que producen pérdidas sociales y económicas muy significativas.

El Cambio Climático puede hacer más vulnerables las áreas costeras, especialmente por el aumento del nivel medio del mar. Desde el punto de vista físico, la zona Sur de la Bahía Samborombón se presenta como el área más amenazada. Sin embargo, considerando las exposiciones sociales y económicas, los mayores riesgos se encuentran ciertamente en las áreas bajas de la RMBA (Codignotto y Kokot, 2003).

En el presente estudio, mediante avanzadas técnicas de modelación numérica de la hidrodinámica del Río de la Plata, se determinan los mapas de riesgo de inundaciones para las condiciones actuales, y para posibles escenarios futuros. Además del interés directo, este producto constituye uno de los insumos básicos para determinar la vulnerabilidad de la población y la infraestructura a las inundaciones.

## **I - 2 Áreas costeras argentinas del Río de la Plata**

Las condiciones ambientales del Río de la Plata y su Frente Marítimo están amenazados por una multiplicidad de causas antropogénicas. Entre estas amenazas se destacan los desechos urbanos, agrícolas e industriales; los pesticidas, hidrocarburos y metales pesados; los sedimentos y organismos en la parte baja del río, que reflejan la proximidad de zonas urbanas e industriales.

La zona costera argentina del Río de la Plata Interior se encuentra degradada debido a la contaminación crónica, la pérdida de biodiversidad, la destrucción del hábitat natural, el riesgo elevado de inundaciones, y las invasiones de especies exóticas. La línea de la costa de la RMBA es la que más se ha modificado de la Argentina, concentrándose estos cambios en la zona Norte de Buenos Aires (Barragán Muñoz *et al.*, 2003). Hacia el Sur, en sectores de la Bahía Samborombón, sin embargo, se presentan ecosistemas relativamente poco alterados, manteniéndose una buena conservación en los paisajes naturales.

## **I - 3 Usos del Río de la Plata**

Desde el punto de vista social, económico y ecológico, el Río de la Plata juega un rol fundamental en la región (Menéndez, 2001). Las capitales de Argentina y Uruguay, Buenos Aires y Montevideo respectivamente, se encuentran sobre sus costas. El Río de la Plata constituye la fuente principal de abastecimiento de agua de Buenos Aires y su área metropolitana, constituyéndose también en el sitio de descargas industriales y domésticas. Con el objetivo de mantener las conexiones oceánicas a los

puertos de Buenos Aires y Rosario, permanentemente se realizan acciones de dragado en los canales de navegación. También, actividades de navegación deportiva y de pasajeros se llevan a cabo a diario en el Río de la Plata. En cuanto al aspecto ambiental, el frente de turbidez, ubicado en la zona de transición entre el río interior y exterior, constituye una zona de interfase con importantes implicancias ecológicas

## I - 4 Características del Río de la Plata

El Río de la Plata es un extenso estuario localizado en la costa Este de Sudamérica, aproximadamente entre los 34° y 36° de latitud Sur y los 54° 50' y 58° 30' de longitud Oeste. El río, cuya forma de embudo se orienta en el sentido Noroeste - Sudeste, alcanza una longitud aproximada de 290 km. Rápidamente adquiere un ancho de unos 50 km en la zona superior del río, incrementándose hasta unos 70 km en la zona media (ambas zonas constituyen lo que se llama Río de la Plata Interior) y expandiéndose, en la zona del Río de la Plata Exterior, hasta alcanzar unos 200 km en la línea imaginaria Punta Rasa (Argentina) – Punta del Este (Uruguay). El Río de la Plata constituye el umbral sobre el Océano Atlántico de la segunda cuenca fluvial de América del Sur: la Cuenca del Plata cuya superficie es de aproximadamente 3.1 millones de km<sup>2</sup> (Figura I-3).



Figura I-3 Cuenca del Río de la Plata

El Río de la Plata presenta altas concentraciones de sedimentos finos en suspensión en su zona interior, depositándose una parte en el fondo. En el Río de la Plata Exterior penetran arenas de origen marino. La profundidad media del Río de la Plata es de unos 10 m, observándose zonas muy someras en el interior del río, con profundidades que oscilan entre 1 y 4 m, llegando a los 18 m en la zona exterior. En la transición entre el agua dulce y el agua salada se manifiesta una zona conocida

como "cuña salina" donde la concentración de sal es variable espacial y temporalmente, advirtiéndose un gradiente de 0 a 33 psu (Kind, 2004).

## **I - 5 Impacto del Cambio Climático sobre el Río de la Plata**

El cambio climático se está manifestando significativamente en la Argentina. La forma más evidente es a través del exceso hídrico en varias zonas del país, el cual está produciendo impactos tanto negativos como positivos sobre el devenir socioeconómico.

El Río de la Plata, en particular, está experimentando un incremento de su nivel medio por el aumento del nivel medio del mar y, en menor medida, por el cambio en la dirección de los vientos estacionales predominantes y el incremento del caudal de los tributarios principales (ríos Paraná y Uruguay). Además, está aumentando la frecuencia de las ondas de tormenta. Estos efectos significan una mayor vulnerabilidad de la zona costera a las inundaciones.

Algunas publicaciones reflejan esta problemática en el Río de la Plata desde distintos puntos de vista. Barros *et al.* (2003) mostraron que el Anticiclón del Atlántico Sur está desplazándose lentamente hacia el Sur incrementando la frecuencia de vientos del Este en el estuario del Río de la Plata. Codignotto y Kokot (2003) plantean que en el Río de la Plata las zonas más vulnerables físicamente ante el cambio climático, aquellas que están potencialmente sujetas a eventos de inundación y/o erosión costera, están representadas en: el frente del Delta del río Paraná, la costa ubicada al pie del paleoacantilado próximo a la línea de ribera, los ríos Luján, Reconquista, Riachuelo, Salado y Samborombón, como así también la costa de la Bahía Samborombón, General Lavalle y San Clemente del Tuyú. Dragani y Romero (2004), manifiestan que una mayor frecuencia de vientos del Este en el Río de la Plata Interior produciría incrementos en las alturas de olas y en sus frecuencias y que la costa de la ciudad de Buenos Aires estaría más expuesta a los efectos de las mismas, indicando que el clima de olas en esa zona es muy sensible a los cambios en los campos de vientos.

## Capítulo II El cambio climático global

---

### II - 1 Cambio Climático

#### II - 1.1 El sistema climático

El sistema climático es un sistema altamente complejo integrado por cinco grandes componentes: la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la superficie terrestre y la biosfera, y las interacciones entre ellos. El clima de la superficie de la Tierra, en un sentido amplio, puede ser definido como el estado del sistema climático. La relación entre los distintos componentes de este sistema se da a través de flujos de energía de diversas formas, de intercambios de agua, de flujos de otros gases en trazas importantes respecto de su intervención en los procesos de radiación, entre los que figuran el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el metano (CH<sub>4</sub>), y del ciclo de nutrientes.

El principal forzante del sistema climático es el ingreso de energía solar, también denominada radiación de onda corta, siendo equilibrado por la radiación terrestre en forma de emisión de energía infrarroja. La energía solar es la fuerza conductora más importante de los movimientos de la atmósfera y el océano, de los flujos de calor y agua y de la actividad biológica. El espectro de radiación solar (rango de longitudes de onda) es distinto del de la radiación terrestre o infrarroja, a causa de la diferencia de temperaturas entre el Sol y el sistema Tierra – atmósfera.

Para comprender al clima en su totalidad y predecir los cambios climáticos, se debe entender el comportamiento del Sol, los océanos, los hielos, la Tierra y todas las formas de vida de la biosfera. El clima puede ser afectado por cualquier factor que altere la radiación recibida del Sol o perdida en el espacio, o que cambie la redistribución de energía dentro de la atmósfera y entre atmósfera, Tierra y océano. Esto explica la evolución con el tiempo del sistema climático bajo la influencia de su propia dinámica interna y debido a forzamientos externos (como las erupciones volcánicas, las variaciones solares, los cambios en la órbita de la Tierra) y los forzamientos inducidos por el ser humano (como los cambios en la composición de la atmósfera y los cambios en el uso de la tierra). La respuesta del sistema climático se da en diversas escalas temporales, dependiendo del tipo de cambio.

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), creado por la Organización Meteorológica Mundial (WMO) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), ha elaborado una importante serie de informes y documentos técnicos de referencia. En el Segundo informe de

evaluación (IPCC, 1995) se presenta la Figura II-1, donde se muestra un esquema del sistema climático, ilustrándose las interacciones más importantes entre sus diversos componentes y las propiedades que pueden cambiar a escala temporal de un siglo. Los procesos e interacciones entre los componentes se representan con flechas finas y los elementos posibles de cambiar con flechas gruesas.

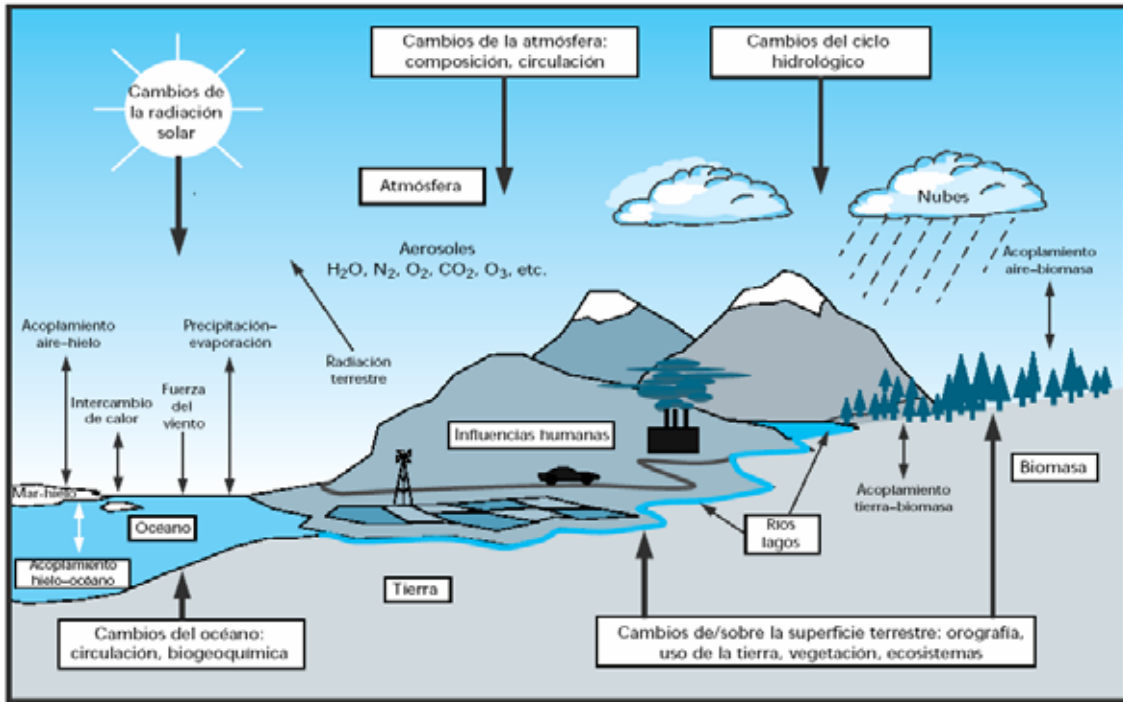


Figura II-1 Esquema de los componentes del sistema climático más importantes para los cambios climáticos a escala temporal de un siglo (IPCC, 1995).

## II - 1.2 Efecto invernadero

Ciertos gases de la atmósfera absorben radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera debido a los mismos gases, y por las nubes. Estos gases atrapan el calor dentro del sistema Troposfera – superficie, llamándose a este proceso: efecto invernadero natural. Los gases que lo provocan son los llamados gases de efecto invernadero (GEI). En la atmósfera de la Tierra, los gases de efecto invernadero son, básicamente: vapor de agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ), metano ( $CH_4$ ) y ozono ( $O_3$ ). En la figura II-2 se observa un esquema representativo de este fenómeno.

La radiación infrarroja emitida hacia el espacio se origina a una altitud en que la temperatura es de  $-19\text{ }^\circ\text{C}$  como promedio, en equilibrio con la radiación solar incidente neta, mientras que la superficie de la Tierra se mantiene a una temperatura mucho más alta,  $14\text{ }^\circ\text{C}$  como promedio (IPCC, 2001a). Esto quiere decir que la temperatura de la Tierra sería  $33\text{ }^\circ\text{C}$  menor si no tuviera atmósfera, destacando la importancia de este proceso.



Figura II-2 Esquema representativo del efecto invernadero.

Cuando aumenta la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera debido a la actividad antrópica, se acentúa la capacidad de atrapar el calor dentro de la misma, lo que a su vez genera una radiación efectiva hacia el espacio desde una altitud mayor, a una temperatura más baja. Esto causa un desequilibrio que sólo puede compensarse con un aumento de la temperatura del sistema Troposfera - superficie. De aquí en más, a este proceso se lo llamará Cambio Climático.

## II - 2 Evaluación del Cambio Climático

### II - 2.1 Proyección climática

Ante el objetivo de evaluar impactos del Cambio Climático, es necesario realizar proyecciones climáticas. Esta idea lleva a analizar las respuestas del sistema climático a los escenarios de emisiones o de concentración de gases de efecto invernadero y aerosoles, o a escenarios de forzamiento radiativo basados en simulaciones realizadas con modelos climáticos. La dependencia del escenario de emisiones, concentración o forzamiento radiativo que se plantee, hace que las proyecciones climáticas se diferencien de las predicciones climáticas.

Las proyecciones del cambio climático futuro se presentan por medio de una amplia gama de escenarios de emisiones futuras de gases de efecto invernadero y de aerosoles.

## **II - 2.2 Escenario de emisiones**

Un escenario de emisión es una descripción verosímil del clima futuro basado en una serie de relaciones climatológicas. Según el IPCC (2000), las emisiones futuras de gases de efecto invernadero son el producto de sistemas dinámicos muy complejos, determinadas por forzantes como el desarrollo demográfico y socioeconómico y los cambios tecnológicos.

La importancia de la utilización de escenarios de emisión radica en la necesidad de analizar exhaustivamente el Cambio Climático, incluyendo su modelación y la evaluación de los impactos, adaptación y mitigación.

El IPCC (2000) desarrolló un conjunto de escenarios de emisión, escenarios IE-EE, con el objetivo de cumplir con el amplio rango de variación de los distintos forzantes. Cada escenario representa una interpretación cuantitativa específica de una de las cuatro líneas evolutivas (A1, A2, B1 y B2). El conjunto de escenarios basados en una misma línea evolutiva constituye una familia de escenarios. En la figura II-3 se presenta un esquema de las características principales de las líneas de evolución y familias de escenarios, que se detallan a continuación:

**A1** - Rápido crecimiento económico. La población mundial alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente. Rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Convergencia entre regiones, creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales. Reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante.

**A2** - Mundo muy heterogéneo, autosuficiencia y conservación de las identidades locales. Población en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones. El crecimiento económico por habitante y el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

**B1** - Mundo convergente. La población mundial alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente. Rápidos cambios en las estructuras económicas orientadas a una economía de servicios y de información. Introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. Soluciones de

orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.

**B2** - Mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. La población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas A1 y B1. Se centra en los niveles local y regional, para la protección del medio ambiente y la igualdad social.

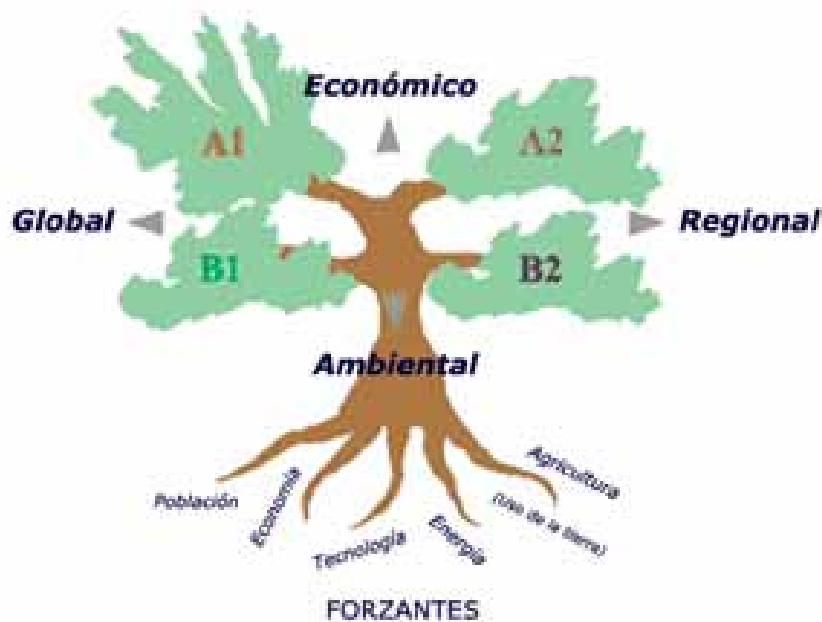


Figura II-3 Esquema de las características de las cuatro líneas evolutivas y familias de escenarios futuros que propone el IPCC (2000a)

### II - 2.3 Modelos climáticos

Según el IPCC (2001a), el único instrumento que permite hacer estimaciones cuantitativas de los cambios climáticos futuros resulta ser la modelación numérica. Un modelo numérico climático es una representación numérica del sistema climático basado en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes y sus interacciones.

Los modelos climáticos se utilizan como método de investigación para estudiar y simular el clima, pero también con fines prácticos, entre ellos las predicciones climáticas mensuales, estacionales e interanuales. Los modelos climáticos proyectan los cambios en función de una serie de variables climáticas a gran escala (espacial y temporal). Los modelos en los que se han acoplado los componentes atmosféricos y

oceánicos se conocen también con el nombre de Modelos de la Circulación General Atmósfera – Océano (MCGAO).

A partir de las condiciones de borde que plantee un determinado escenario de emisiones, y utilizando un modelo climático, se pueden conocer las características futuras de las distintas variables del sistema climático.

## **II - 2.4 Aumento del nivel medio del mar**

El nivel del mar en las líneas de costa está determinado por una gran variedad de factores medioambientales que intervienen en distintas escalas temporales. En las escalas temporales de los decenios a los siglos, la mayor parte de las influencias en el aumento del nivel del mar se vinculan con el clima y los procesos de Cambio Climático. En las escalas temporales estacional, interanual y decenal, el nivel del mar responde a cambios en la dinámica de la atmósfera y el océano, de los cuales el ejemplo más notable es el que se produce durante los episodios El Niño.

La expansión térmica es uno de los principales contribuyentes a los cambios históricos en el nivel medio del mar, y será quién aportará el mayor componente al aumento del nivel del mar en los próximos cien años como lo expone el IPCC (2001a). La distribución geográfica del cambio en el nivel medio del mar es resultado de la variación espacial de la expansión térmica, los cambios en la salinidad, los vientos y la circulación de los océanos. El segundo lugar, en cuanto al aporte al aumento del nivel medio del mar, lo ocupará la fusión de los glaciares de montaña y de los casquetes de hielo. Existen otros procesos que también pueden influir (el almacenamiento de agua terrestre, la subsidencia o el levantamiento de la costa y los movimientos verticales en tierra firme provocados por procesos geológicos naturales), pero no están explícitamente relacionados con el Cambio Climático.

Barros (2004), postula que el nivel medio del mar depende principalmente de la temperatura media global, aunque puede presentar algunas variaciones locales por la influencia de los vientos; y que actualmente, la expansión de las aguas por calentamiento, sumada al deshielo de mantos continentales y glaciares, está produciendo un aumento del nivel medio del mar del orden de los 4 mm/año.

## **II - 3 Zonas costeras y Cambio Climático**

El Cambio Climático y el aumento del nivel medio del mar asociado traerán las principales consecuencias a las sociedades y ecosistemas costeros. Desde el punto de vista ambiental, las zonas costeras son ambientes de mucha diversidad y productividad. Estas franjas representan una zona de interfase, generalmente en

cortas distancias se pueden encontrar un amplio rango de condiciones ambientales, desde ecosistemas naturales hasta grandes centros urbanos (Klein *et al.*, 2002).

Son muchas las amenazas a las que están expuestas las zonas costeras. Entre los posibles impactos del Cambio Climático y del aumento del nivel del mar, detallados por el IPCC (2001*b*), se encuentran los siguientes:

**Impactos biofísicos:** Aumento de la erosión costera. Inhibición de los procesos de producción primaria. Inundaciones costeras más extensas. Mayores inundaciones por ondas de tormenta. Intrusión marina en aguas de estuarios y acuíferos. Cambios en la calidad del agua superficial y las características del agua subterránea. Cambios en la distribución de los microorganismos patógenos. Mayores temperaturas en la superficie del mar. Reducción de la cobertura de hielo.

**Impactos socioeconómicos:** Mayores pérdidas de hábitats costeros. Aumento del riesgo a inundaciones y la potencial pérdida de vidas. Daño a protecciones costeras y otra infraestructura. Mayor riesgo de enfermedades. Pérdida de recursos renovables y de subsistencia. Pérdidas en los sectores turismo, recreación y transporte. Pérdidas de recursos y valores culturales. Impactos en la agricultura y la acuicultura debida a la declinación de la calidad del agua y del suelo.

El conocimiento de la vulnerabilidad, permite a los científicos costeros anticipar los impactos que pueden emerger como resultado del aumento del nivel medio del mar. Esto también puede ayudar a priorizar los esfuerzos de gestión que deben ser tomados para minimizar los riesgos o mitigar las posibles consecuencias (Sterr *et al.*, 2000). También Klein *et al.* (2002), observan que en muchas evaluaciones de vulnerabilidad costera al Cambio Climático, no siempre éste es el asunto más crucial para la región.

## **II - 4 Antecedentes**

### ***II - 4.1 Introducción***

No son muchos los estudios de impactos del Cambio Climático en regiones costeras que se encuentran en la literatura especializada. Los trabajos que aquí se analizan tienen en común, en cuanto a las componentes metodológicas, el estudio de los niveles de agua en el sistema analizado y el planteo de escenarios futuros.

## **II - 4.2 Estudios sobre impactos costeros del Cambio Climático**

### **II - 4.2.1 Áreas costeras de Polonia**

Zeidler (1997), al evaluar el aumento del nivel medio del mar debido al Cambio Climático en las áreas costeras de Polonia, planteó una metodología simple para estudiar las posibles estrategias de respuesta y adaptación. Propuso cuatro escenarios de aumento del nivel medio del mar para los años 2030 (+10 cm y +30 cm) y 2100 (+30 cm y +100 cm), y también cambios en los climas de vientos, y estableció tres zonas de impacto ubicadas por debajo de 2.5 m sobre el nivel del mar, teniendo en cuenta los máximos niveles a alcanzarse debido a las ondas de tormenta. Para identificar los escenarios de inundación, a partir de tres series de mediciones del nivel del mar de casi 100 años, obtuvo la distribución de valores extremos de niveles. Supuso una duración de la tormenta para calcular la superficie inundada. Luego, a esta área, en función de la probabilidad de excedencia del nivel de las ondas de tormenta adoptado como dato, le asignó una probabilidad de inundación.

### **II - 4.2.2 Áreas costeras de Estonia**

Estonia es un país que se encuentra sobre las costas del Mar Báltico, con una muy importante línea de costa y predominancia de áreas bajas (Kont *et al.*, 1997). Por lo tanto, el aumento del nivel medio del mar acelerado asociado con el Cambio Climático impactará fuertemente en el territorio de este país. Por otro lado, en esas costas está teniendo lugar un levantamiento isostático (entre 1 y 2.5 mm/año) que reduciría los efectos del aumento del nivel medio del mar. En este trabajo se estudiaron cuatro regiones que caracterizaban el conjunto de tipos de costas de Estonia, con el objetivo de evaluar la vulnerabilidad y la adaptación al aumento del nivel medio del mar.

Los datos sobre las fluctuaciones del nivel del mar y las ondas de tormenta fueron obtenidas de estaciones de observación a lo largo de la costa. Debido a características propias de la zona, las mareas no tienen significancia en el régimen hidrodinámico del Mar Báltico. A partir de diversas fuentes de datos se construyeron mapas de la situación presente de la costa, planteándose dos diferentes posiciones de la costa: una ante una situación meteorológica normal y otra durante una onda de tormenta (siempre teniendo en cuenta los cambios isostáticos).

Para una situación futura, ubicada en el año 2075, propusieron un aumento del nivel medio del mar de 100 cm. La nueva información fue volcada en nuevos mapas de la línea de costa conteniendo los máximos y mínimos niveles del mar y el posible retroceso de la misma. También plantearon un escenario de aumento del nivel del mar

de 30 cm, pero no dio resultados mensurables debido a la predominancia de elevación de la corteza terrestre.

### **II - 4.2.3 Costa Este de Australia, New South Wales**

El informe de McInnes *et al.* (1998), acerca del impacto del Cambio Climático en la región costera de New South Wales, en la costa Este de Australia, a pesar de tener una búsqueda más intensa de los aspectos atmosféricos del cambio, muestra un análisis interesante de los impactos de las ondas de tormenta.

Para el análisis del aumento del nivel medio del mar aceptan al mismo dentro de un rango de variación, adoptando valores de escala global propuestos por el IPCC para el año 2020 (Bajo: +5 cm, Medio: +10 cm, Alto: +20 cm) y 2050 (Bajo: +10 cm, Medio: +20 cm, Alto: +40 cm). Este efecto, a la hora de evaluar cambios en los niveles de las ondas de tormentas no fue tenido en cuenta.

En cuanto a las condiciones que se dan en esta región, las anomalías en el nivel del mar no son de más de 50 cm debido a la estrecha plataforma continental de la zona. A pesar de esta baja amplitud, los eventos son de larga duración, generalmente acompañados por intensas lluvias, lo que hace más problemática la situación para las descargas costeras.

Se simularon tres tormentas distintas, usando un modelo atmosférico y un modelo oceanográfico. El modelo hidrodinámico utilizado es un modelo oceánico integrado en la vertical que simula corrientes y elevaciones en la superficie del mar en plataformas continentales, con una resolución de 2000 m. La presión atmosférica y el campo de vientos, necesarios para forzar el modelo hidrodinámico, se obtuvieron de un modelo atmosférico regional utilizando tres bases de datos distintas.

Respecto de cambios en el futuro, se analizaron los mismos eventos pero con un cambio de 3 °C en la temperatura de la superficie del mar, parámetro que logra variar la intensidad de la tormenta y los impactos costeros asociados a las lluvias y a los cambios en la intensidad de las ondas de tormenta. De los resultados de estas simulaciones, se advirtieron aumentos de hasta el 50% en la intensidad de las ondas de tormenta, según la posición en la costa.

Al final de este informe, los autores recomiendan como trabajo futuro, examinar el rol de los eventos de tormentas severas en condiciones elevadas del nivel medio del mar.

### **II - 4.2.4 Sistema Mar del Norte / Mar Báltico**

Schrum (2001), en su trabajo sobre la regionalización de la variabilidad climática y el Cambio Climático esperado en el sistema Mar del Norte / Mar Báltico,

para estudiar la influencia de los cambios en los vientos forzantes utilizó un modelo hidrodinámico 3D.

Los modelos climáticos globales, sobre la región en cuestión, sugieren que la consolidación del frente polar, y la intensificación de la Oscilación de Atlántico Norte son esperables, lo cual está íntimamente ligado con un aumento de la intensidad de los vientos del Oeste sobre el Mar del Norte y el Mar Báltico. Por lo tanto, se realizaron simulaciones con vientos del Oeste en aumento, estudiando los cambios en los patrones de circulación y las distribuciones de salinidad y temperatura.

El modelo oceánico utilizado en este análisis de sensibilidad, que describe la variabilidad de los niveles de la superficie del mar, su temperatura y salinidad, fue la aplicación para el Mar del Norte / Mar Báltico del "Hamburg Shelf Ocean Model" HamSOM. Para su validación, el modelo fue forzado con los reanálisis del ECMWF (European Centre for Medium - Range Weather Forecasts).

#### **II - 4.2.5 Estuario de Weser, Alemania**

Grabemann *et al.* (2001) plantearon para el estuario de Weser, que se encuentra en el Norte de Alemania, tiene una longitud de 120 km y descarga sus aguas en el Mar del Norte, un escenario climático para el año 2050 que fue utilizado con el objetivo de investigar las consecuencias del calentamiento global en esa región. Este estudio fue realizado en el marco del proyecto interdisciplinario "Climate Change Impact on the Weser Estuary Region", que investigó la sensibilidad de las propiedades hidrológicas, ecológicas y socioeconómicas del estuario y su zona de adyacencia con respecto al Cambio Climático.

La hidrodinámica y la calidad del agua, influyentes en las condiciones ecológicas del estuario, se estudiaron en base a la modelación numérica. Las modelaciones correspondieron a la situación presente y a un escenario climático futuro, sin estudiar cambios en la batimetría.

La herramienta de modelación utilizada, correctamente validada, fue un modelo numérico de calidad y transporte de agua unidimensional, elección fundada en la necesidad de analizar variaciones temporales y longitudinales en el estuario, especialmente con respecto a la descarga de los tributarios. En el extremo marino del modelo se impusieron como condición de borde el ciclo de mareas y los valores de salinidad, utilizando para las corridas información de variables meteorológicas observadas (diariamente o cada tres horas).

El escenario de Cambio Climático elegido asume un aumento del nivel medio de mar en 55 cm y un cambio en el rango de amplitud de marea de 30 cm (estos cambios, para la modelación, fueron considerados en el borde marino del modelo).

También se asumieron incrementos en las temperaturas y cambios en la precipitación, estas variaciones fueron reflejadas en las descargas de los tributarios.

#### **II - 4.2.6 Costas de la isla Prince Edgard (Canadá)**

El trabajo de Shaw (2001), consistente en evaluar los impactos del Cambio Climático y el aumento acelerado del nivel medio del mar en las costas de la isla Prince Edward, tanto en los aspectos físicos como socioeconómicos. Fue planteado debido al incremento en las frecuencias y extensión de las inundaciones en Charlottetown y el decrecimiento de la capa de hielo, la mayor energía del oleaje y erosión de la costa Norte, analizando las posibles medidas de adaptación a tomar.

Las observaciones en la región muestran que, en el último siglo, el nivel medio del mar ha crecido alrededor de 30 cm. Parte de este crecimiento (quizá unos 20 cm) es debido a la subsidencia de la corteza terrestre, el resto es una señal de aumento del nivel medio del mar a escala regional y global. Se adoptó el valor medio de 50 cm para el aumento del nivel medio del mar, combinado con una estimación conservativa de 20 cm de subsidencia, para el año 2100 como situación de mínima (para la de máxima se adoptó la proyección de 110 cm de aumento). Estos valores fueron utilizados para estimar futuras ondas de tormentas y otros niveles de inundación.

La Universidad de Dalhousie desarrolló un modelo numérico, forzado por campos de vientos y de presión atmosférica a nivel del mar, para pronosticar ondas de tormenta. Con este modelo operativo plantearon una metodología llamada "Probable Maximum Storm" que consistió en modificar las condiciones iniciales en el modelo atmosférico de una tormenta acaecida en el año 2000, cambiando la localización del inicio y su recorrido, con la idea de maximizar el desarrollo de la tormenta y estudiar la sensibilidad de las mismas a cambios en los forzantes. Luego, un método estadístico (el Método de la Probabilidad Condicional) fue implementado para estimar la probabilidad de que un nivel específico sea excedido al menos una vez durante un cierto período.

#### **II - 4.2.7 Costas del área metropolitana de Nueva York (Estados Unidos)**

En el estudio sobre el área metropolitana de la ciudad de Nueva York, en Estados Unidos, Gornitz *et al.* (2002), propusieron una metodología muy completa para indagar acerca de los potenciales impactos del Cambio Climático en el aumento del nivel medio del mar, inundaciones costeras y erosión en la región, y como estos procesos interactúan con la creciente urbanización y los cambios en los usos del suelo.

El área metropolitana de la ciudad de Nueva York como características presenta una extensa línea de costa y una población cercana a los 20 millones de habitantes, con un crecimiento importante en los últimos años. El aumento del nivel

medio del mar promedio absoluto observado alcanza el valor de 1.3 mm/año. En la región, las playas y las islas de barrera, se están estrechando o retrocediendo a causa del aumento del nivel medio del mar y a la subsidencia de la corteza terrestre. Además, la erosión de las playas está frecuentemente intensificada por la actividad antrópica. Los ciclones extratropicales son señalados como responsables de las principales inundaciones y de la erosión, causando importantes daños debido a su gran área de expansión y duración, aunque con velocidades de vientos menores que las de los huracanes (también destructivos).

La metodología adoptada implicó la preparación de una serie de proyecciones del nivel del mar para un número de escenarios plausibles de Cambio Climático regional, y con los modelos del USACE (United States Army Corps of Engineers) el cálculo de alturas de inundación, períodos de retorno e incrementos en los volúmenes de arena para alimentar las playas.

En cuanto a las inundaciones costeras, el objetivo fue el de obtener los niveles medios de las décadas de 2020, 2050 y 2080 (minimizando los efectos de la variabilidad interanual) en cinco estaciones costeras. El aumento del nivel del mar se calculó utilizando datos de niveles de marea observados (extrapolando las tendencias actuales) y con simulaciones de modelos climáticos globales. Con el modelo WIFM (WES Implicit Flooding Model), que resuelve las ecuaciones de la hidrodinámica en aguas poco profundas integradas en la vertical, se obtuvieron los niveles de inundación (onda de tormenta, marea astronómica y aumento del nivel del mar) con distintos períodos de retorno para cada escenario elegido sin tener en cuenta altura de olas y cambios en la climatología de las tormentas. Finalmente se recalcularon los períodos de retorno de inundaciones de las tres décadas, advirtiéndose marcados decrecimientos en sus valores.

#### **II - 4.2.8 Comunidad costera de Nueva Jersey (Estados Unidos)**

Wu *et al.* (2002) examinaron la vulnerabilidad de una comunidad costera de Estados Unidos, Cape May County en Nueva Jersey, a las inundaciones, y como estas son afectadas con el proyectado aumento del nivel medio del mar. Estudiaron la distribución espacial del riesgo de inundaciones presente y la distribución del uso de la tierra, población e infraestructura dentro de la zona de riesgo. El objetivo fue el de analizar el cambio de la distribución del riesgo ante el cambio en el clima.

Los huracanes y las fuertes tormentas extratropicales costeras tienen una influencia importante en Cape May County, donde sus vientos, olas y precipitaciones producen inundaciones costeras, además de otros tipos de impactos, que podrían incrementarse en el futuro. La frecuencia con la que ocurren huracanes en esta zona es menor que en zonas costeras más al Sur en la costa Atlántica. Las tormentas

costeras extratropicales (*Norestes*) son más frecuentes que los sistemas tropicales, pero de igual daño a lo largo de la región.

Para la evaluación de la exposición presente y futura, las ondas de tormenta se declararon objeto de estudio debido a que poseen la mayor capacidad potencial de daño en estas áreas costeras. Los niveles alcanzados por las ondas de tormenta están directamente relacionados con la intensidad de la tormenta, especialmente cuando la marea meteorológica coincide con un nivel normal de la marea astronómica, se causan severas inundaciones en las áreas costeras.

Una de las herramientas utilizadas para analizar las amenazas de las ondas de tormenta es el modelo SLOSH (Sea, Lake and Overland Surges from Hurricanes) operado por el NHC (National Hurricane Center). El modelo SLOSH estima los niveles alcanzados por las ondas de tormenta y los vientos resultantes de huracanes teniendo en cuenta la presión atmosférica, el tamaño de la tormenta, su velocidad y recorrido y los vientos. Se compararon las salidas del modelo SLOSH con un modelo digital del terreno y se mapearon las áreas donde los niveles de agua son mayores que el nivel del terreno. Esta metodología se utilizó para identificar las áreas inundadas por ondas de tormenta asociadas con varias categorías de huracanes y con otras tormentas costeras de intensidades comparables.

Para estudiar las condiciones futuras, de estudios anteriores realizados con los modelos del Canadian Climate Center (CCC) y del Hadley Center, adoptaron el aumento del nivel del mar en 60 cm para el año 2100. Para estimar el área en riesgo para esta proyección se utilizó el mapa de la situación presente y se sumaron 60 cm (aportados por el aumento del nivel medio del mar). Teniendo en cuenta la consideración de que el aumento del nivel medio del mar no es una simple adición de nivel a la situación presente, se advirtió una importante cantidad de superficie en riesgo, mucho mayor que la presente.

Finalmente se produjo un mapa en donde se combinaron las zonas amenazadas por la inundación con los índices de vulnerabilidad social para obtener como producto final un mapa de vulnerabilidad a las inundaciones. Conociendo las incertidumbres que se manejaron se plantearon dos escenarios más de aumento del nivel del mar (+30 cm y +90 cm) y dos nuevas proyecciones de población para estudiar los índices sociales.

#### **II - 4.2.9 Costa Norte de Australia, Queensland**

McInnes *et al* (2003), en el estudio sobre el impacto del Cambio Climático en los niveles extremos debido a las mareas meteorológicas en Cairns (en la costa Norte de Queensland, Australia), plantearon un método en donde se combinaron un modelo

estadístico para estudiar el comportamiento de los ciclones y modelos determinísticos de la costa oceánica.

El rango de las posibles características que puedan adoptar los ciclones de la región fue tomado de series históricas de observación. Con un modelo climático regional se evaluó el posible cambio respecto de la climatología presente de ciclones debido a un aumento del efecto invernadero.

Con el objetivo de realizar centenares de simulaciones, se utilizó el método de Monte Carlo para obtener un conjunto de parámetros característicos de los ciclones, tanto del presente como del futuro. De los resultados de las simulaciones hidrodinámicas se obtuvo un registro sintético de niveles extremos que fueron analizados para calcular sus períodos de retorno. Para las simulaciones, respecto de la situación presente se consideraron cambios en la intensidad de los ciclones y sin hacerlo en la frecuencia, y el aumento del nivel medio del mar adoptado fue el valor medio de 20 cm para el año 2050.

El modelo hidrodinámico utilizado fue el GCOM2D, un modelo integrado en la vertical desarrollado para simular velocidades de corrientes y niveles de la superficie de agua en plataformas continentales. Este modelo resuelve las ecuaciones de la fluidodinámica en una grilla equiespaciada y es forzado por campos de vientos y de presión atmosférica que actúan sobre la superficie del mar, niveles del mar en los bordes laterales debido a las mareas y a las condiciones atmosféricas y la fricción en el fondo del océano. Este modelo permite un borde costero movable, estableciendo momentos de inundación y secado. Las simulaciones se realizaron en dos dominios, uno de 1600 m de grilla y otro anidado, de 200 m de grilla.

#### **II - 4.2.10 Mar Báltico, Suecia**

En el estudio de Meier *et al.* (2004) referido a simulaciones del nivel del mar del futuro y del pasado en el Mar Báltico, se utilizó como herramienta un modelo regional climático - oceánico. El modelo RCO (Rossby Centre Ocean), un modelo regional que acopla hielo y océano, fue aplicado para calcular los escenarios de nivel del mar. El dominio del modelo cubre todo el Mar Báltico con condiciones de borde abiertas en el Norte, forzado con campos de vientos cada 6 horas y descargas mensuales de los ríos adoptadas de la versión completa del modelo con el acoplamiento atmósfera - hielo - océano (RCOA). El modelo RCOA es un modelo regional climático del Norte de Europa, que incluye parte del Atlántico Norte y del Mar Báltico. Los escenarios regionales difieren dependiendo del GCM (Modelo de Circulación General) utilizado en los bordes del dominio, y dependiendo de los escenarios de emisión. Para esto se utilizaron dos GCMs: HadAM3H (la versión atmosférica del HadCM3 del Hadley Centre) y ECHAM4/OPYC3 (del Max Planck Institute for Meteorology, Alemania). Las

simulaciones de control corresponden al período 1961-1990 y los escenarios climáticos futuros (A2 y B2) representan el clima del período 2071-2100.

### ***II - 4.3 Síntesis metodológica***

Las primeras publicaciones sobre estudios sistemáticos de los impactos del Cambio Climático en zonas costeras datan del año 1997. Desde ese momento hasta la actualidad se observan, dependiendo de los objetivos del trabajo, procedimientos metodológicos cada vez más complejos.

En cuanto al planteo de los escenarios futuros, en la mayoría de los casos la principal variable de cambio resultó ser el nivel medio del mar (adoptando aumentos respetando las tendencias presentes o referidos a los cambios a escala global), destacándose en menor medida otras como variaciones en los parámetros climáticos (campos de vientos o temperatura de la superficie del mar). Todos los planteos a futuro correspondieron a años anteriores al 2100, sin existir coincidencias en los años elegidos. La información climática, en la mayoría de los trabajos, fue tomada de diferentes Modelos de Circulación General (GCM), tanto para el presente como para el futuro. La forma de abordar el análisis de los niveles de agua en la línea de costa tuvo dos opciones: a partir de información obtenida en estaciones de observación (series largas) o como resultados de simulaciones numéricas de la hidrodinámica costera. Algunos de los trabajos, con la información de niveles costeros y el apoyo de un Sistema de Información Geográfica, produjeron mapas de inundación para la zona en cuestión.

Respecto del presente trabajo, la metodología utilizada es coincidente con algunas de las etapas de los estudios presentados (las variables que cambian en el futuro son el nivel medio del mar y los parámetros climáticos, y los niveles costeros futuros son calculados a partir de la modelación hidrodinámica del sistema). Muchas de las diferencias obedecen a las características propias del problema tratado.

En la tabla II-1 se presenta un resumen de los objetivos, resultados y métodos de los antecedentes analizados.

Tabla II-1 Resumen de antecedentes

Estudio	Objetivo	Resultados	Metodología
<i>Climate change vulnerability and response strategies for the coastal zone of Poland.</i> Zeidler, 1997.	Estudiar las posibles estrategias de respuesta y adaptación al aumento del nivel medio del mar debido al Cambio Climático.	Zonas de impacto por debajo de los 2.5 m.s.n.m (superficie de pérdida de terreno por inundación y población vulnerable). Probabilidades de inundación (comparación).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escenarios: aumento del nivel medio del mar (2030 +10 cm y +30 cm, y 2100 +30 cm y +100 cm) y cambios en el clima de vientos.</li> <li>• Cálculo de la distribución de valores extremos de niveles observados (tres estaciones).</li> <li>• Cálculo de la superficie de inundación utilizando el soporte GIS (Sistema de Información Geográfica), para los distintos escenarios.</li> <li>• Asignación de una probabilidad de inundación a las áreas calculadas.</li> </ul>
<i>Sea-level rise impact on coastal areas of Estonia.</i> Kont, Ratas y Puurmann, 1997.	Evaluar la vulnerabilidad y la adaptación al aumento del nivel medio del mar.	Mapas de la costa (con y sin tormenta). Mapas de inundación (escenario futuro).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escenarios: Aumento del nivel medio del mar (+30 y +100 cm, 2075) y levantamiento isostático.</li> <li>• Mapeo de la costa de la situación presente (con y sin tormenta)</li> <li>• Cálculo del retroceso de la línea de costa para el escenario elegido.</li> </ul>
<i>Impact of Climate Change on Coastal New South Wales.</i> McInnes, Walsh, Whetton, y Pittock, 1998.	Evaluación de los aspectos atmosféricos del Cambio Climático y sus impactos costeros.	Comparación de niveles costeros ante una situación de cambio en la temperatura de la superficie del mar.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escenarios: Aumento de la temperatura de la superficie del mar de 3 °C.</li> <li>• Simulación de tres eventos de tormenta con un modelo hidrodinámico de la plataforma continental forzado con datos de un modelo climático regional.</li> </ul>
<i>Coastal Impacts of Climate Change and Sea-Level Rise on Prince Edward Island.</i> Shaw, 2001.	Análisis de las posibles medidas de adaptación debido al acelerado aumento del nivel medio del mar en la región.	Impactos socioeconómicos (inundaciones y pérdida de terrenos costeros). Mapas de inundación. Comparación de estrategias de adaptación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escenarios: aumento del nivel medio del mar y subsidencia, 2100 (+70 cm y +110 cm).</li> <li>• Calibración y validación de un modelo que pronostica ondas de tormenta para un evento del año 2000.</li> <li>• Análisis de sensibilidad de niveles alcanzados por la marea meteorológica, variando cada uno de los forzantes en el modelo numérico (Método PMS, Probable Maximum Storm).</li> <li>• Cálculo de probabilidades de excedencia para distintos puntos de la costa (Método de la Probabilidad Condicional).</li> </ul>
<i>Regionalization of Climate change for the North Sea and Baltic Sea.</i> Schrum, 2001.	Estudiar la influencia de los cambios en los vientos forzantes del sistema.	Análisis de sensibilidad del sistema hidrodinámico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementación del modelo hidrodinámico 3D del sistema (HamSOM).</li> <li>• Simulaciones con vientos crecientes del Oeste.</li> </ul>

<p><i>Effects of a specific climate change scenario on the hydrography and transport of conservative substances in the Weser Estuary.</i> Grabemann, Grabemann, Hebers, y Müller, 2001</p>	<p>Investigar la sensibilidad de las propiedades hidrológicas, socioeconómicas y ecológicas del estuario y su zona de adyacencia con respecto al Cambio Climático.</p>	<p>Niveles y parámetros de calidad de agua en toda la longitud del estuario.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escenario: Aumento del nivel medio de mar en 55 cm, aumento del rango de amplitud de marea de 30 cm y cambios en los tributarios del estuario.</li> <li>• Implementación de un modelo numérico de calidad y transporte de agua unidimensional.</li> <li>• Simulaciones del presente y del escenario futuro.</li> </ul>
<p><i>Impacts of sea level rise in the New York City metropolitan area.</i> Gornitz, Couch y Hartig, 2002.</p>	<p>Estudio de los impactos del Cambio Climático y su interacción con la creciente urbanización y los cambios en los usos del suelo de la región.</p>	<p>Rangos de aumento del nivel del mar. Cambios en las probabilidades de ocurrencia de eventos de igual magnitud. Mapas de inundación. Tasas de erosión de playas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escenarios: 2020, 2050 y 2080.</li> <li>• Extrapolación de tendencias actuales de aumento del nivel medio del mar.</li> <li>• Obtención de datos climáticos de los escenarios futuros de un conjunto de Modelos Globales de Circulación.</li> <li>• Utilización de un modelo hidrodinámico (WIFM) para calcular niveles de inundación en toda la costa.</li> <li>• Cálculo de las probabilidades de ocurrencia de determinados niveles para los tres escenarios.</li> </ul>
<p><i>Vulnerability of coastal communities to sea-level rise: a case study of Cape May County, New Jersey, USA.</i> Wu, Yarnal y Fisher, 2002</p>	<p>Analizar el cambio de la distribución del riesgo ante el cambio en el clima de la región.</p>	<p>Índice de vulnerabilidad social. Mapas de vulnerabilidad a las inundaciones.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escenarios: aumento del nivel medio del mar (+30 cm, +60 cm y +90 cm) y tres proyecciones de población, 2100.</li> <li>• Estimaciones de niveles para los distintos escenarios (modelo SLOSH) e identificación de áreas inundables (GIS).</li> <li>• Cálculo de un índice de vulnerabilidad social y combinación con el mapa de inundaciones para obtener un mapa de vulnerabilidad a las inundaciones.</li> </ul>
<p><i>Impact of Sea-level Rise and Storm Surges on a Coastal Community.</i> McInnes, Walsh, Hubbert y Beer, 2003.</p>	<p>Estudio sobre el impacto del Cambio Climático en los niveles extremos debido a las mareas meteorológicas.</p>	<p>Ciclones típicos presentes y futuros. Estadísticas de niveles extremos en la costa.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escenario: Aumento del nivel medio del mar (50 cm, 2050).</li> <li>• Estudios de las características históricas de los ciclones y eventos de tormentas de la región y análisis de los cambios en las características de los ciclones para el escenario futuro con un modelo climático regional.</li> <li>• Obtención de un conjunto característico de ciclones para el presente y el futuro a partir del método de Monte Carlo.</li> <li>• Simulación hidrodinámica para el escenario presente y futuro, y obtención de un registro sintético de niveles extremos que fueron analizados para calcular sus períodos de retorno.</li> </ul>
<p><i>Simulated sea level in past and future climates of the Baltic Sea.</i> Meier, Broman y Kjellström, 2004.</p>	<p>Simular el nivel medio del mar del futuro y del pasado en el Mar Báltico.</p>	<p>Niveles del Mar Báltico.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escenarios climáticos futuros del IPCC: A2 y B2</li> <li>• Implementación de un modelo regional climático-oceánico (RCO).</li> <li>• Simulaciones del futuro (2071-2100) y del pasado (1961-1990).</li> </ul>

## Capítulo III Forzantes del sistema

### III - 1 Introducción

La onda de marea que ingresa desde el océano, la descarga de los tributarios que penetra en la cabecera del río y los vientos que actúan sobre toda la superficie del agua son los forzantes principales de la dinámica del Río de la Plata (Figura III-1). La oscilación astronómica mareal produce variaciones en características físicas tales como la salinidad, la profundidad de la haloclina y la mezcla vertical a una escala horaria; los vientos influyen en las variaciones de la altura del agua y la salinidad a escala diaria; el caudal fluvial varía a escala mensual e interanual (Wells y Daborn, 1997).



Figura III-1 Forzantes del Río de la Plata

### III - 2 Marea

La onda oceánica que llega al Río de la Plata tiene un régimen de desigualdades diurnas, presentando entonces grandes diferencias entre pleamares o bajamares consecutivas. Debido a las características semidiurnas de este régimen, en el Río de la Plata se da el caso de que se produzcan simultáneamente una pleamar y una bajamar y dos pleamares y una bajamar o viceversa (Balay, 1961). La componente de mareas  $M_2$  representa más del 65% de la energía presente en la marea (D'Onofrio *et al.*, 1999). La  $M_2$  (componente lunar principal semidiurna)

pertenece al conjunto de las ondas componentes de la marea que tienen períodos cercanos a las 12 horas. La singularidad del Río de la Plata se basa en su régimen astronómico micromareal, con pocas decenas de centímetros de amplitud, y en la alta relevancia de las componentes meteorológicas. Este particular comportamiento del Río de la Plata puede explicarse por la proximidad de dos puntos anfidrómicos en la región del Atlántico Sur. Las ondas de marea oceánicas llegan al Río de la Plata con una velocidad aproximada de 200 km/h y se propagan en su interior con una velocidad media de 30 km/h, demorando aproximadamente 12 horas en recorrerlo. Los factores que se oponen a su desarrollo son el desagüe fluvial y las acciones combinadas de la fricción, la pendiente y la forma del río (Balay, 1961).

### **III - 3 Tributarios**

La Cuenca del Río de la Plata es una de las más importantes del planeta, debido a su extensión y a su ubicación geográfica, localizándose en cinco países distintos: Brasil, Paraguay, Bolivia, Argentina y Uruguay (García y Vargas, 1998).

La tendencia, tanto de los caudales como de las precipitaciones, en la Cuenca del Plata en los últimos años muestra signos positivos. García y Vargas (1998) detectaron que en las series de caudales, entre 1970 y 1972, ha habido un cambio importante en la tendencia y que los saltos que se observan en las series de caudales anuales consisten en un cambio abrupto en las variables climáticas que afectan temporalmente los promedios de algunas variables durante un cierto periodo de tiempo.

Más del 97% del ingreso de agua al Río de la Plata es aportado por los ríos Paraná y Uruguay. Una cantidad importante de ríos menores y arroyos aportan sus aguas a lo largo de ambos márgenes del río. Entre ellos se destaca la descarga del río Santa Lucía, relativamente cercana a Montevideo, despreciable con respecto a la totalidad del sistema, aunque es un importante factor local para las costas uruguayas. El río Paraná llega al Río de la Plata principalmente por dos de sus brazos, el Paraná de las Palmas, con alrededor del 25% del caudal total, y el Paraná Guazú - Bravo, con el 75% restante (Bombardelli *et al.*, 1994). El caudal medio del Río de la Plata es del orden de los 23000 m<sup>3</sup>/s (Jaime y Menéndez, 2002).

El río Paraná presenta una marcada estacionalidad, alcanzando valores pico, durante las crecidas extraordinarias, que superan los 50000 m<sup>3</sup>/s. En el período húmedo 1971 - 2001 el caudal medio de este río fue de 18500 m<sup>3</sup>/s, lo que representa un 15% más respecto de la media histórica (1931 - 2001) según Jaime y Menéndez (2002). La transición del río Paraná al Río de la Plata, se da a través de un amplio delta, cuya

extensión es de unos 320 km, presentando un ancho muy variable, alcanzando alrededor de 100 km sobre el frente de desembocadura.

El río Uruguay se distingue por tener mayor variabilidad del ciclo estacional, con valores máximos altos tanto en otoño (abril - mayo) como en primavera (octubre). El valor medio de la distribución de caudales medios mensuales alcanza los 4688 m<sup>3</sup>/s, siendo muy frecuentes descargas que oscilan entre los 1000 y 2000 m<sup>3</sup>/s como lo indican Jaime y Menéndez (2002).

### **III - 4 Circulación Atmosférica**

La forma, la extensión y el régimen micromareal determinan que los procesos atmosféricos, especialmente el régimen de vientos, tengan una importancia fundamental en la dinámica del río. El viento actúa sobre la superficie del agua variando los niveles, la velocidad de propagación de la onda de marea y la mezcla en la vertical. El Río de la Plata está situado bajo la influencia del anticiclón del Atlántico Sur. Por lo tanto, los patrones climáticos dependen principalmente de la posición de esta característica importante de circulación. Entonces, los vientos del Norte y del Noreste prevalecen durante todo el año. En invierno, el desplazamiento hacia el Norte de un intenso frente de presión subtropical provoca un incremento de la frecuencia de los vientos del Oeste, mientras que en verano se presentan flujos del Este y del Sudeste (Wells y Daborn, 1997).

La Sudestada es un fenómeno que se localiza en la región del Río de la Plata y su Frente Marítimo y está caracterizado por vientos persistentes, regulares a fuertes del sector Sudeste. Debido a la orientación del eje del Río de la Plata, cuando se da este tipo de campos de vientos, el nivel de agua aumenta. Con el efecto de Coriolis, esta situación tiene sus impactos mayores en la costa argentina inundando las zonas más bajas. Este escenario puede ocurrir con ausencia de precipitaciones.

Existen diferentes patrones de la circulación atmosférica baja que causan las Sudestadas (el 60% de ellos están asociados con una circulación anticiclónica centrada al Sur del Río de la Plata). La mayoría de las Sudestadas están básicamente asociadas con una alta presión al Sur del Río de la Plata y una muy profunda baja presión en el Norte que provocan vientos del sector Sudeste. Estos campos de circulación atmosférica baja, forzantes de las Sudestadas, son considerados anómalos con respecto a las condiciones medias de la región (Escobar *et al.*, 2004).

Las Sudestadas pueden ocurrir en cualquier estación del año, pero con menos frecuencia en invierno. Sin embargo, aquellas que ocurren en invierno tienen un intenso y considerado desarrollo del sistema de baja presión en el Noreste de la Argentina o Uruguay característico de las ciclogénesis, y en promedio los picos

alcanzados por el río son mayores. La variabilidad interdecadal de la frecuencia de Sudestadas no muestra tendencias entre 1950 y 1970, después de este último crece positivamente (Escobar *et al.*, 2004).

### III - 5 Nivel medio

El Río de la Plata está experimentando un incremento de su nivel medio (Figura III-2), mayormente motorizado por el aumento del nivel medio del mar. El aumento total fue de alrededor de 17 cm para el siglo XX (D'Onofrio *et al.*, 2003), de los cuales aproximadamente el 50% se produjo en las últimas 3 décadas.

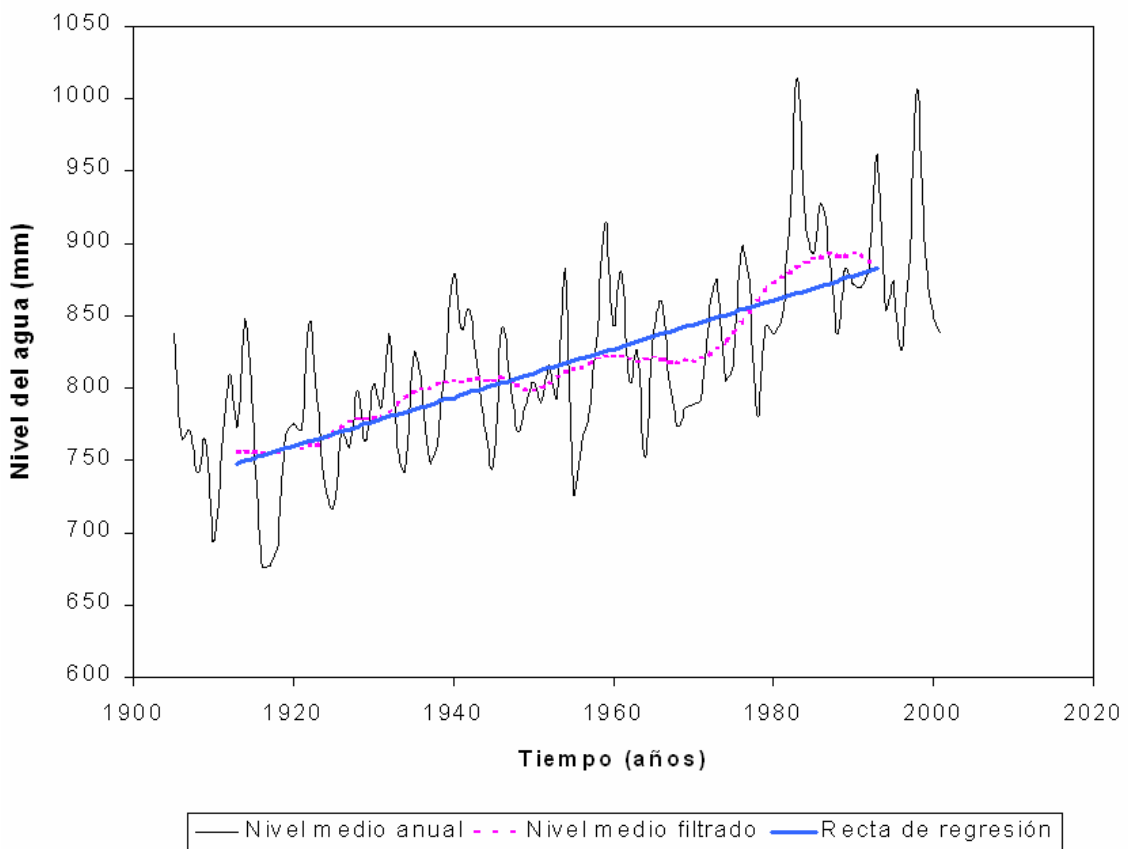
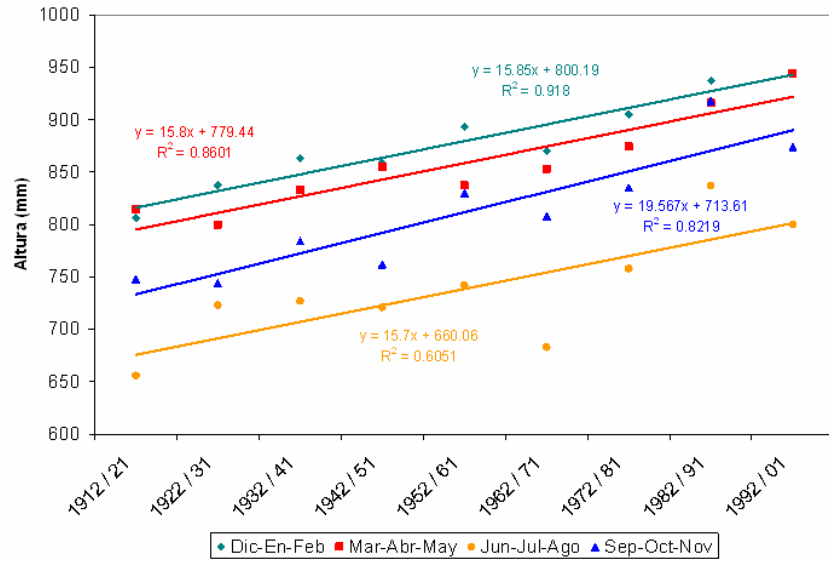
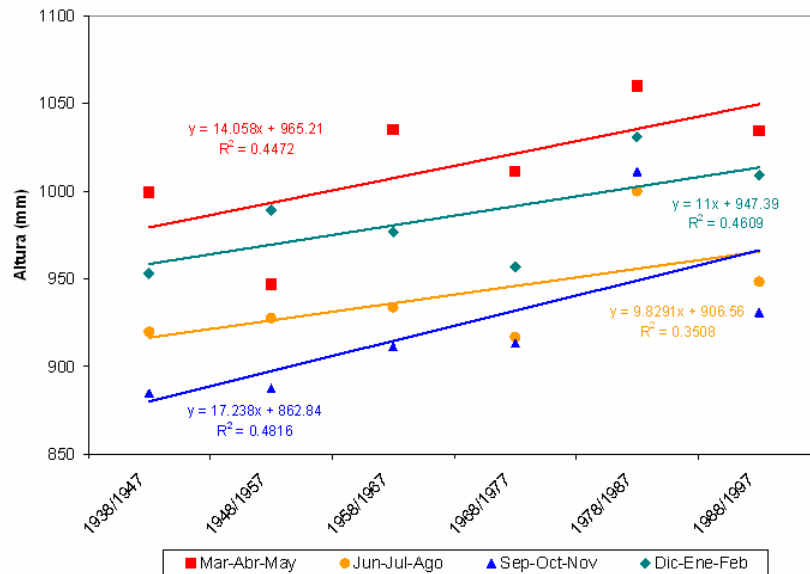


Figura III-2 Niveles medios anuales en el Puerto de Buenos Aires (D'Onofrio *et al.*, 2003)

En cuanto al componente estacional del nivel medio, en la variación interdecadal se observan diferencias en los registros de Buenos Aires (1912 - 2001) y Montevideo (1936 - 1997), como lo muestran las figuras III-3a y III-3b, aunque en ambos casos durante el verano y el otoño existen mayores niveles que en el invierno y la primavera, en Buenos Aires se observan niveles medios mayores en verano y Montevideo en otoño (D'Onofrio *et al.*, 2003). Durante las estaciones de transición, por inercia, el nivel medio mantiene características similares de la estación anterior. En todos los casos la tendencia es positiva.



a. Puerto de Buenos Aires



b. Puerto de Montevideo

Figura III-3 Niveles medios estacionales (D' Onofrio *et al.*, 2003)

El mayor nivel del agua en el Río de la Plata registrado en el Puerto de Buenos Aires fue de 3.90 m por sobre el nivel medio del mar, el 15 de abril de 1940. Teniendo en cuenta la serie de niveles máximos anuales observados en Buenos Aires desde 1950, de los 10 picos más importantes, 7 ocurrieron desde 1970, cuatro desde 1990 y dos en los últimos 5 años (Tabla III-1).

Tabla III-1 Máximos niveles registrados

Fecha	Nivel (m.s.n.m)
12/Nov/1989	3.50
7/Feb/1993	3.39
27/Jul/1958	3.25
14/Abr/1959	3.19
16/May/2000	3.03
28/Sep/1983	2.99
20/Oct/2002	2.97
29/Jun/1999	2.84
10/Oct/1967	2.79
4/Oct/1971	2.76

## Capítulo IV Modelación hidrodinámica

---

### IV - 1 Antecedentes de modelación en el Río de la Plata

Existen varios antecedentes relativamente recientes que ofrecen una caracterización física del Río de la Plata, incluyendo la plataforma continental (Framiñán *et al.*, 1999, Campos *et al.*, 1999, Piola *et al.*, 2000 y Menéndez, 2001). De todos modos, la única forma de disponer de una representación operativa de la hidrodinámica consiste en recurrir a la modelación numérica de los fenómenos.

Hay una larga experiencia en el desarrollo y aplicación de modelos numéricos hidrodinámicos al Río de la Plata tratado como un cuerpo de aguas poco profundas, para el cual es suficiente una descripción bidimensional en el plano horizontal. Aunque hubo intentos iniciales en la década de 1970, el primer desarrollo sistemático de un modelo hidrodinámico fue presentado en 1986 (Molinari, 1986), que utilizó el software HIDROBID II (Menéndez, 1985 y 1990). Mejoras y aplicaciones de este modelo siguieron en tesis sucesivas (Albarracín, 1987 y Olalde, 1988). Un segundo desarrollo pionero fue llevado adelante unos pocos años después en el IMFIA (Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental) de la Universidad de la República, Uruguay (Gurga *et al.* 1991), luego mejorado por Kaplan (1998), quien implementó una versión para procesamiento en paralelo. Desde entonces, muchos otros modelos del río, y también de la plataforma continental argentina incluyendo al Frente Marítimo, han sido desarrollados (Glorioso, 2002, Palma y Sitz, 2003 y Simionato *et al.*, 2004a y 2004b). Algunos de estos desarrollos se muestran en la figura IV-1.

Una nueva aplicación fue desarrollada utilizando el software HIDROBID II, denominada RIO DE LA PLATA 2000 (RP2000), presentando una gran resolución espacial (malla de 1000 m de lado) y cuidadosamente calibrado (Jaime y Menéndez, 1999). El dominio de este modelo es el Río de la Plata completo, desde su cabecera (Frente del Delta del río Paraná) hasta la línea imaginaria San Clemente - Punta del Este. Debido a que uno de los objetivos del modelo a utilizar en el presente estudio es poder simular la generación de ondas de tormenta, un modelo del tipo del RP2000 no resulta adecuado por no incluir la zona de desarrollo de las mismas. Se implementó entonces el modelo RPP-2D, cuyo dominio incluye gran parte del Frente Marítimo. Una aplicación posterior a este desarrollo es el modelo RPP-3D (Kind, 2004), que tiene como objetivo estudiar la interfase entre las masas de agua dulce y salada del Río de la Plata, utilizándose un modelo matemático tridimensional, basado en el software de dominio público POM (Princeton Ocean Model).

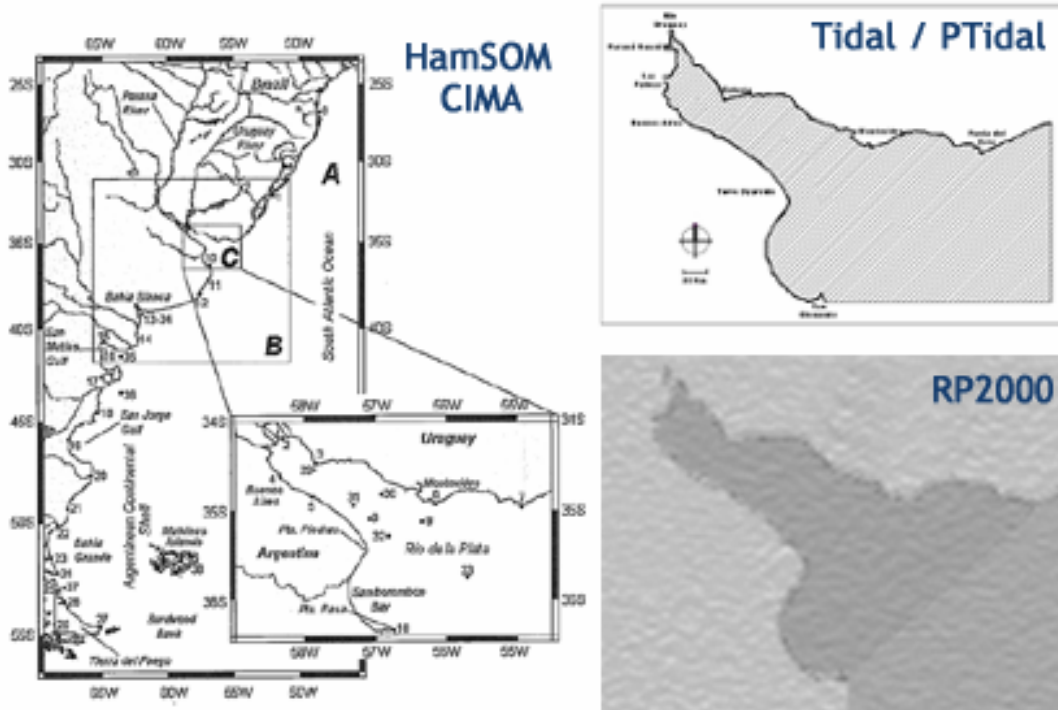


Figura IV-1 Dominios de modelos del Río de la Plata (Kaplan, 1998, Jaime y Menéndez, 1999 y Simionato *et al.*, 2004a).

## IV - 2 Implementación del modelo

### IV - 2.1 Software HIDROBID II

El software HIDROBID II (Menéndez, 1985 y 1990) es el utilizado para la implementación del modelo hidrodinámico del Río de la Plata y su Frente Marítimo RPP-2D. Este software simula numéricamente flujos cuasi - bidimensionales (en el plano horizontal) a superficie libre. Está basado en la resolución numérica de las ecuaciones para aguas poco profundas (*shallow water equations*). Las bajas profundidades de la zona a modelar, en relación con la longitud de onda de la onda de marea, justifican la utilización de este software (Whitham, 1974 y Menéndez y Norscini, 1982). Obviamente, dado su carácter barotrópico, el software no puede representar la estratificación vertical debido al efecto de la salinidad.

El modelo teórico considera como fuerzas motrices a la gravedad, a la aceleración de Coriolis (fuerza de inercia debida a la rotación de la Tierra) y a las tensiones superficiales debidas a la acción del viento. Por otro lado, tiene en cuenta la resistencia al movimiento proveniente de la generación de turbulencia en el fondo (históricamente denominada "fricción"). Supone que la forma del fondo es arbitraria, pero sin variación en el tiempo (fondo fijo) y sin cambios bruscos. Sin embargo, es

capaz de asimilar cambios bruscos de profundidad a través de tratamientos especiales (Menéndez, 1987). Considera que la pendiente del fondo es pequeña. La hipótesis de flujo cuasi - bidimensional significa que el movimiento es esencialmente bidireccional y la velocidad es prácticamente uniforme a lo largo de la dirección vertical y que, en consecuencia, la aceleración vertical es despreciable frente a la de la gravedad, resultando entonces una distribución hidrostática de presiones.

Las ecuaciones para aguas poco profundas provienen del filtrado sobre el ensamble estadístico de las ecuaciones de Navier - Stokes (ecuaciones de Reynolds), seguido de la integración vertical y de la aplicación de las hipótesis simplificativas del modelo teórico, resultando (Abbott 1979):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f_g v + g \frac{\partial(h + z_0)}{\partial x} + \frac{\tau_{fx}}{\rho h} - \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) = 0 \quad \text{Ec. IV-1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f_g u + g \frac{\partial(h + z_0)}{\partial y} + \frac{\tau_{fy}}{\rho h} - \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial x}(hT_{yy}) = 0$$

donde  $x$  e  $y$  son las coordenadas espaciales,  $t$  es el tiempo,  $h$  la altura de la superficie libre,  $z_0$  un nivel de referencia,  $u$  y  $v$  las velocidades medias verticales en esas direcciones, respectivamente,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $\rho$  la densidad,  $f_g$  el parámetro de Coriolis,  $\tau_{sx}$  y  $\tau_{sy}$  las componentes de la tensión de corte sobre la superficie del agua debida al viento,  $\tau_{fx}$  y  $\tau_{fy}$  las componentes de la tensión de corte sobre el fondo y  $T$  el tensor de las tensiones efectivas.

El esquema numérico de resolución de estas ecuaciones utilizado en el software HIDROBID II se basa en el método de las diferencias finitas. La malla de discretización es del tipo alternada (las dos componentes de la velocidad y el nivel de agua están todos centrados en nodos diferentes) y el método es del tipo implícito de direcciones alternadas (Menéndez, 1990).

#### IV - 2.2 Dominio de cálculo

El dominio de cálculo del modelo RPP-2D, mostrado en la Figura IV-2, está delimitado por contornos físicos y matemáticos. Los contornos físicos son las costas uruguaya y argentina. Los contornos matemáticos se desarrollan sobre el Frente Marítimo: los paralelos 35° 48' S al Norte y 40° 30' S al Sur y el meridiano 51° 30' W al Oeste. El Frente del Delta del Paraná es considerado también como un contorno físico, con la excepción de las desembocaduras de los ríos Paraná de las Palmas, Paraná Guazú - Bravo y Uruguay, que constituyen contornos matemáticos.



Figura IV-2 Dominio de cálculo del modelo RPP-2D <sup>1</sup>.

El dominio de este modelo incluye una parte considerable del Frente Marítimo del Río de la Plata, dado que es necesario abarcar la zona de generación de las ondas de tormenta que luego penetran a través de la boca del río.

### IV - 2.3 Batimetría

El Servicio de Hidrografía Naval de la Argentina (SHN) proveyó información batimétrica (Dragani, 2002) consistente en un conjunto de 2473 puntos dentro de un dominio delimitado por los paralelos 36° 09' S y 40° 03' S y los meridianos 50° 25' W y 59° 28' W. La información consta de las coordenadas de estos puntos en el plano horizontal según el sistema de Gauss - Krügger (referenciadas para el Meridiano 57 y la Faja 6, según el sistema utilizado por el Instituto Geográfico Militar de Argentina) y las profundidades expresadas en metros respecto del plano de reducción. Este conjunto de puntos se muestra en la Figura IV-3. Se observa una gran cantidad de datos sobre la costa, una densidad muy alta de puntos en los alrededores del área costera de Mar del Plata y una densidad muy baja en el Río de la Plata Superior.

<sup>1</sup> Dado que la zona en cuestión se repite, se evitará indicar las coordenadas en los mapas siguientes

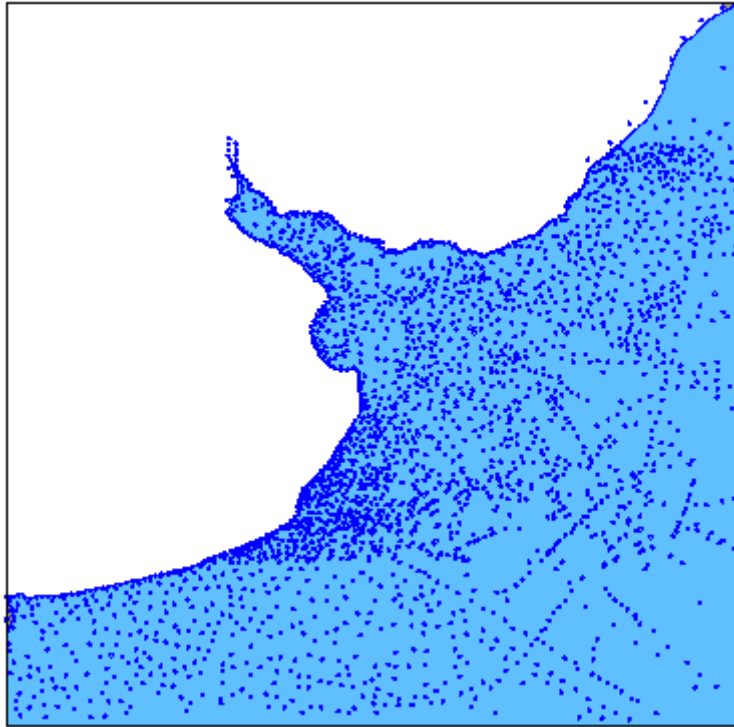


Figura IV-3 Puntos batimétricos (SHN)

Para mejorar la información de base correspondiente al Río de la Plata se recurrió en primer lugar a la base de datos generada en el INA en ocasión de la implementación del modelo RP2000, construida a partir de las cartas náuticas del SHN. En esa oportunidad se digitalizaron 22582 puntos de las curvas de nivel mostradas en las cartas H118 (Río de la Plata Superior), H117 (Río de la Plata Medio) y H113 (Río de la Plata Exterior), con posicionamiento también referido al sistema de coordenadas ortogonales de Gauss-Krügger. Esta base de datos, cuyos puntos se muestran en la Figura IV-4, tiene como límite Este a la línea  $X = 6741915$  y como límite Sur a la línea  $Y = 5967621$ . Los dos conjuntos de datos batimétricos (SHN e INA) fueron, entonces, combinados para la presente aplicación, eliminando de la base de datos del SHN todos los puntos con coordenadas X e Y menores simultáneamente a  $6741915$  y  $5967621$  (que se identifica como batimetría SHN "filtrada") y agregando la base completa construida por el INA. La batimetría final consta de un total de 24551 puntos, de los cuales 1969 pertenecen a la información provista por el SHN. Esta batimetría, que se utilizó para los primeros ensayos, se denominó "SHN + INA".

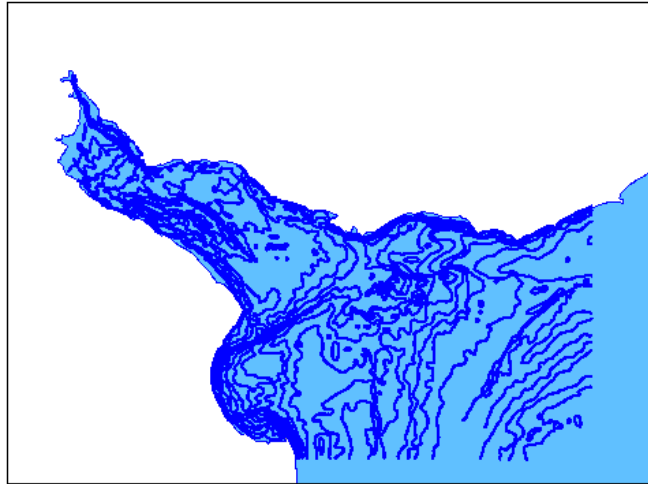


Figura IV-4 Puntos batimétricos (INA)

Una segunda base de datos fue aportada por el SHN consistente en datos de profundidades digitalizados del plano batimétrico del Río de la Plata publicado en un estudio realizado en 1989 para la Comisión Administradora del Río de la Plata (CARP) y de las cartas náuticas H-113 y H-116 del SHN. Se trata de una información similar, pero algo más precisa, que la utilizada por el modelo RP2000 para el Río de la Plata. El conjunto de puntos se presenta en la Figura IV-5. Con ella se repitió un ejercicio similar de reemplazo de datos en la base original del SHN, generándose la nueva batimetría denominada "SHN + CARP", que ha sido la utilizada en los ensayos definitivos.

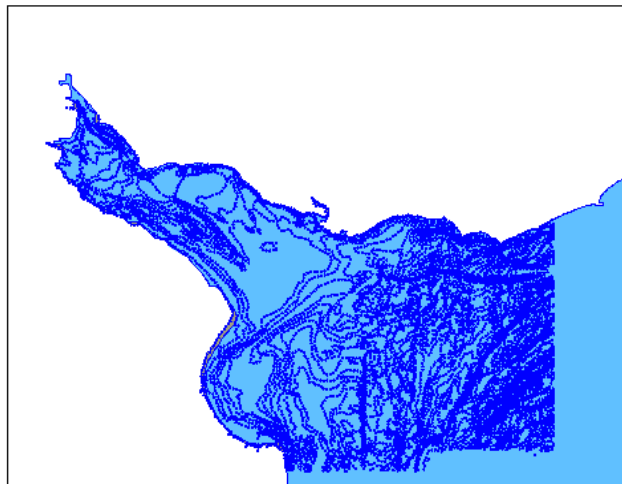


Figura IV-5 Puntos batimétricos (CARP)

#### ***IV - 2.4 Modelo digital del terreno***

Se adoptó una malla de discretización espacial rectangular, con celdas de 2500 m de lado ( $\Delta x = \Delta y$ ), sobre un sistema de coordenadas orientado según las direcciones cardinales. De esta manera resultó una grilla de 382 celdas en la dirección

Este - Oeste y 408 celdas en la dirección Norte - Sur, de las cuales alrededor del 55% caen sobre el continente, de modo que no intervienen directamente en el cálculo.

A partir de la base de datos batimétricos se asignaron valores de profundidad a cada una de las celdas de la malla mediante un proceso de interpolación con la técnica de *kriging* (método geoestadístico), construyéndose así el modelo numérico del terreno, que se muestra en la Figura IV-6.

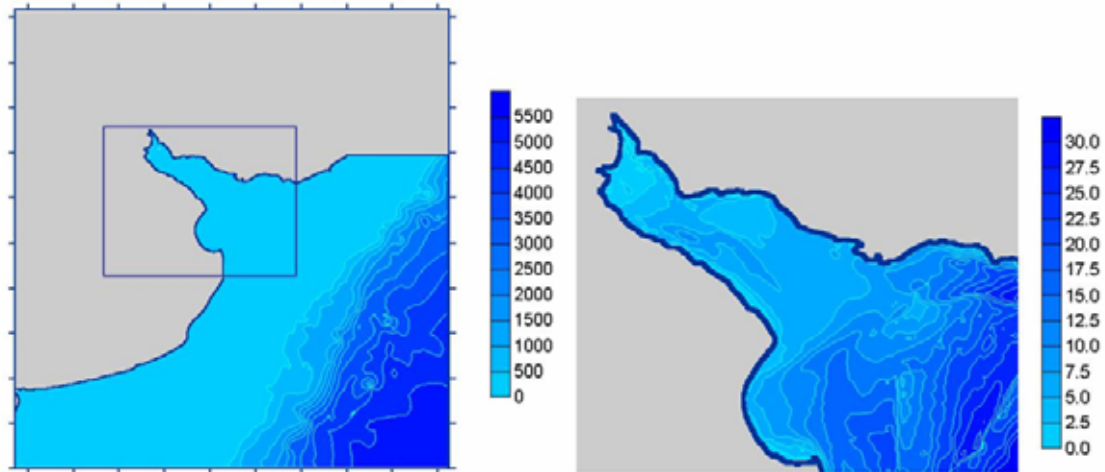


Figura IV-6 Datos batimétricos utilizados en el modelo RPP-2D.

Es importante remarcar que las profundidades así generadas están referidas al plano de reducción local, cuya distancia a la superficie del geoides es variable. Por lo tanto, la superficie de referencia de las profundidades no es una equipotencial. Esto es una limitación que no fue corregida por falta de información suficiente, esperándose que los resultados del modelo no estén fuertemente afectados por ella.

## IV - 2.5 Condiciones de borde

### IV - 2.5.1 Consideraciones generales

Las condiciones de borde en este modelo se imponen en los puntos de ingreso de los tributarios y en los bordes oceánicos, y en el caso de los datos de vientos en cada una de las celdas del dominio. Al igual que en el modelo RP2000 (Jaime y Menéndez, 1999) el forzante de caudales corresponde a tres contornos abiertos que corresponden al río Uruguay y al río Paraná en sus dos ingresos: Paraná Guazú y Paraná de las Palmas. El modelo RPP-2D tiene tres bordes oceánicos que constituyen contornos matemáticos: Sur, Este y Norte. La representación de estos bordes se observa en la figura IV-7. A través del borde oceánico Sur se hace ingresar la onda de marea astronómica. El borde oceánico Este fue considerado como un contorno impenetrable, en base al argumento de que la energía de onda que lo atraviesa es muy baja en relación con la que se propaga a lo largo de la plataforma continental.

Finalmente, el borde oceánico Norte fue tratado como un contorno no reflejante, permite la salida de las ondas que inciden sobre él sin reflejar información. El campo de vientos es interpolado en forma bilineal a partir de la base de datos de NCEP/NCAR (Kalnay et al. 1996).

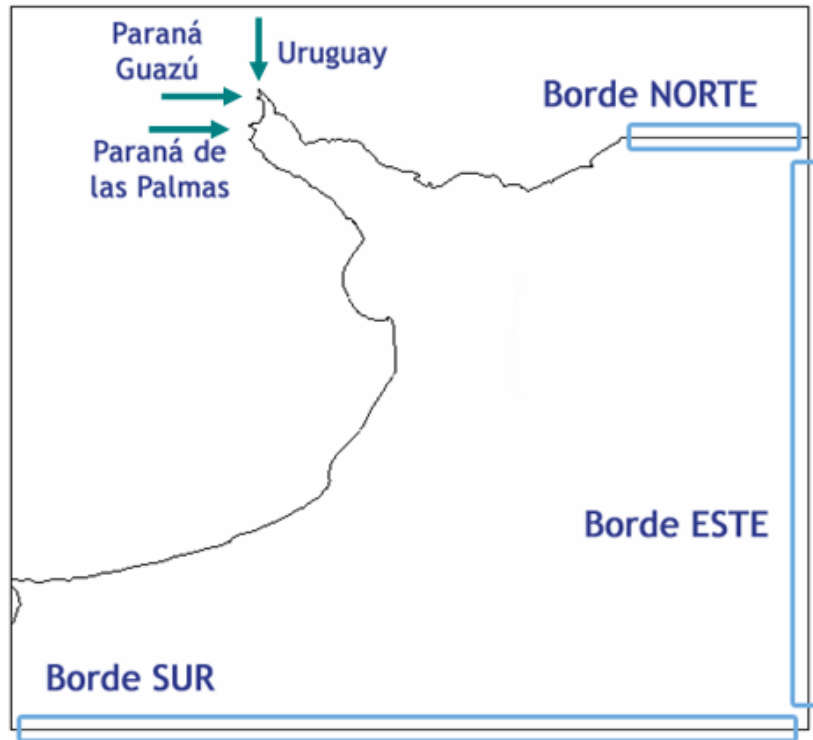


Figura IV-7 Bordes del modelo RPP-2D.

El efecto de la rugosidad del fondo es significativo sólo en el interior del Río de la Plata, donde las profundidades son bajas, perdiendo importancia ya en la zona exterior del río y, con mayor razón, en el Frente Marítimo. La calibración del modelo RP2000 (Jaime y Menéndez, 1999), que sólo incluye el Río de la Plata, se logró con un valor uniforme, 0.015, del coeficiente de rugosidad de Manning. En consecuencia, este fue el adoptado para toda el área de extensión del modelo RPP-2D. Ensayos de sensibilidad efectuados con este modelo mostraron que, efectivamente, los resultados no varían significativamente al cambiar el valor de rugosidad en la zona exterior.

#### IV - 2.5.2 Onda de Marea

La onda de marea astronómica es impuesta como condición de borde en el contorno Sur del modelo, a la altura de la Bahía de San Blas, en base al conocimiento existente de que en esta región la onda efectivamente se propaga de Sur a Norte.

Para su generación a tiempo pasado se dispuso de los datos de las Tablas de Mareas del SHN en la Estación San Blas, representativa de la onda sobre la costa. Un análisis detallado de la onda de marea astronómica en esta estación mostró

diferencias significativas en el régimen diurno en relación con las estaciones ubicadas más al norte (Mar del Plata y San Clemente). Como el objetivo del modelo es obtener mareas representativas en la zona adyacente al Río de la Plata, se optó por generar la onda en el vértice Sudoeste del dominio del modelo a partir de la de Mar del Plata, debidamente atrasada y amplificadas. Las magnitudes del atraso y la amplificación se obtuvieron mediante experimentación con el modelo, como se explica luego.

Dado el carácter de onda de Kelvin de la onda de marea ingresante por el borde Sur, se aplicó un decaimiento exponencial de la amplitud en dirección al Este. El valor del factor de decaimiento fue expresado respetando los resultados del modelo global de mareas RSC94 (Cartwright y Ray, 1990) desde el exterior de la plataforma continental hacia el Este (el carácter global de estos modelos hace que las estimaciones en las regiones cercanas a las costas no sean buenas), y las amplitudes expresadas en las Tablas de Mareas en la Estación San Blas (estación costera más cercana al vértice Sudoeste del dominio del modelo). Se especificó que la dirección de propagación de la onda es de  $45^\circ$  con respecto al borde. A pesar de lo aparentemente esquemático de esta aproximación, se verificó que al estar la energía de onda fuertemente concentrada en las cercanías de la costa, los resultados no dependen significativamente de esa esquematización ya que la onda se adapta rápidamente a las condiciones locales, perdiendo la "memoria" del detalle de las condiciones de borde, una respuesta típica de los sistemas donde hay un proceso importante de difusión.

#### **IV - 2.5.3 Tributarios**

La descarga de cada uno de los tres tributarios considerados (Paraná de las Palmas, Paraná Guazú - Bravo y Uruguay) se impone como una condición de borde en la cara de la celda respectiva que representa su punto de entrada.

Puede considerarse una descarga constante en el tiempo, si el interés es el de representar condiciones medias, o bien ingresarse el detalle de los hidrogramas de descarga (a escala diaria), si se desea analizar efectos de eventos hidrológicos.

En el informe original del modelo RP2000 (Jaime y Menéndez, 1999) se muestra que no es necesario incluir en la especificación de la descarga de los tributarios el efecto de modulación causado por la onda de marea.

#### **IV - 2.5.4 Campos de vientos**

Los campos de vientos actuantes sobre la superficie del agua fueron generados a partir de los reanálisis de NCEP/NCAR (Kalnay et al. 1996). Estos tienen una resolución de  $1,9048^\circ$  de latitud y  $1,875^\circ$  de longitud, en esta región aproximadamente 240 km por 180 km (Figura IV-8). El intervalo temporal entre archivos

NCEP/NCAR es de 360 minutos (6 horas), estando proporcionados para las horas 0:00, 6:00, 12:00 y 18:00 de cada día (GMT, Greenwich Mean Time). La base de datos se corresponde con una grilla T62 Gaussiana con 192 x 94 puntos ubicados dentro de las latitudes 88° 32' N – 88° 32' S y 0° 0' E – 358° 08' E. Los datos son de libre disponibilidad y fueron tomados del sitio web: <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.html>.

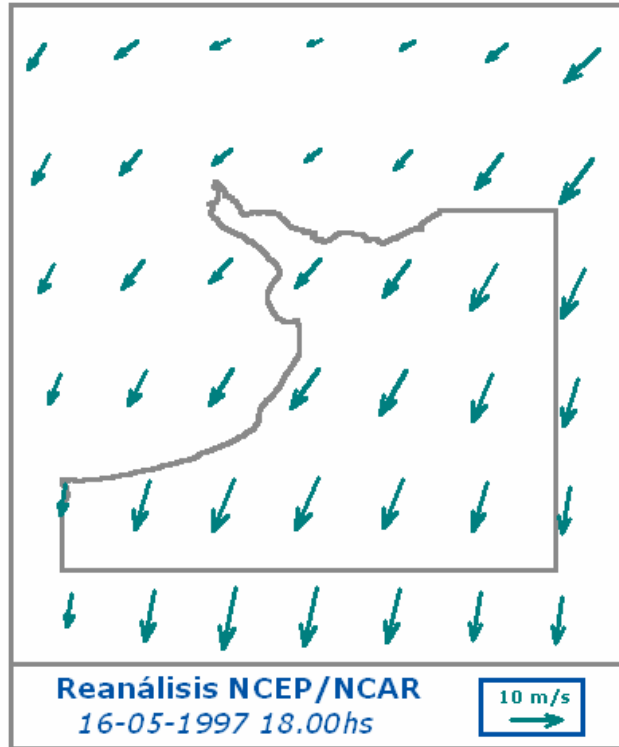


Figura IV-8 Campos de viento de NCEP/NCAR.

En consecuencia, los datos de intensidades fueron interpolados bilinealmente en el espacio para obtener el campo de viento instantáneo asociado a cada celda del modelo. Esta interpolación requirió la utilización de 42 puntos con datos (20 dentro del dominio y 22 por fuera del mismo) para llevarlos a los 156856 nodos del dominio del presente modelo. También se efectúa una interpolación lineal en el tiempo para instantes intermedios.

Dado que los campos de vientos de NCEP/NCAR subestiman las intensidades de los vientos observados, siguiendo la experiencia de Simionato *et al.* (2002), éstas fueron incrementadas en un factor de la forma  $1 + \exp[-(W/X)]^m$ , donde  $W$  es el módulo de la velocidad del viento,  $X$  un valor de velocidad y  $m$  un exponente de referencia. La utilización de un factor de este tipo busca duplicar los valores de las intensidades muy bajas de vientos y mantener inalteradas las intensidades mayores.

#### IV - 2.6 Paso de cálculo

El software HIDROBID II está basado en un esquema implícito de diferencias finitas, por lo que no tiene limitaciones serias en cuanto al valor del paso temporal de cálculo para evitar problemas de estabilidad numérica. En consecuencia, la elección de ese paso sólo está condicionada por criterios de precisión de los resultados.

Dado que el fenómeno de escala más rápida del presente problema son las ondas superficiales, que se desplazan (sobre el flujo, mucho más lento) con la celeridad de Lagrange ( $c = (gh)^{1/2}$ ), el paso temporal de cálculo  $\Delta t$  debería ser elegido de forma tal de representar adecuadamente el desplazamiento de esas ondas sobre la extensión de una celda de la malla de cálculo. Entonces puede imponerse la siguiente condición sobre el paso temporal:

$$\Delta t \approx \frac{\Delta x}{c_{\max}}$$

Ec. IV-2

donde  $c_{\max}$  es la máxima celeridad que se pretende resolver adecuadamente. Ahora bien, como la energía de onda está concentrada básicamente en la plataforma continental, se ha considerado a la celeridad de las ondas en esa zona como limitante (la profundidad oceánica es significativamente mayor). La celeridad máxima en la plataforma, según lo muestra la figura IV-9, es de alrededor de 30 m/s, con lo que resulta  $\Delta t \leq 80$  seg. Se utilizó un paso de 60 segundos.

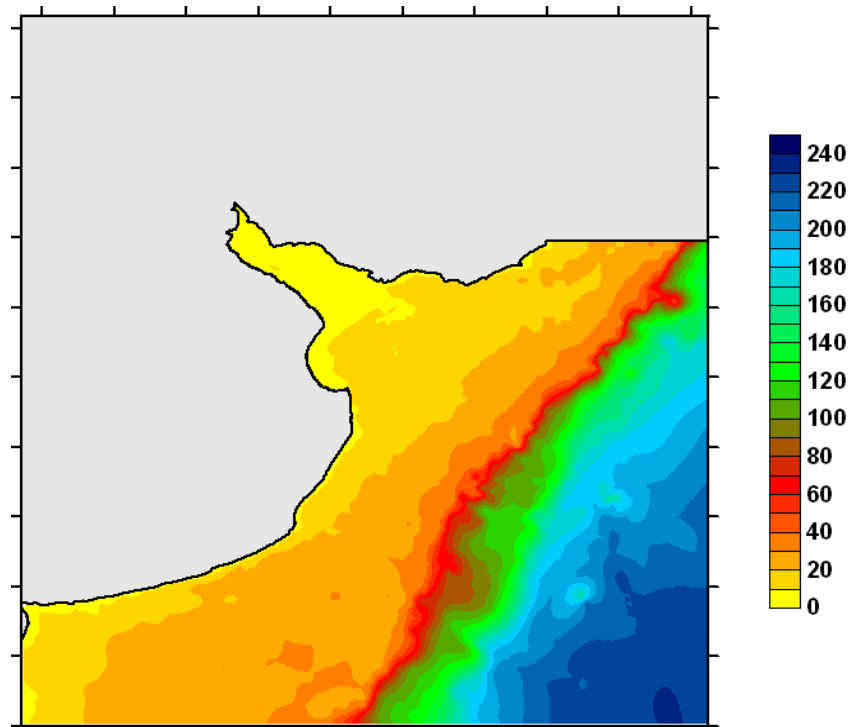


Figura IV-9 Celeridad (m/s).

## IV - 3 Calibración del modelo

### IV - 3.1 Introducción

La calibración del modelo hidrodinámico RPP-2D se desarrolló en varias etapas en base al criterio de discriminar efectos, permitiendo así una validación y ajuste progresivo. Se definieron cuatro etapas: i) Escenario de marea astronómica predicha. ii) Nivel medio estacional para condiciones actuales. iii) Curva de frecuencia de niveles en Buenos Aires. iv) Simulación de grandes ondas de tormenta.

### IV - 3.2 Escenario de marea astronómica predicha

En una primera etapa se trabajó con un escenario de marea astronómica pura, siendo el objetivo reproducir las ondas predichas en las Tablas de Mareas del SHN y del SOHMA (Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada, República Oriental del Uruguay), obtenidas a partir del clásico análisis armónico de los registros, para todas las estaciones de monitoreo interiores al dominio de cálculo. Se utilizó la Tabla de Mareas del SHN para construir la onda de marea astronómica en el vértice Sudoeste del dominio del modelo para el período que se extiende entre el 27 de enero y el 28 de febrero de 1997. Se ajustó la condición de contorno en el borde Sur, estableciéndose los criterios para corregir la amplitud y fase de la onda de marea de la estación Mar del Plata, de modo de representar la variación del nivel de agua en la costa, y el ángulo de ingreso y el parámetro de decaimiento exponencial hacia el Este, de manera de resultar compatible con la onda de marea del modelo global. Como descarga desde los tributarios, se utilizaron valores constantes e iguales a la media anual de cada uno de ellos.

La aplicación de un filtro pasa bajos a los datos provistos por las Tablas de Mareas permitió distinguir una oscilación de baja frecuencia (período del orden de 14 días) en casi todas las estaciones, y de amplitud variable de una a otra estación (Figura IV-10). Dicha oscilación no fue considerada para la modelación, procediéndose a su eliminación.

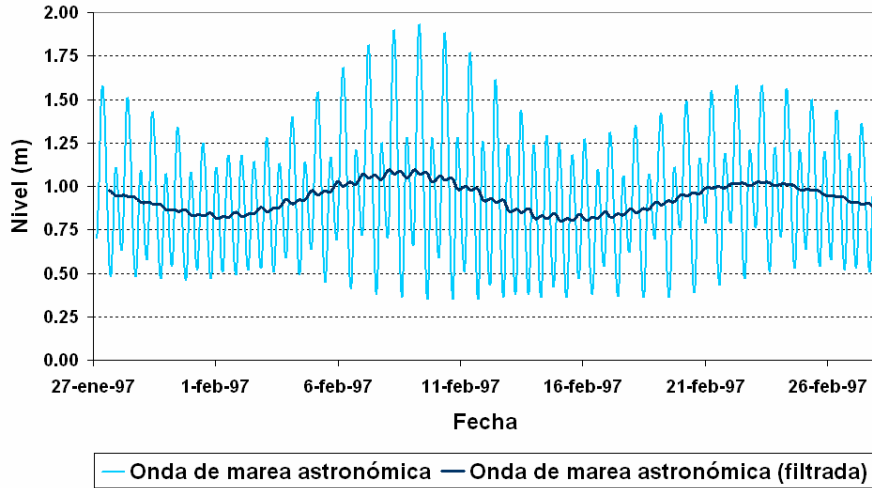
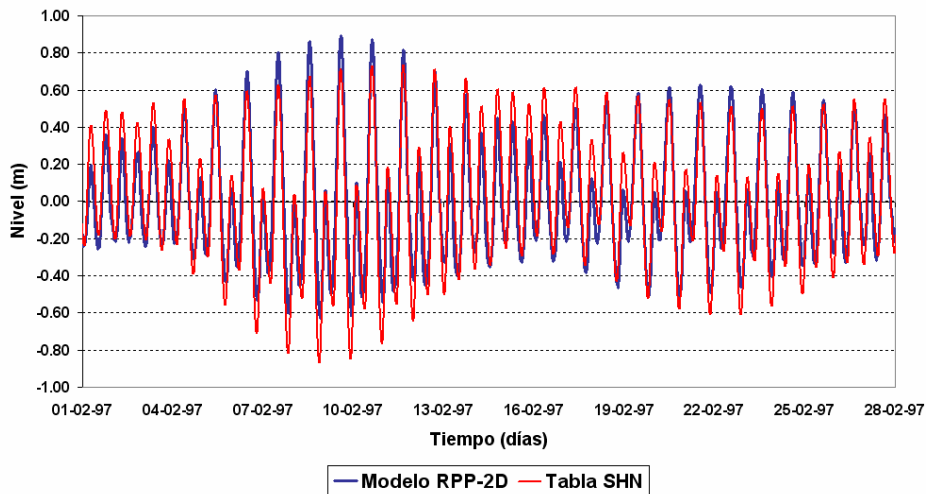
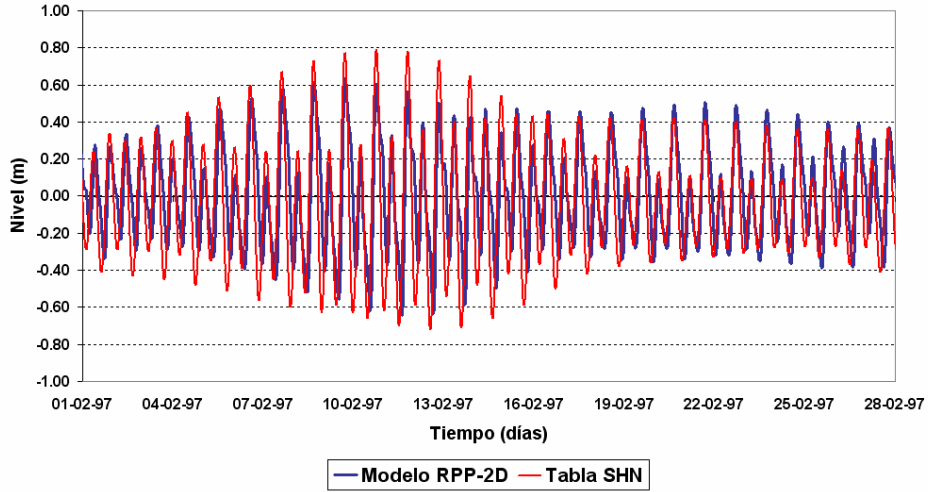


Figura IV-10 Filtro Mar del Plata

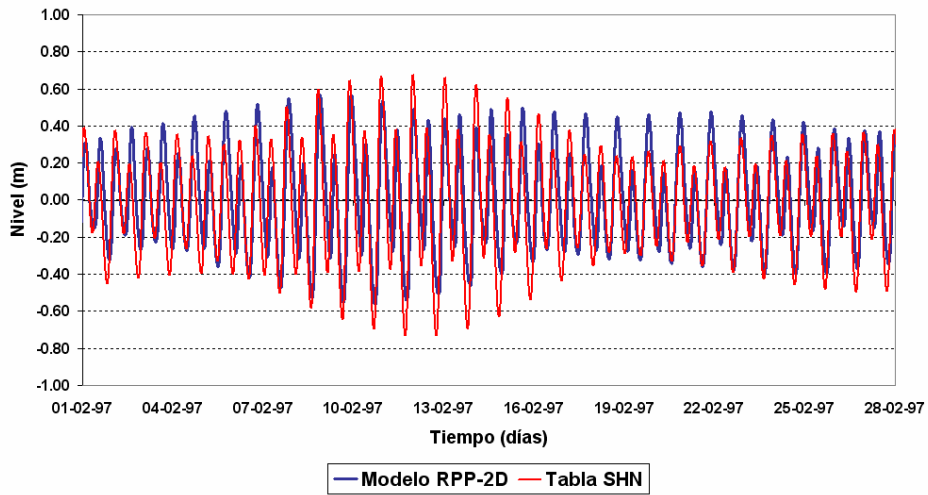
En las figuras IV-11.a a IV-11.k se muestra, a título ilustrativo, el acuerdo satisfactorio alcanzado entre la predicción, de las Tablas de Mareas del SHN y el SOHMA, y la simulación con el modelo en varias estaciones. Se observa un acuerdo general satisfactorio en cuanto a fase y orden de magnitud de la oscilación. Las mayores diferencias se observan en la zona exterior de la costa uruguaya (La Paloma y Punta del Este), donde la oscilación es relativamente débil y, por lo tanto, pueden tornarse significativos otros aportes energéticos adicionales a la onda proveniente del Sur.



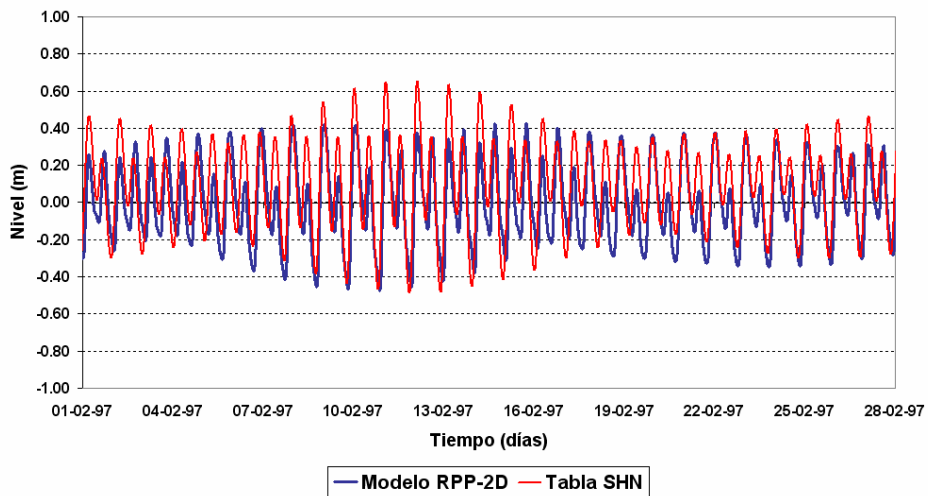
a. Mar del Plata



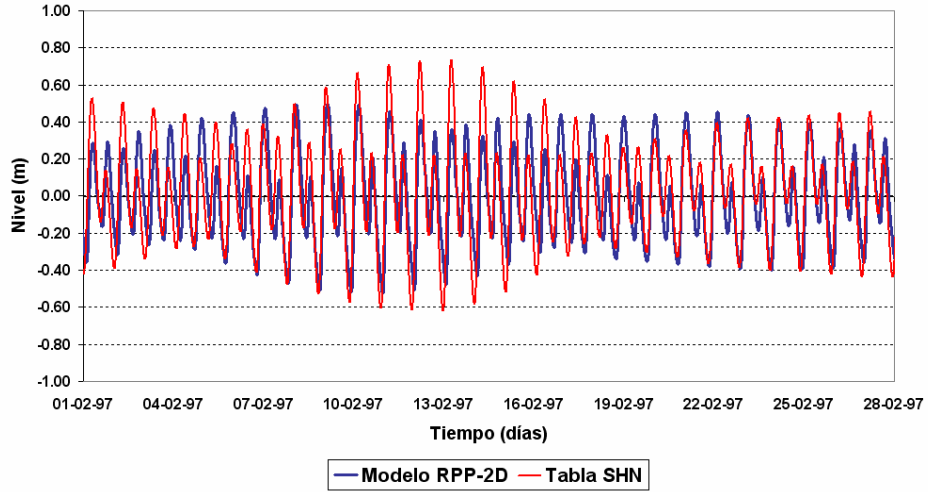
b. San Clemente



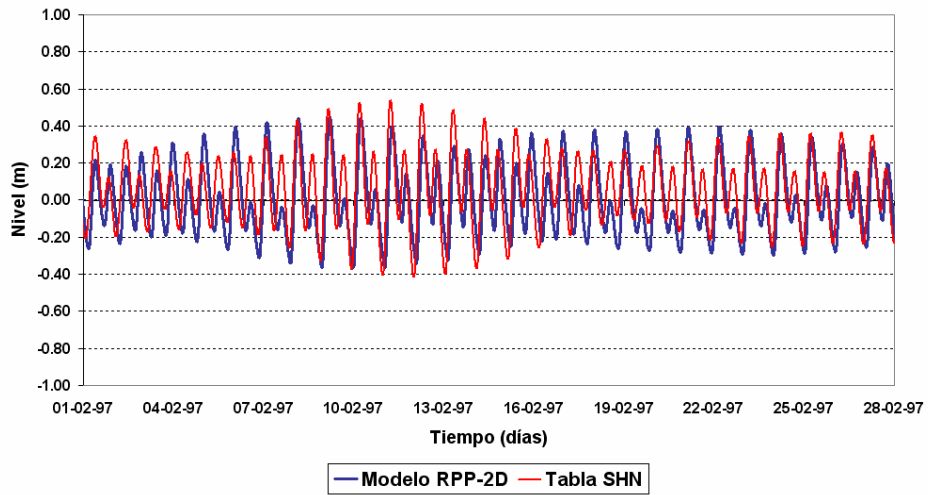
c. Torre Oyarvide



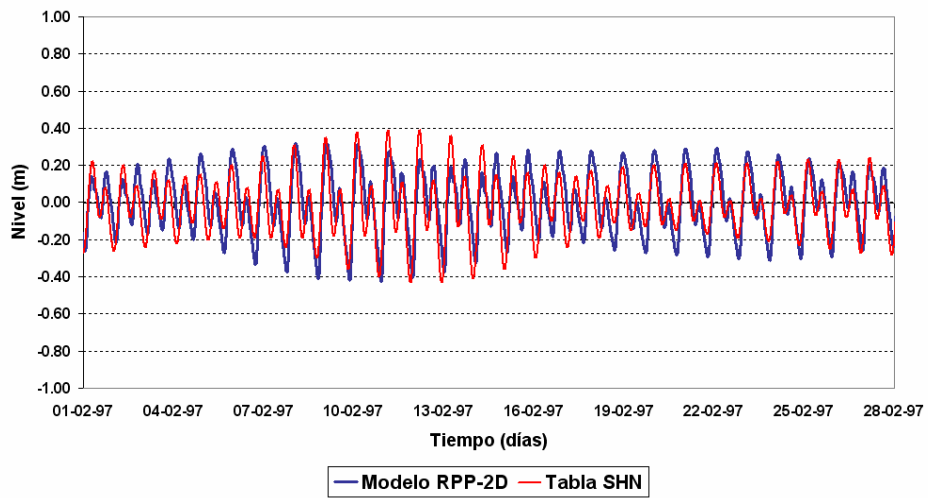
d. La Plata



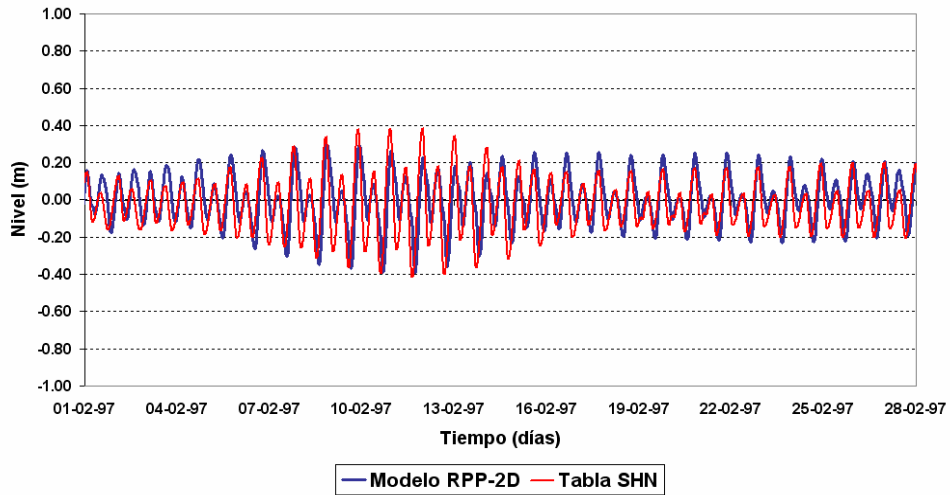
f. Buenos Aires



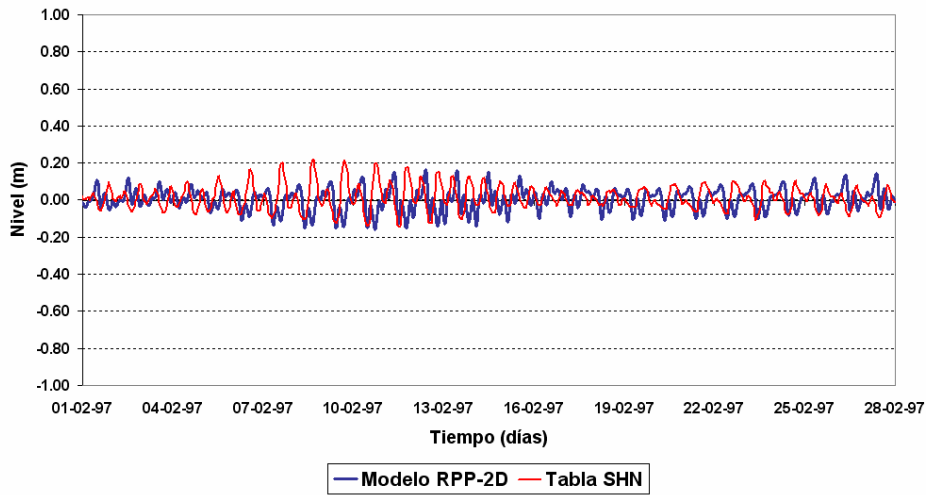
g. Martín García



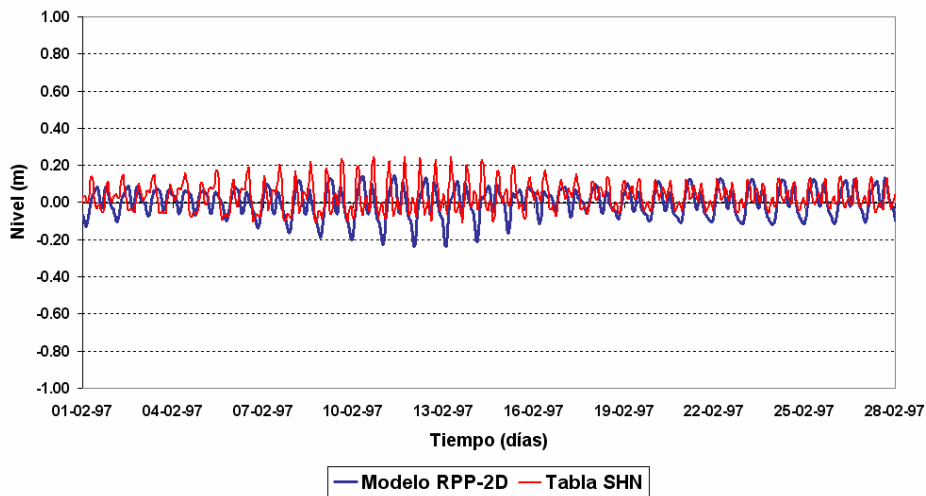
h. Colonia



i. Montevideo



j. Punta del Este



k. La Paloma

Figura IV-11 Comparación entre las ondas de marea predichas y simuladas

### IV - 3.3 Nivel medio estacional para condiciones actuales

Otra etapa de la calibración apuntó a simular las condiciones de nivel medio mensual para las condiciones actuales. La década que se extiende entre 1990 y 1999 fue tomada como representativa del escenario actual (Presente). Adicionalmente, se efectuó un análisis para determinar el año particular que mejor representara las características hidrológicas de la década, de modo de utilizarlo como base. Para ello se utilizaron estadísticas correspondientes a las observaciones en Buenos Aires.

En la figura IV-12 se presentan los niveles medios anuales y el nivel medio de la década; se observa que los años 1992, 1997 y 1999 tienen prácticamente el mismo valor medio que el de la década. Por otro lado, la figura IV-13 muestra la curva de distribución de niveles para el año 1997 comparada con la de la década, que constituyó el mejor acuerdo, de modo que este fue seleccionado como el año representativo. Entonces, se tomaron como base de comparación los niveles medios mensuales para el año 1997 observados en Buenos Aires, cuyo cero de escala está bien nivelado.

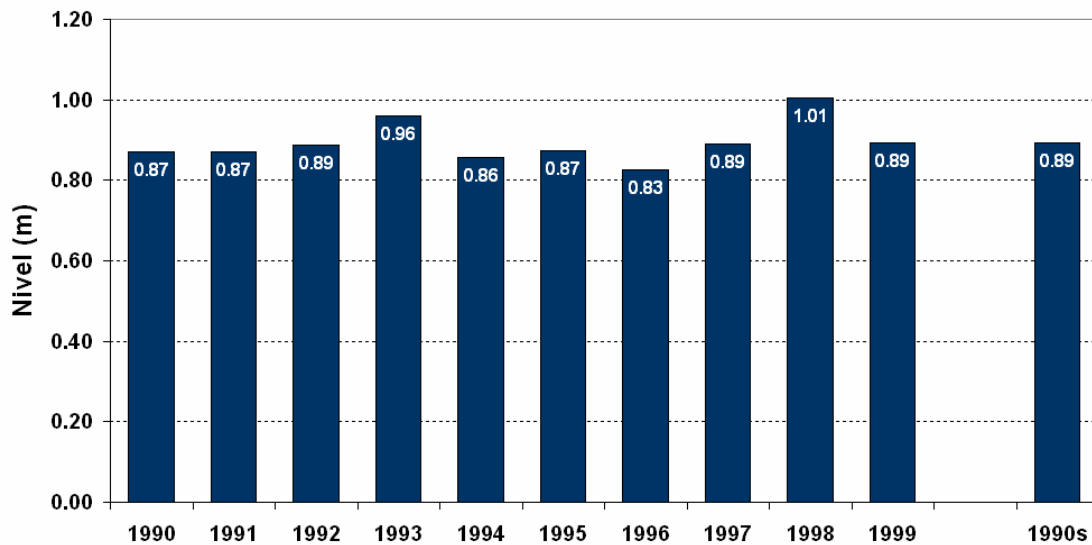


Figura IV-12 Niveles medios en Buenos Aires

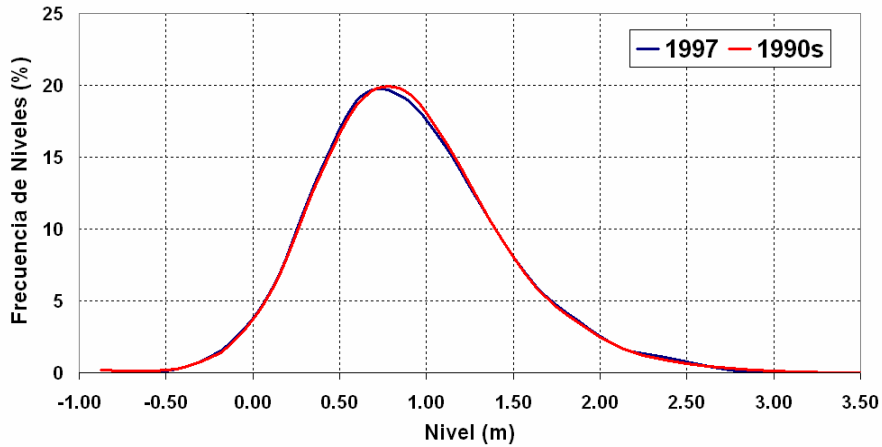


Figura IV-13 Comparación entre las frecuencias de niveles en Buenos Aires del año 1997 y de la década de 1990

El ajuste se efectuó sobre el nivel medio del mar en el borde Sur (el único borde donde se impone un nivel medio) y el coeficiente de arrastre  $C_D$  que parametriza a la tensión de corte sobre la superficie debida al viento

$$\tau_{sx} = C_D |W| W_x$$

$$\tau_{sy} = C_D |W| W_y$$

Ec. IV-1

Existe una amplia gama de posibilidades de determinación de la expresión del coeficiente de arrastre  $C_D$  en función de la velocidad del viento. En los trabajos de Van Dorn (1953), Safaie (1984), Konishi y Tsuji (1995), Hoyme y Zielki (2001) y Suursaar *et al.* (2002) se utilizan distintas formulaciones que se muestran en la figura IV-14. Durante el período de calibración se trabajó con estas formulaciones y con distintos valores constantes de  $C_D$ , obteniéndose los mejores resultados con la opción planteada por Van Dorn (1953).

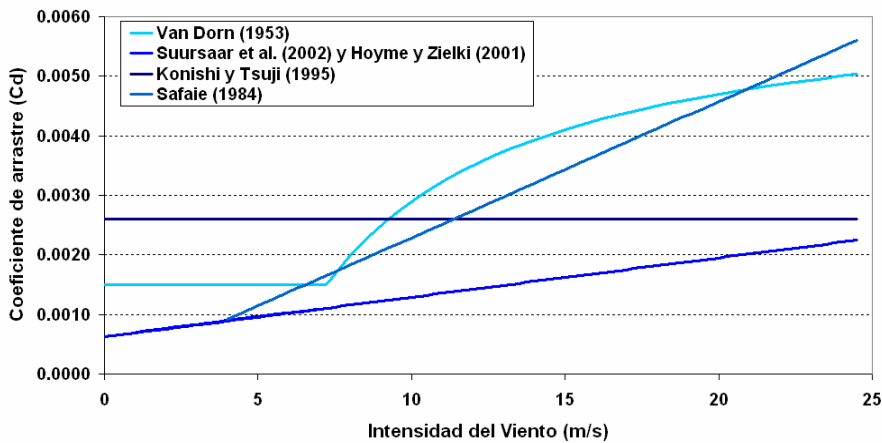


Figura IV-14 Valores de coeficiente de arrastre  $C_D$  en función de la velocidad del viento.

En cuanto al valor del nivel medio del mar, impuesto en el borde Sur del modelo RPP-2D, se seleccionó el valor 0,77 m respecto del plano de referencia.

Se trabajó con valores medios diarios de vientos, obtenidos como promedio de los cuatro valores diarios provistos por NCEP/NCAR, con lo que se logró una importante mejora en los resultados respecto de utilizar la variación diaria. De esta manera se obtuvo el acuerdo mostrado en la figura IV-15. Se observa que el nivel medio anual puede ser calculado con total precisión, mientras que los niveles medios estacionales reproducen la misma tendencia que los observados, con una diferencia máxima de alrededor de 10 cm (para el verano). Esto pone de manifiesto lo adecuado de la utilización de los campos de vientos de NCEP/NCAR para la representación de las condiciones medias estacionales, a pesar de su relativamente baja resolución.

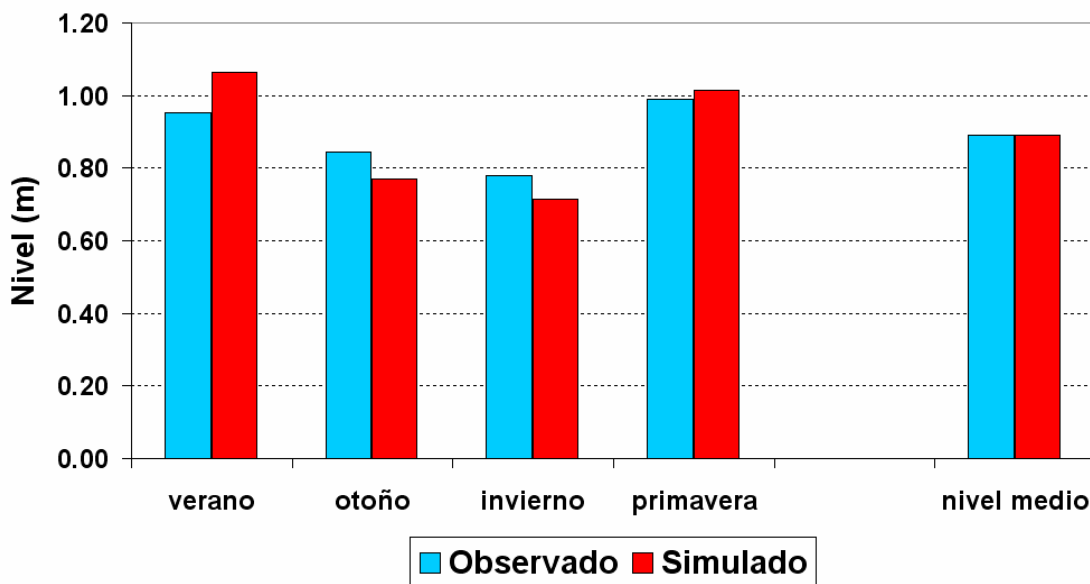


Figura IV-15 Comparación entre niveles medios anual y estacional para 1997 en Buenos Aires obtenidos de mediciones y simulados con el modelo RPP-2D

#### IV - 3.4 Curva de frecuencia de niveles de agua en Buenos Aires

En una tercera etapa se fijó como objetivo simular la curva de frecuencia de niveles de agua en la ciudad de Buenos Aires, tomando nuevamente como base el año 1997. En este caso se ajustaron los coeficientes  $X$  y  $m$  del factor de corrección de los vientos provistos por NCEP/NCAR (pág. 47), seleccionándose los valores  $X = 54$  km/h y  $m = 1$ , con los cuales se obtuvo el nivel de acuerdo mostrado en la figura IV-16 (el intervalo de clase es de 10 cm), considerado satisfactorio. Esto indica que los campos de vientos de NCEP/NCAR también son adecuados para la representación de la estadística de niveles.

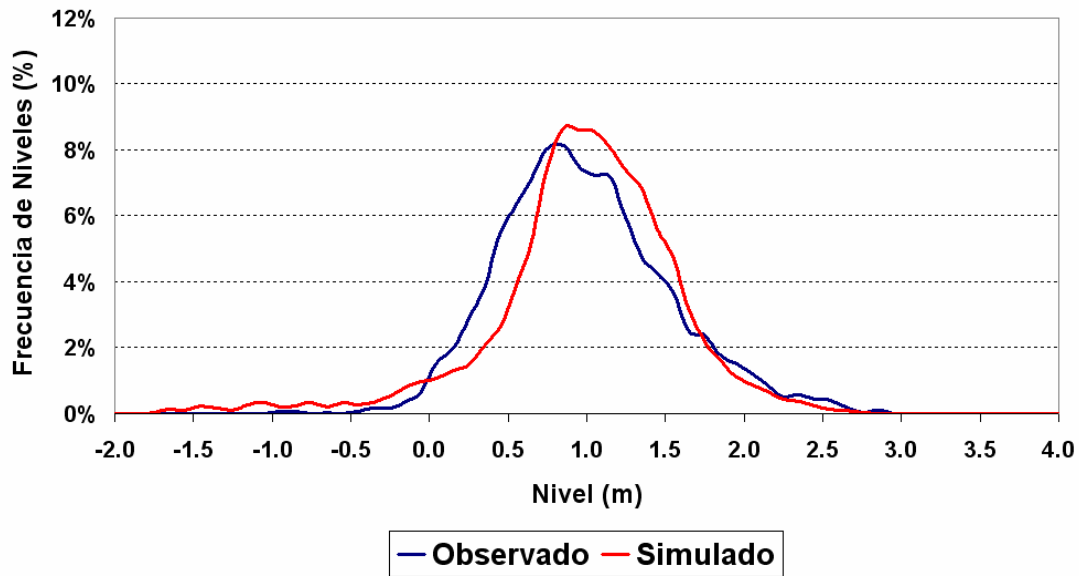


Figura IV-16 Comparación entre curvas de frecuencia de niveles para 1997 en Buenos Aires obtenidas de mediciones y simuladas con el modelo RPP-2D

#### IV - 3.5 Simulación de grandes ondas de tormenta

En el intervalo de tiempo 1980 - 2000, se identificaron algunos eventos de tormentas de variados niveles de significación y diferentes características con el objetivo de analizar las respuestas del modelo. Estas tormentas fueron representadas con duraciones de entre 120 y 168 horas (cinco y siete días). Las dos opciones de campos de vientos que provee NCEP/NCAR (intervalos de 6 y 24 horas), fueron ensayadas en estas simulaciones.

A partir de los primeros ensayos numéricos efectuados, se comprobó que los datos de vientos provistos por NCEP/NCAR deben ser tomados con cautela, ya que en muchos casos las acciones representadas por esos datos no se condicen o, incluso, son contradictorias con las respuestas observadas del sistema (los niveles de agua). Se interpreta que esta es una limitación impuesta por el carácter global del modelo. Sin embargo, se considera que los datos de vientos tomados cada veinticuatro horas, en comparación con los de intervalo seis horas, presentan respuestas más consistentes con los niveles observados en las simulaciones. En las figuras IV-17 a IV-19 se presentan las comparaciones de los niveles observados y simulados en Buenos Aires, de los eventos de tormenta que causaron niveles máximos en los años 1989, 1994 y 2000.

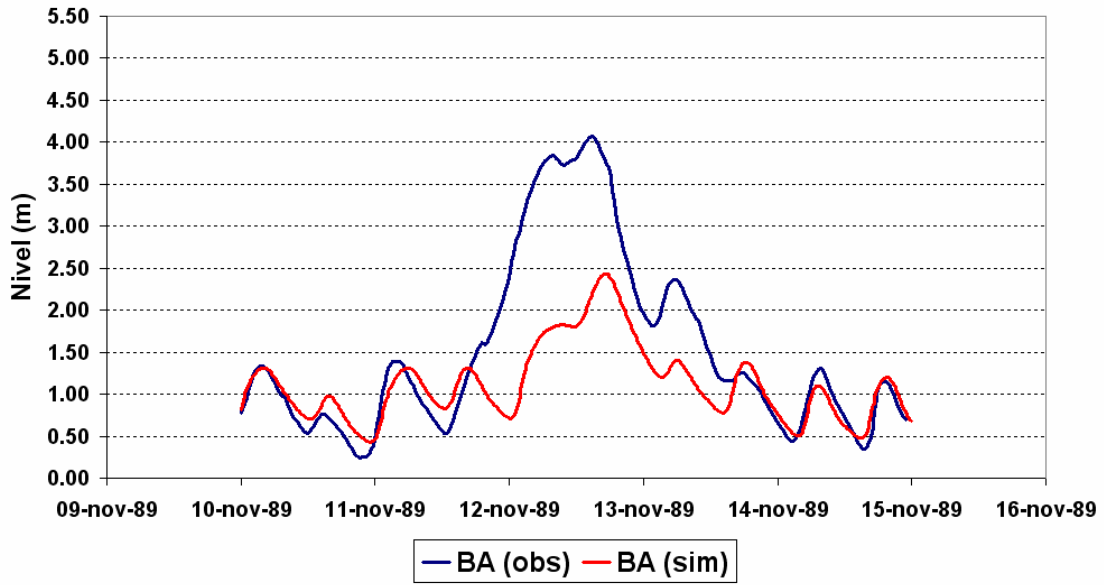


Figura IV-17 Comparación de niveles durante la tormenta de Noviembre de 1989

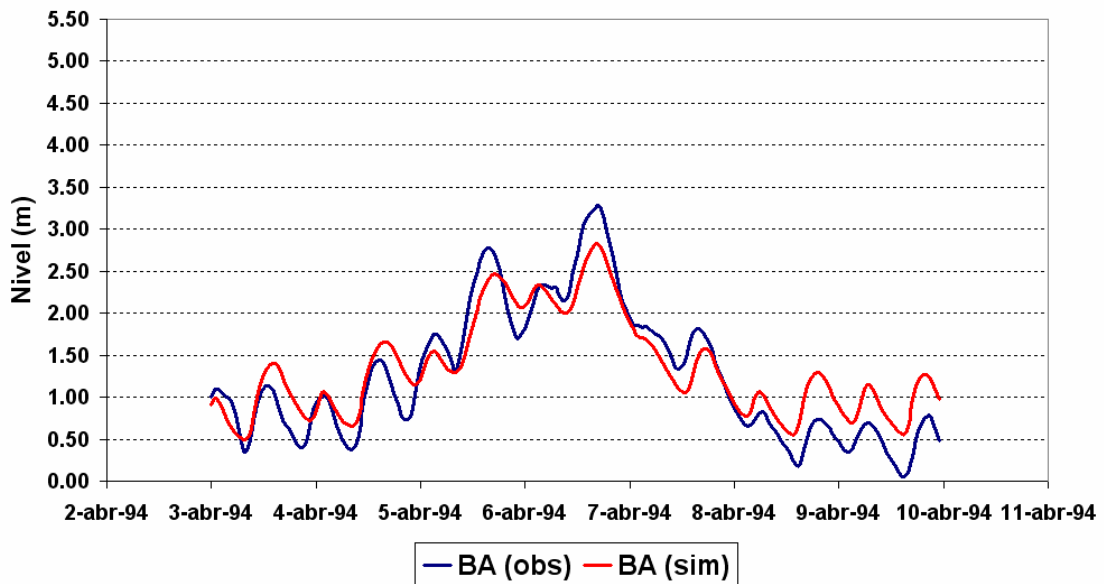


Figura IV-18 Comparación de niveles durante la tormenta de Abril de 1994

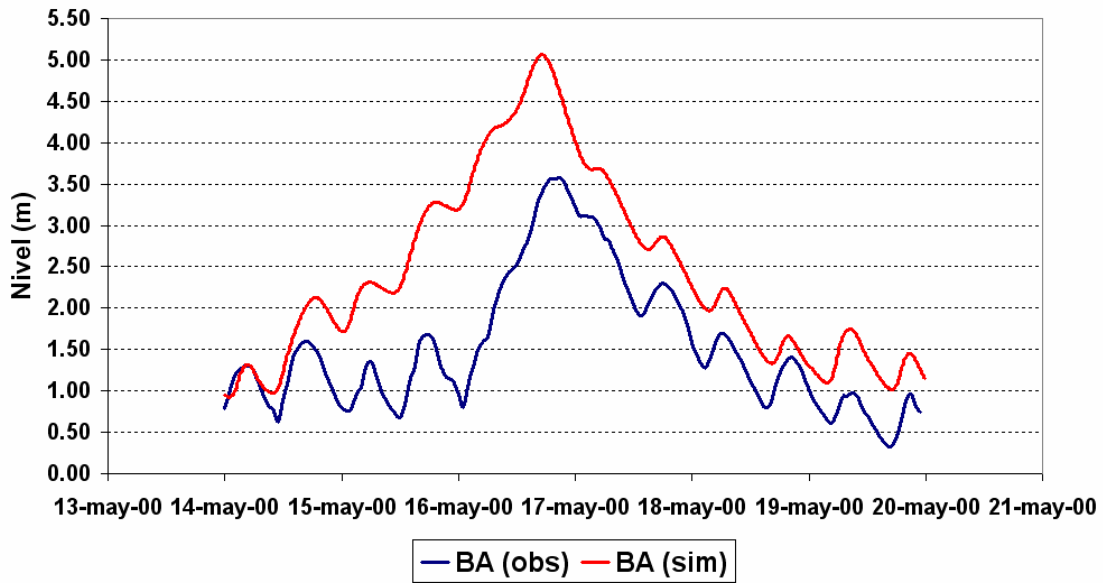


Figura IV-19 Comparación de niveles durante la tormenta de Mayo de 2000

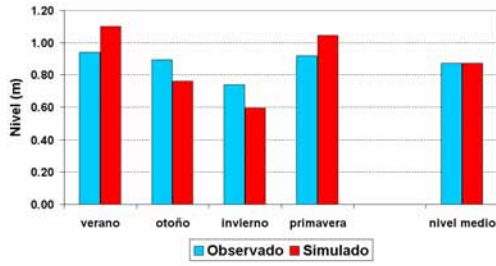
Se concluye que el modelo RPP-2D tiene capacidad para representar la respuesta del sistema a las tormentas, y que su calibración más precisa para estas situaciones depende de la disponibilidad de mejor información sobre los campos de vientos actuantes. De todos modos, se considera que el dominio del modelo RPP-2D es lo suficientemente extendido como para incluir distancias de desarrollo ("fetchs") suficientes de las ondas de tormenta.

## IV - 4 Verificación del modelo

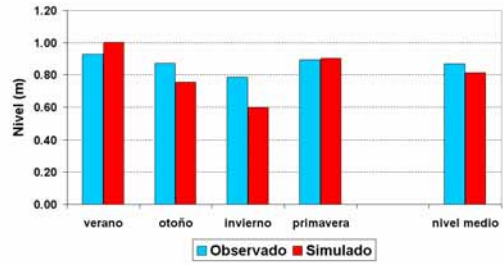
### IV - 4.1 Niveles medios de la década de 1990

Una vez calibrado el modelo, se procedió a su verificación aplicándolo a nuevas situaciones. Como primera etapa de este proceso se efectuaron comparaciones de los niveles medios en la estación de control Buenos Aires para el resto de los años de la década del 1990, tomada como representativa de las condiciones presentes. Para cada año se calculó el nivel medio anual y el de cada estación (verano, otoño, primavera e invierno).

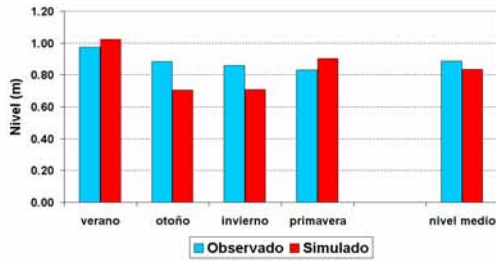
Se muestran los resultados de los nueve años restantes de la década (Figuras IV-22.a a IV-22.f). Se observa que, en todos los casos, la tendencia de variación estacional del nivel se representa correctamente. Las diferencias cuantitativas se estiran a un máximo de 20 cm.



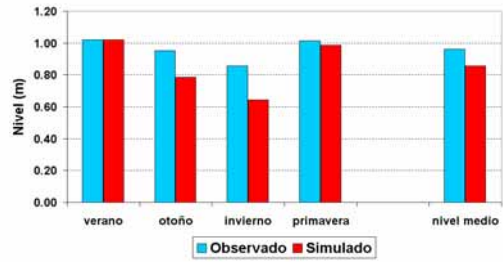
a. 1990



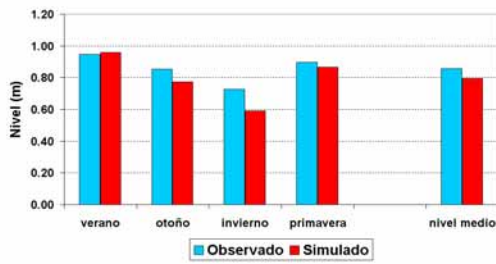
b. 1991



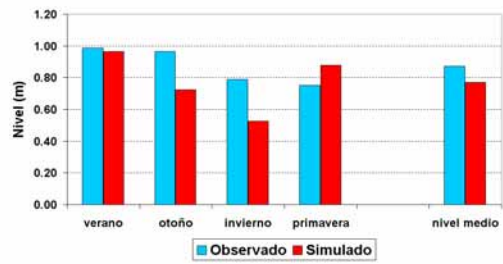
c. 1992



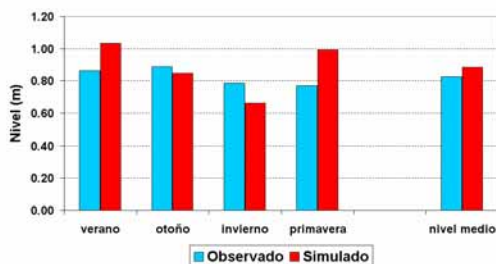
d. 1993



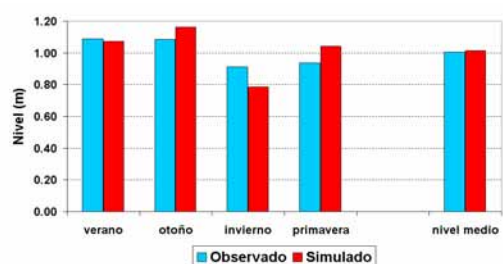
e. 1994



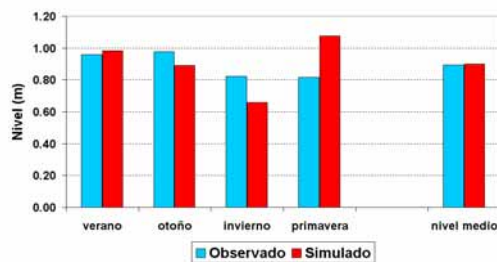
f. 1995



g. 1996



h. 1998



i. 1999

Figura IV-22 Comparación de niveles medios anuales y estacionales

En la figura IV-23 se muestra un resumen de las comparaciones de niveles anuales en Buenos Aires observados y simulados. Se puede ver el buen acuerdo logrado para la totalidad de los años de la década de 1990. Por otro lado, en la figura IV-24, se observa la comparación de los niveles estacionales y el nivel medio de la década. Aunque la simulación del nivel medio es ligeramente diferente que la del año 1997, se nota que la tendencia de los niveles medios estacionales es similar que la del año adoptado como representativo de la década.

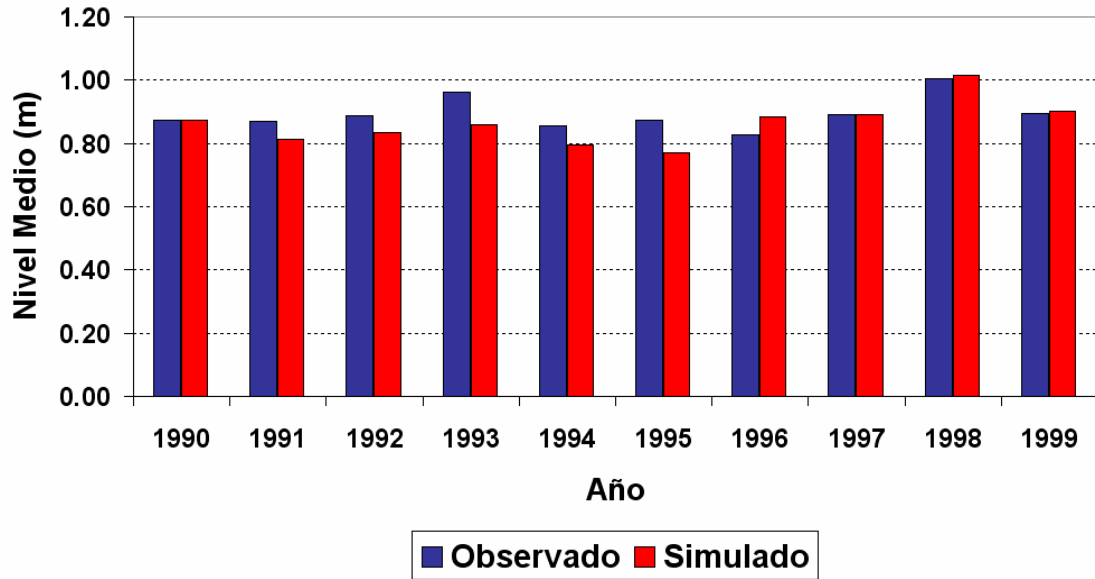


Figura IV-23 Niveles medios anuales (década de 1990)

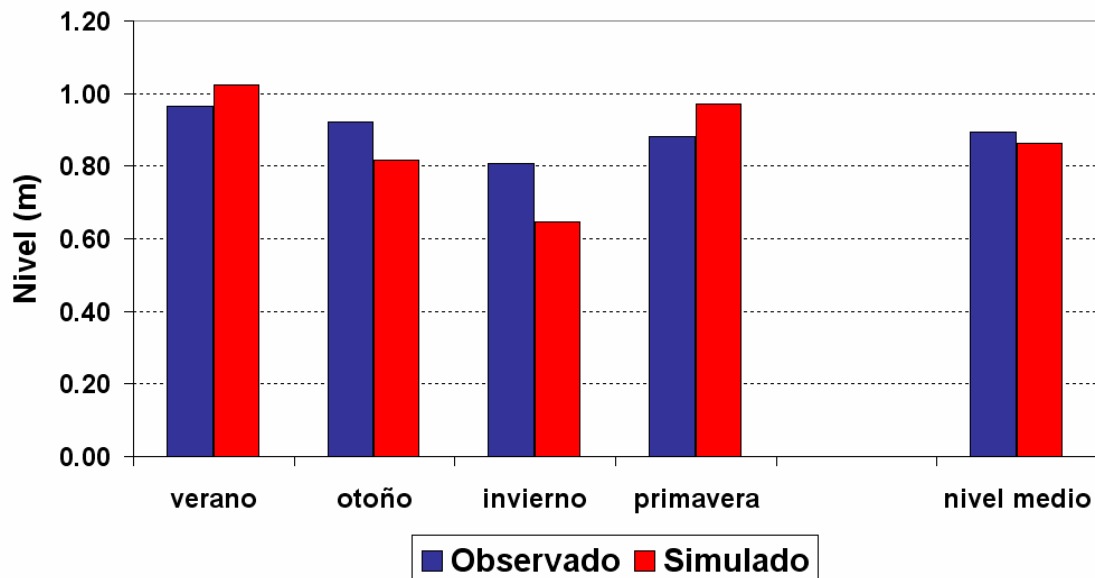
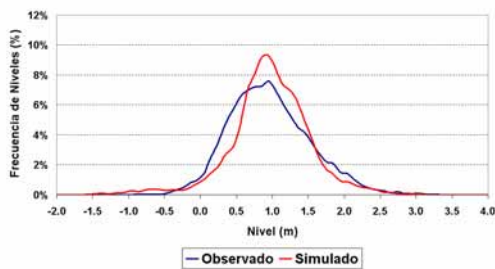


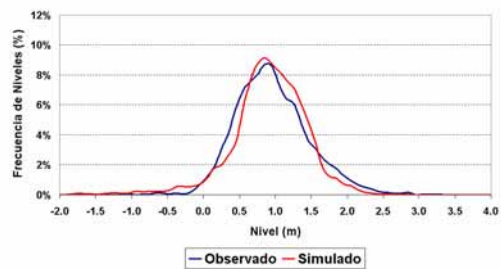
Figura IV-24 Niveles medios de la década de 1990

#### IV - 4.2 Frecuencias de niveles de la década de 1990

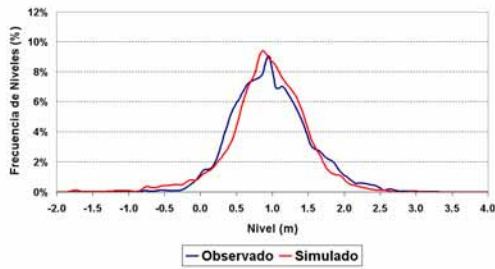
La segunda situación analizada es la que tiene que ver con la frecuencia de niveles en Buenos Aires del resto de los años de la década de 1990. Para esto se tomaron las series de niveles simulados y observados, calculando su frecuencia de ocurrencia, en intervalos de clase de 10 cm (igual que lo utilizado durante la calibración). Se presentan los resultados de los nueve años restantes de la década (Figuras IV-25.a a IV-25.i), advirtiéndose un buen acuerdo en general de las bajas frecuencias de los niveles más altos (los que son de inundación). En la figura IV-26 se observa la comparación de frecuencias de niveles de toda la década, calculadas de las series 1990 – 1999 de niveles observados y simulados en Buenos Aires.



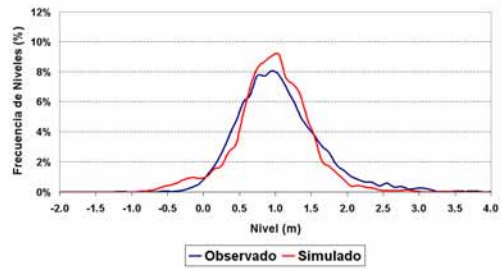
a. 1990



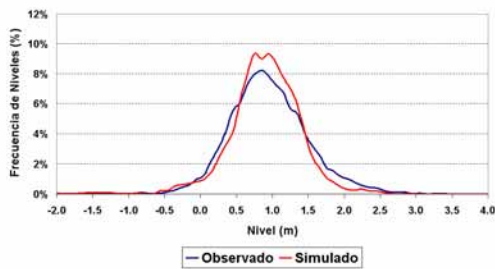
b. 1991



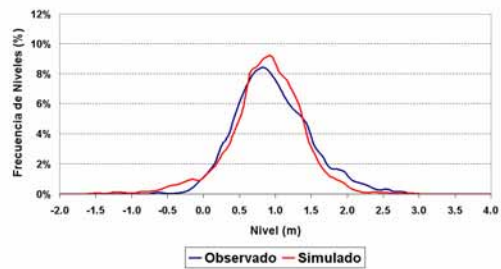
c. 1992



d. 1993



e. 1994



f. 1995

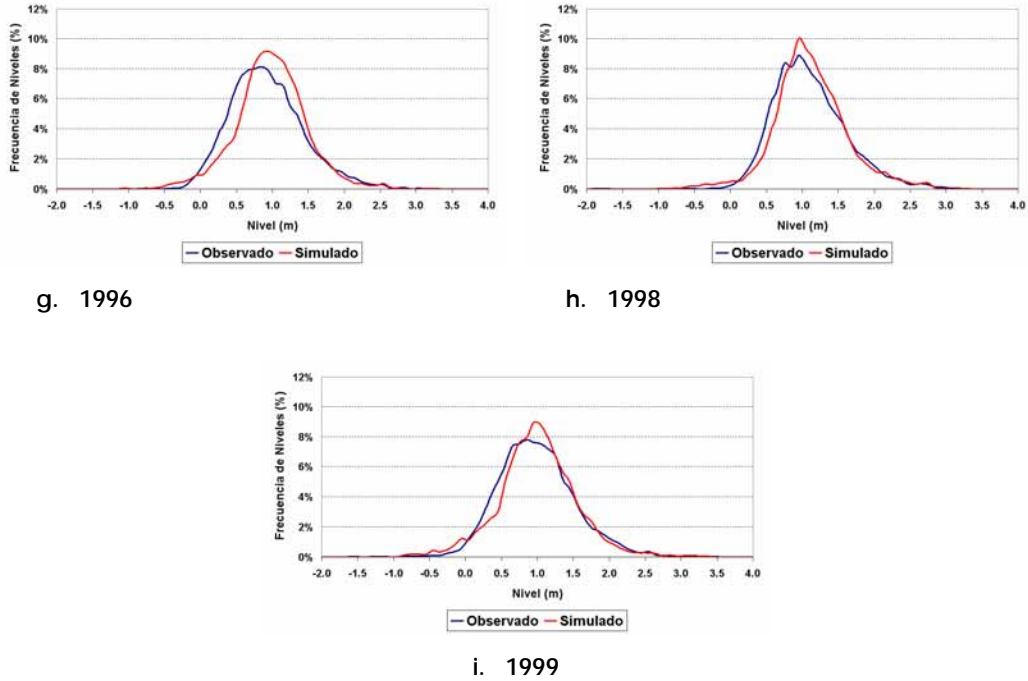


Figura IV-25 Comparación entre curvas de frecuencia de niveles para años de la década de 1990 en Buenos Aires

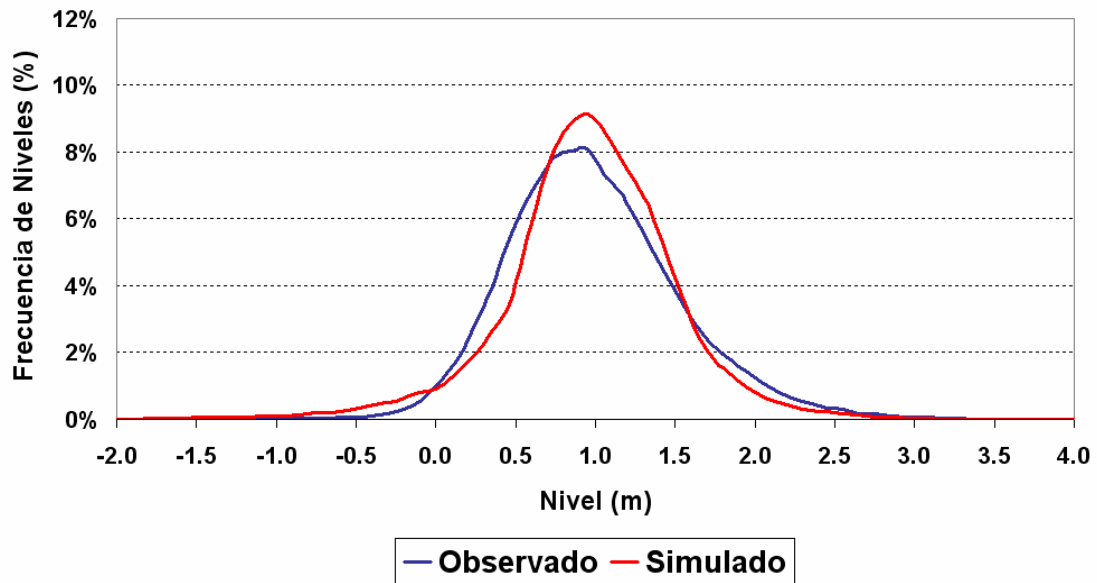


Figura IV-26 Comparación entre curvas de frecuencia de niveles para la década de 1990 en Buenos Aires

#### IV - 4.3 Nivel del mar observado por el satélite TOPEX/Poseidon

Otra etapa en la verificación consistió en la utilización de un conjunto de datos de nivel del mar respecto del geode de referencia provistos por el satélite TOPEX/Poseidon para el período 1992 - 2001 elaborados por D'Onofrio *et al.* (2003). El satélite TOPEX/Poseidon usa un altímetro de radar de alta precisión para tomar

medidas de altura de la superficie del mar sobre más del 90% de los océanos libres de hielo del mundo, completando en aproximadamente 10 días un ciclo.

Las mediciones pertenecen a 148 puntos de observación ubicados dentro del dominio del modelo RPP-2D (Figura IV-27), con un número de datos variable. En la figura IV-28 se presentan los datos del punto, cercano a las costas uruguayas a la altura de Punta del Este, que mayor cantidad de datos posee: 3092. Se advierte la gran variabilidad existente en estos datos.

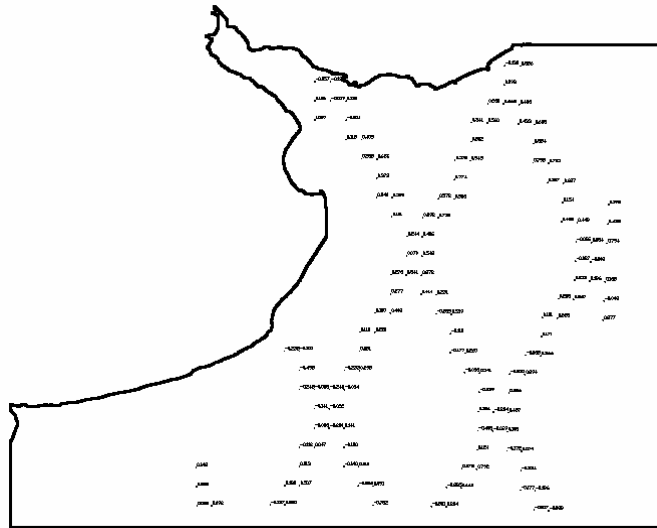


Figura IV-27 Puntos de medición del satélite TOPEX/Poseidon en el interior del dominio del modelo RPP-2D

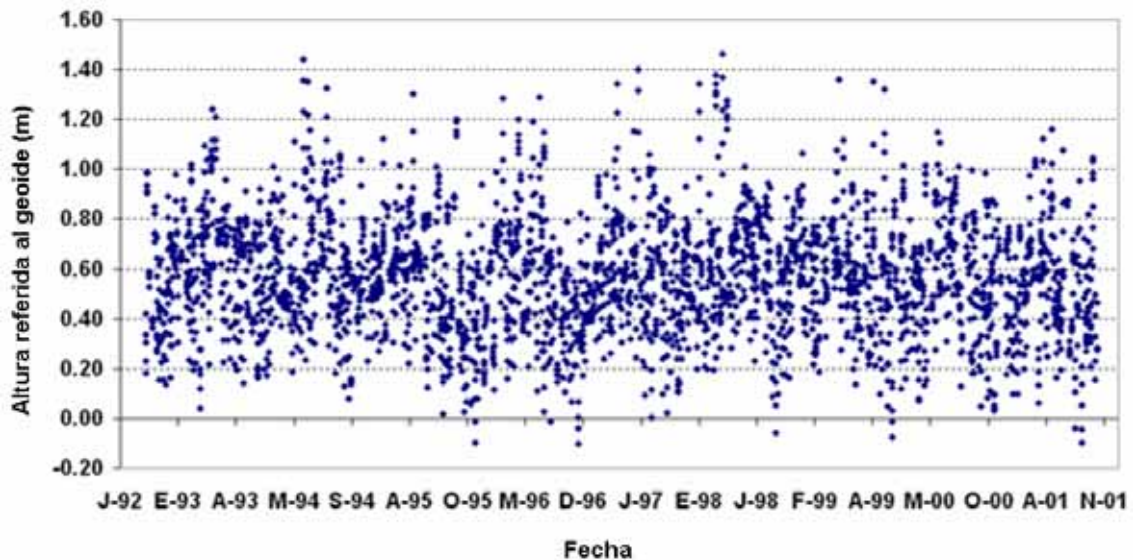
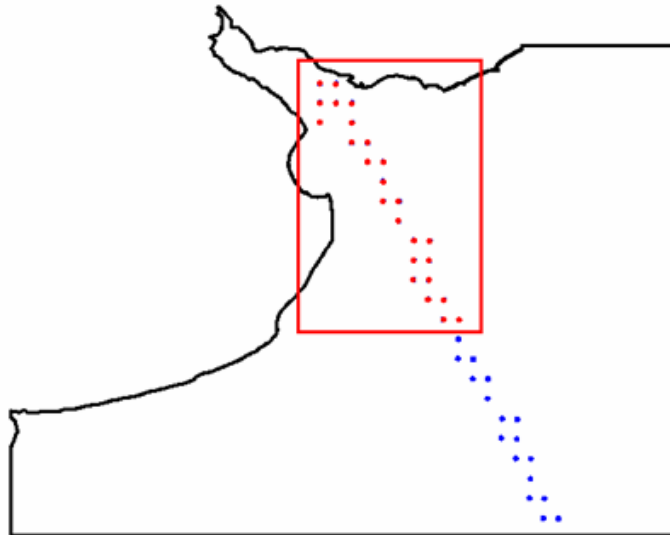


Figura IV-28 Serie de observaciones de nivel del mar del punto de mayor cantidad de datos

Para realizar la comparación de estos datos con los resultados de la simulación del escenario representativo de la situación presente con el modelo RPP-2D, se tomó solo una porción del conjunto de datos. Como se ve en la figura IV-29, de la línea de

barrido de dirección aproximadamente igual al eje del Río de la Plata, se tomaron los puntos de observación ubicados dentro de la Plataforma Continental.

Para comparar con los resultados del modelo RPP-2D, se trabajó con las variaciones estacionales, tomando los niveles obtenidos del invierno y del verano del año de referencia (1997). Los valores observados referidos a cada estación, se obtuvieron del promedio de los datos existentes de cada una de ellas. Estos promedios, en cada caso, tienen distintos volúmenes de datos.



**Figura IV-29** Conjunto de datos elegidos de la línea de barrido del satélite de dirección aproximadamente igual al eje del Río de la Plata

La cantidad de observaciones de estos puntos es muy variable. Las siguientes imágenes (Figuras IV-30.a y IV-30.b) ilustran las cantidades de observaciones en cada punto: en rojo se observan todos los puntos, en verde los que tienen más de 100 observaciones y en azul más de 200 observaciones. Finalmente, para la comparación se toman los puntos que tienen más de 200 observaciones y aquellos que no se encuentran dentro del Río de la Plata Interior, donde se detectaron variaciones demasiado pronunciadas.

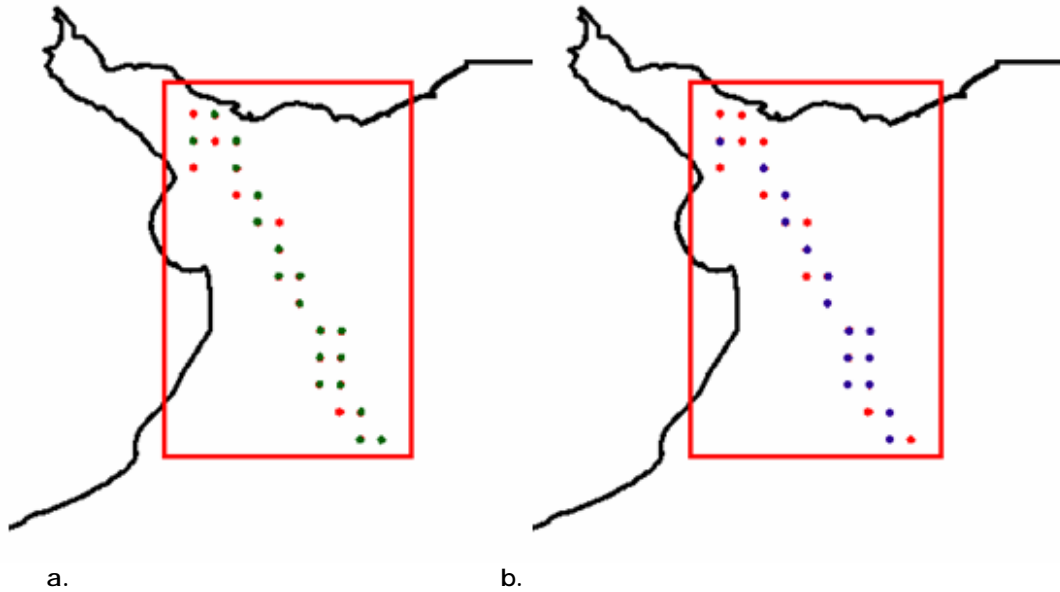


Figura IV-30 Cantidad de datos de los puntos de observación elegidos

La forma de graficar estos resultados se plantea en una línea imaginaria ajustada entre los puntos de observación. En esa línea se realizó el corte vertical en los mapas estacionales de niveles (verano e invierno). Para la comparación, los niveles capturados por el satélite TOPEX/Poseidon fueron incrementados en 0.556 m. En las siguientes figuras IV-31 y IV-32 se observa que el modelo resulta un interpolador adecuado de los datos satelitales, identificando claramente las tendencias del gradiente superficial, que indica mayores (menores) niveles del río en relación al océano para condiciones de verano (invierno).

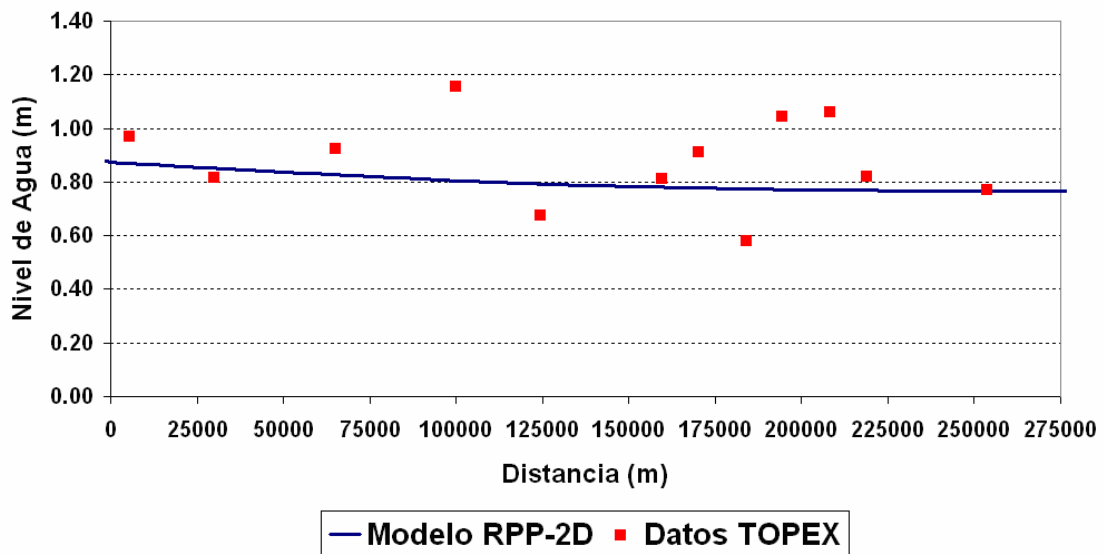


Figura IV-31 Comparación de niveles (VERANO)

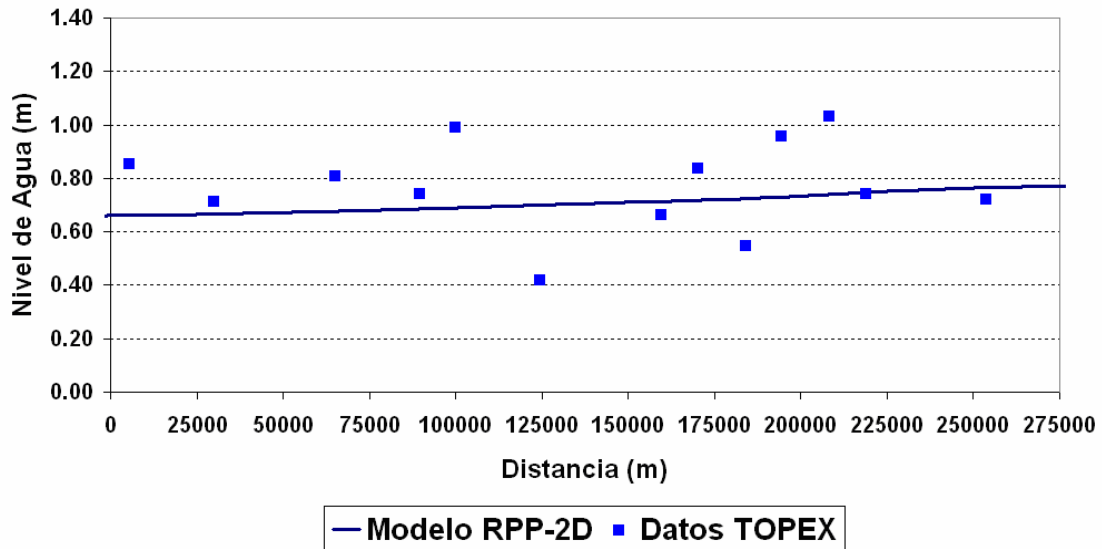


Figura IV-32 Comparación de niveles (INVIERNO)

#### IV - 4.4 Velocidades de corrientes

Con los registros proveídos por la compañía Hidrovía S.A., concesionaria del dragado de mantenimiento de los canales de navegación del Río de la Plata, se realizó la verificación de la simulación de velocidades de corrientes con el modelo RPP-2D. Estas series de datos, corresponden a mediciones en 10 estaciones localizadas en la zona media del río, relativamente cercanas entre sí (Figura IV-33). Las observaciones fueron realizadas cada 10 minutos, para intervalos de tiempo que se extienden entre junio y octubre de 1996.

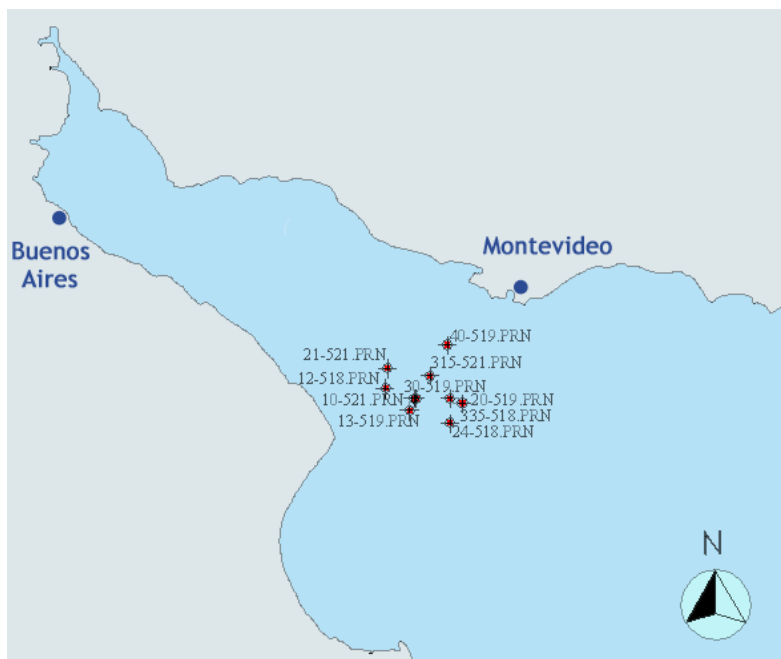
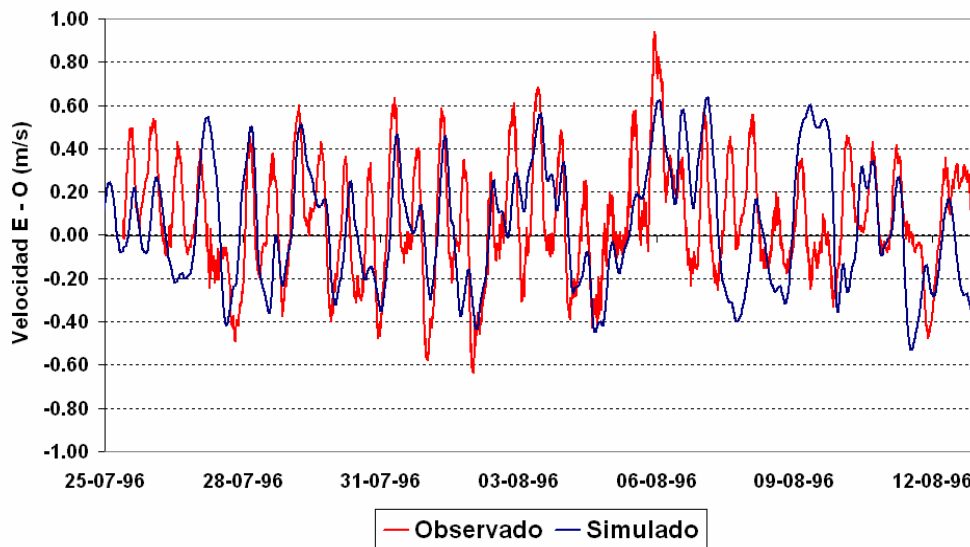


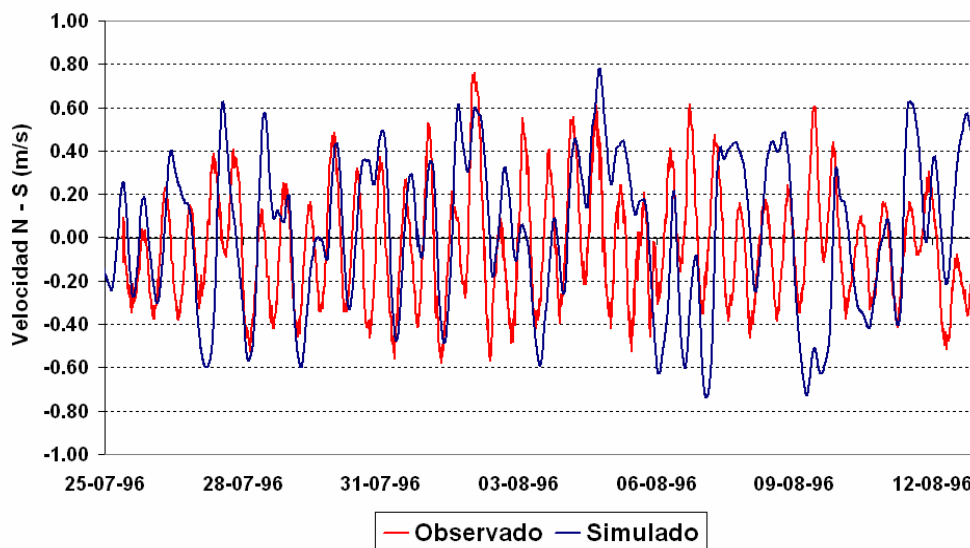
Figura IV-33 Estaciones de medición de velocidades de corriente (Junio/Octubre 1996)

Las simulaciones con el modelo RPP-2D se efectuaron para el periodo Julio 1996 - Septiembre 1996, disponiéndose para ellas de campos de vientos de NCEP/NCAR. De todas las estaciones, se eligió mostrar los resultados de la 21-521 considerándolos representativos del conjunto de simulaciones. En las figuras IV-34.a y IV-34.b se observan las comparaciones entre las componentes Este - Oeste y Norte - Sur, respectivamente, de las velocidades de corriente registradas y simuladas.

Se advierte, en todas las simulaciones, que se mantienen las tendencias de aumentos y disminuciones de velocidad, y son bien representadas las fases. Se concluye que, utilizando buena información de vientos, el modelo RPP-2D logra representar adecuadamente las velocidades de corriente.



a. Velocidad Este - Oeste



b. Velocidad Norte - Sur

Figura IV-34 Comparación entre velocidades de corrientes

## Capítulo V      Peso relativo de los forzantes

### V - 1   Introducción

Tal como se explicó anteriormente, los forzantes de la dinámica del Río de la Plata son la marea astronómica, la descarga de los tributarios principales, los vientos y el nivel medio del mar. Habiendo implementado, calibrado y verificado un modelo hidrodinámico para el sistema capaz de representar independientemente el efecto de todos estos forzantes, es posible aplicarlo para determinar la influencia relativa que cada uno tiene sobre el nivel medio del río.

Esto se lleva a cabo efectuando un análisis de sensibilidad del sistema ante cambios en los forzantes. Se obtienen las diferencias de niveles medios del agua en 6 estaciones de control cuando se varían los forzantes de a uno a partir de una situación de base. Las estaciones de control son Martín García, Buenos Aires, Colonia, La Plata y Montevideo en el Río Interior y San Clemente en el Río Exterior. La situación de base considerada es la siguiente: los tributarios principales con su caudal medio (5200 m<sup>3</sup>/s el Río Uruguay, 13500 m<sup>3</sup>/s el Río Paraná Guazú y 4500 m<sup>3</sup>/s el Río Paraná de las Palmas, conformando un caudal total ingresante en el sistema de 23200 m<sup>3</sup>/s); una onda de marea astronómica correspondiente a un verano (se tomó el mes de febrero de 1997); un campo de vientos uniforme en intensidad (3 m/s) y dirección (70° respecto del Norte en sentido horario, es decir, aproximadamente NE - E), esquematizando un escenario de verano.

### V - 2   Caudales de los tributarios

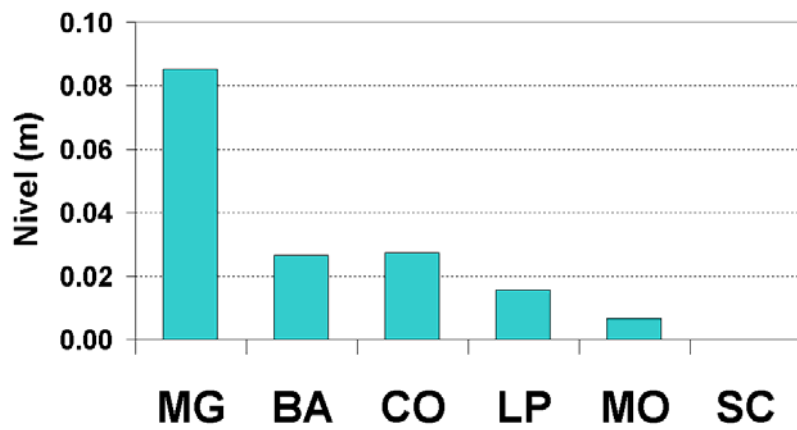
Se ensayaron dos condiciones de incremento de caudal ingresante en el Río de la Plata: 30000 m<sup>3</sup>/s y 75000 m<sup>3</sup>/s, repartidos entre los tributarios en igual proporción que en la condición de base como lo muestra la Tabla V-1.

Tabla V-1   Distribución de caudales

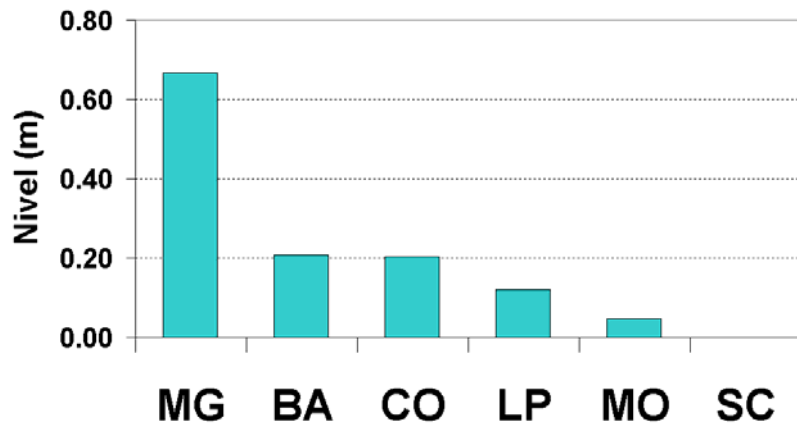
<b>RIO DE LA PLATA</b>	<b>23200 m<sup>3</sup>/s</b>	<b>30000 m<sup>3</sup>/s</b>	<b>75000 m<sup>3</sup>/s</b>
Uruguay	5200 m <sup>3</sup> /s	6724 m <sup>3</sup> /s	16810 m <sup>3</sup> /s
Paraná Guazú	13500 m <sup>3</sup> /s	17457 m <sup>3</sup> /s	43643 m <sup>3</sup> /s
Paraná de las Palmas	4500 m <sup>3</sup> /s	5819 m <sup>3</sup> /s	14547 m <sup>3</sup> /s

El caso del caudal de 30000 m<sup>3</sup>/s significa un incremento del 30%, similar al registrado en las tres últimas décadas respecto del caudal medio precedente. Los resultados se muestran en la figura V-1.a. Se observa que el efecto es casi imperceptible hasta Buenos Aires inclusive, notándose un cambio significativo recién en Martín García, con un incremento de nivel del orden de los 8 cm.

El caso de una descarga de 75000 m<sup>3</sup>/s desde los tributarios se corresponde con los registros de las mayores crecidas producidas en estos ríos. La figura V-1.b presenta los resultados. Se observa que con este caudal la afectación es considerable en la parte interior del Río de la Plata: 65 cm en Martín García y alrededor 20 cm en Buenos Aires. Pero el efecto es ya casi imperceptible en Montevideo.



a. 30000 m<sup>3</sup>/s (+30%)



b. 75000 m<sup>3</sup>/s

Figura V-1 Incremento del nivel medio en estaciones de control frente a un aumento del caudal de los tributarios, de acuerdo al modelo RPP-2D.

### V - 3 Vientos

Se planteó un escenario de ensayo con un incremento del 33% en la intensidad (4 m/s) y un cambio en la dirección de los vientos, que rotan hacia el Este (90°), compatible con la tendencia climática observada para la estación de verano.

Los resultados de la simulación se muestran en las figuras V-2 y V-3. Se observa un incremento del nivel, tal cual era de esperarse, en la zona interior del río. Se distinguen valores mayores en la costa argentina que en la uruguaya. En el Río de la Plata Exterior se aprecian disminuciones en los niveles medios. En la figura V-4 se pueden ver los niveles medios resultantes de las simulaciones de las dos condiciones de vientos (presente y futuro).

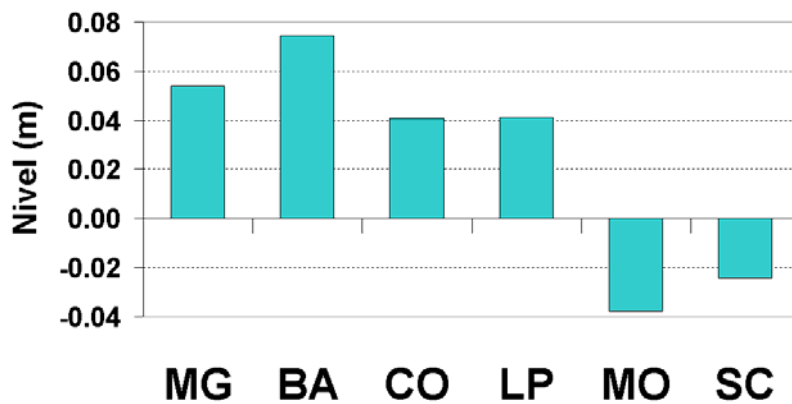


Figura V-2 Incremento del nivel medio en estaciones de control frente a un aumento de la intensidad y rotación hacia el este de los vientos durante el verano

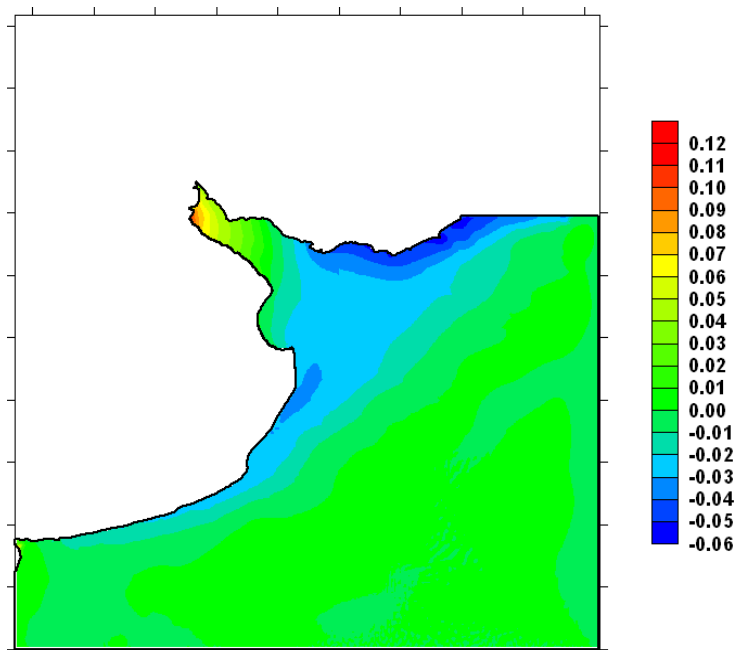


Figura V-3 Cambios en el nivel medio en el dominio del modelo RPP-2D frente a un aumento de la intensidad y rotación hacia el este de los vientos durante el verano

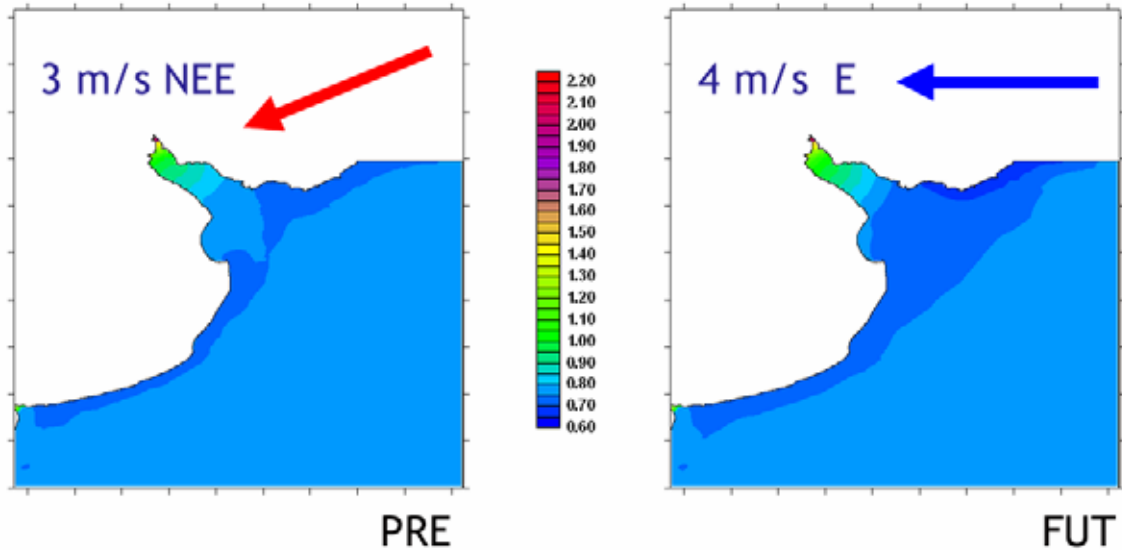


Figura V-4 Niveles medios en la región del Río de la Plata ante distintas condiciones de viento constante obtenidos con el modelo RPP-2D

#### V - 4 Nivel medio del mar

Se ensayó una situación con un aumento de 25 cm del nivel medio del mar respecto de la condición presente, valor representativo del orden de magnitud de incremento esperable durante el siglo XXI. La figura V-5 muestra los resultados. Se observa que la respuesta del sistema es prácticamente en bloque, con una disminución muy leve, apenas perceptible en Martín García, que muestra un incremento 4 cm menor.

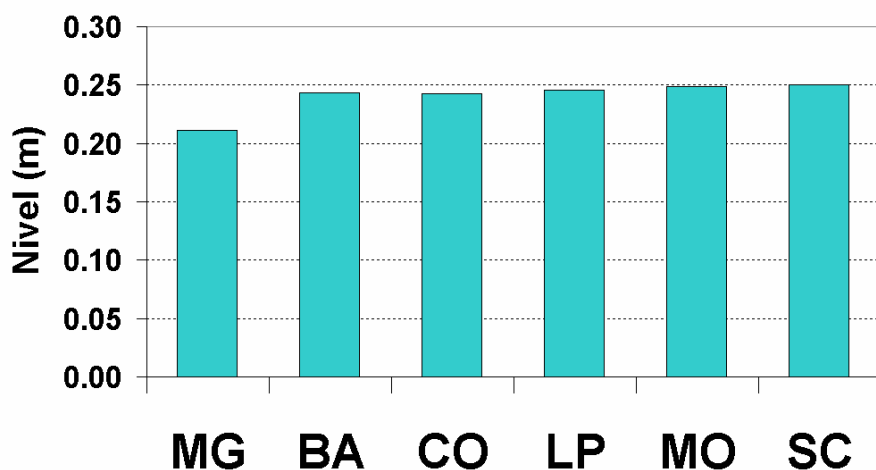


Figura V-5 Incremento del nivel medio en estaciones de control frente a un incremento del nivel medio del mar de 25 cm

## **V - 5 Comparación de respuestas**

Los resultados presentados han puesto en evidencia que el aumento del nivel medio del mar es el mecanismo dominante de cambio del nivel medio del río frente a las variaciones esperables en los forzantes, ya que produce un aumento en bloque que, para el presente siglo, significará algunas decenas de centímetros.

Le sigue en importancia el efecto de los vientos, que puede generar incrementos del orden de los 10 cm en el río interior para las condiciones de cambio esperables.

Finalmente, el efecto menor es el de los caudales de los tributarios, que aún para incrementos muy importantes sólo generan aumentos de unos pocos centímetros hasta la altura de Martín García. Esta aseveración no tiene en cuenta la capacidad de atenuación del pico de crecida que tiene el Delta del Paraná, como mencionan Bronstein y Menéndez (1995). En este informe se plantea que para la crecida de 1983, dado que la permanencia del pico fue extraordinaria, no hubo tal atenuación; si existió para un pico estadísticamente significativo como el del año 1992, con una atenuación del 25%. Por lo tanto, solo para una crecida como la de 1983 se podrían observar aumentos de algunos centímetros en el nivel del Río de la Plata Interior.

## Capítulo VI Proyecciones para escenarios futuros

---

### VI - 1 Introducción

Las proyecciones de las respuestas del Río de la Plata y su Frente Marítimo a escenarios climáticos y socioeconómicos futuros se realizaron explotando el modelo RPP-2D. Las proyecciones dependen de los escenarios o situaciones plausibles que se planteen.

Las estimaciones de niveles futuros en el Río de la Plata se obtuvieron definiendo cuatro escenarios, dos para la década del 2030 y dos para el 2070. De esta manera, fue posible analizar las condiciones medias del cambio respecto de la situación presente, tanto a escala anual como estacional.

### VI - 2 Escenarios futuros

#### *VI - 2.1 Línea evolutiva*

Teniendo en cuenta las características socioeconómicas de la región del Río de la Plata, y analizando su evolución en el futuro, se eligió como línea evolutiva (sección II-2.2) la correspondiente a la familia de escenarios A2 (IPCC, 2000). Esta elección se basa en la correspondencia con la idiosincrasia actual, no esperándose grandes cambios en el comportamiento general de la sociedad y su desarrollo tecnológico y económico (avalan esta decisión particularidades como la permanencia de un mundo heterogéneo y el aumento de población a las tasas actuales).

En cuanto a las variables que fuerzan el sistema del Río de la Plata y su Frente Marítimo, aquellas que se verán principalmente influenciados por la elección de esta línea evolutiva serán el nivel medio del mar y la intensidad y dirección de los campos de vientos.

#### *VI - 2.2 Ensayos realizados*

Tomando como base el año típico de la década de 1990, representante de la situación presente, se realizaron cuatro ensayos de situaciones futuras. Cada uno de estos ensayos correspondió a un año de simulación, con tiempos de máquina del orden de los tres días (Procesador Intel, Pentium IV, 2.8 GHz.), destacándose los nombres a continuación:

- **PRE 1990s** (simulación del año típico de la década de 1990)
- **FUT 2030s med** (simulación del año típico de la década de 2030, escenario de nivel medio del mar medio)
- **FUT 2030s max** (simulación del año típico de la década de 2030, escenario de nivel medio del mar máximo)
- **FUT 2070s med** (simulación del año típico de la década de 2070, escenario de nivel medio del mar medio)
- **FUT 2070s max** (simulación del año típico de la década de 2070, escenario de nivel medio del mar máximo)

Los caudales en los tributarios, en los cinco ensayos, fueron los correspondientes a la serie de medios mensuales del año 1997. No se tuvieron en cuenta cambios en este forzante, debido a que no tienen una importante influencia en los niveles medios costeros (escala estacional y anual). En la figura VI-1 se presentan las series de caudales medios mensuales de los ríos Paraná y Uruguay del año 1997, que descargan en el Río de la Plata.

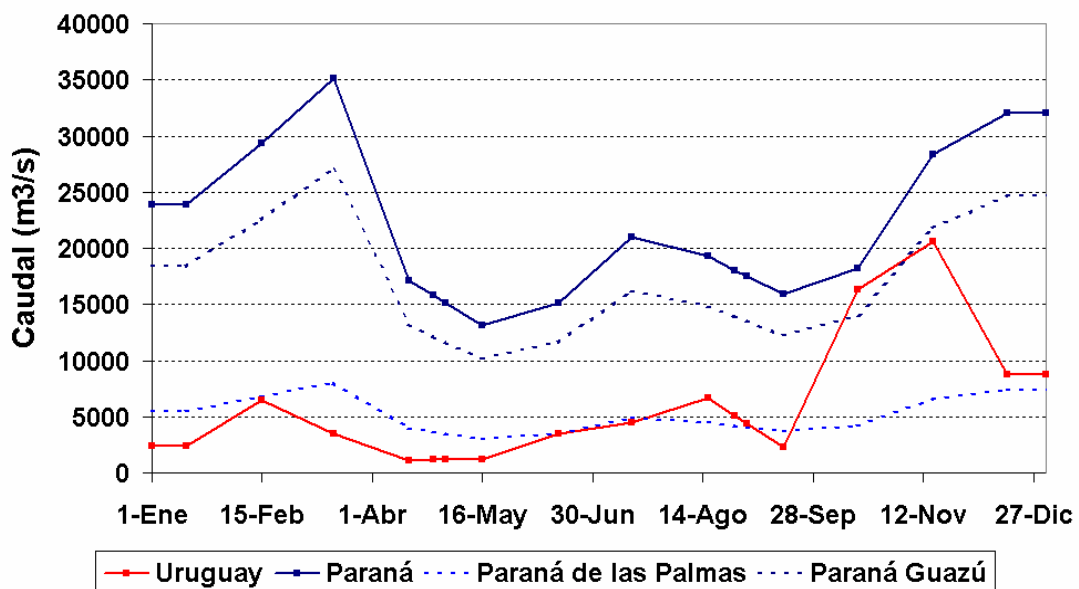


Figura VI-1 Caudales de los ríos Paraná y Uruguay (medios mensuales del año 1997)

El aumento del nivel medio del mar, para cada ensayo, fue tomado de un compendio de resultados de distintos modelos compilados por el IPCC (2001a). Esta información está referida a cada familia evolutiva. La figura VI-2 muestra la evolución

del nivel medio del mar, a escala global, para la línea evolutiva A2. Los aumentos medios y máximos, respectivamente, se refieren al promedio y al máximo de los resultados obtenidos de las proyecciones de diferentes Modelos de Circulación General. En la tabla VI-1 se presentan los valores de aumento de nivel medio del mar adoptado para cada ensayo.

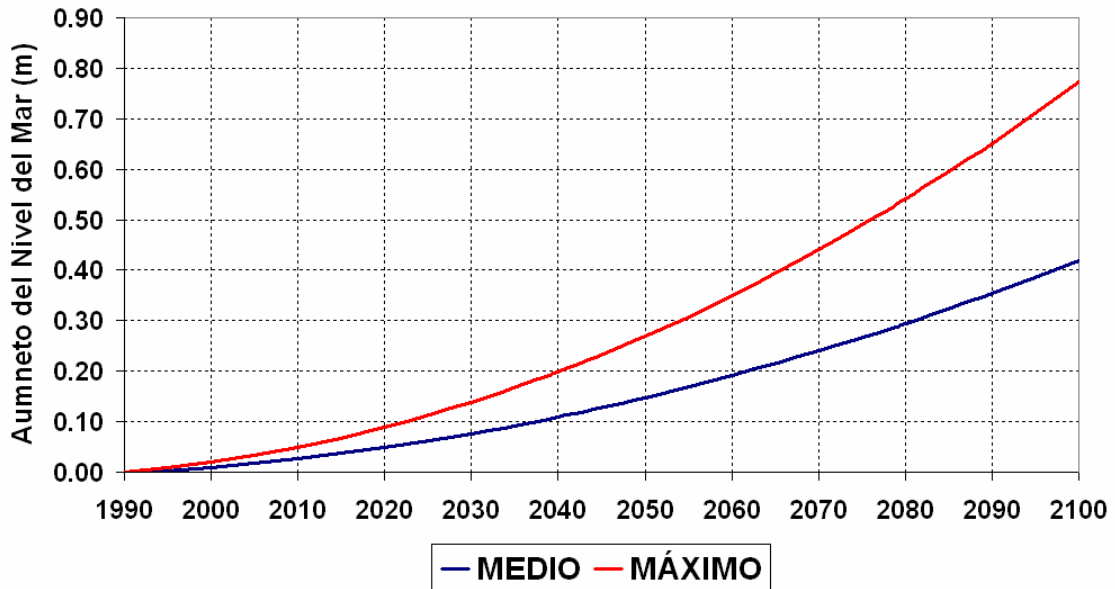


Figura VI-2 Aumento del nivel medio del mar, a escala global, para la línea evolutiva A2 (adaptado de IPCC, 2001)

Tabla VI-1 Aumento de nivel medio del mar adoptado para cada ensayo

1990s	2030s med	2030s max	2070s med	2070s max
+ 0 cm	+ 10 cm	+ 19 cm	+ 28 cm	+ 50 cm

El forzante viento para los ensayos de escenarios futuros (FUT 2030s med, FUT 2030s max, FUT 2070s med y FUT 2070s max) se tomó de la simulación del período 1950 - 2099 del modelo HADCM3 del Hadley Centre for Climate Prediction and Research de Inglaterra. Según Camilioni y Bidegain (2002), este modelo de circulación general ha tenido mejor comportamiento en la región que otros modelos similares.

Los datos obtenidos del modelo HADCM3 se refieren a valores diarios de intensidad de viento en las direcciones Este - Oeste y Norte - Sur, ubicados en 16 puntos en la región del dominio del modelo RPP-2D (Figura VI-3).

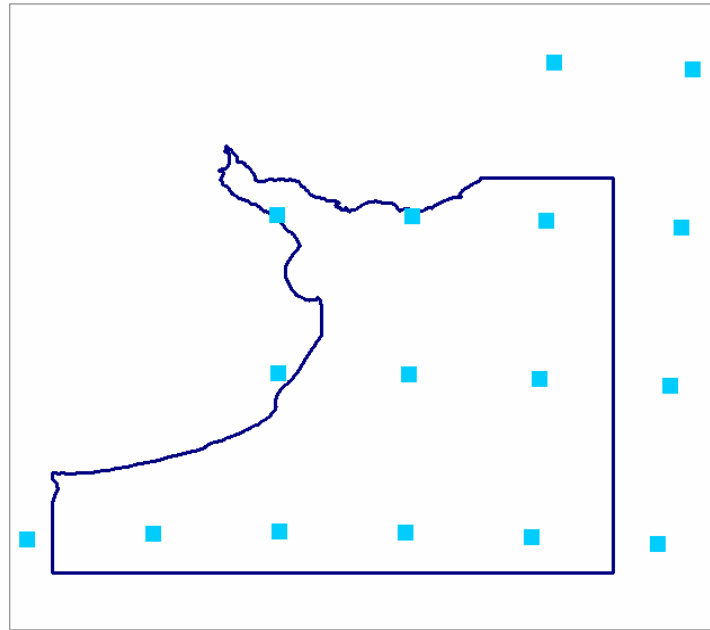


Figura VI-3 Ubicación de los datos de viento obtenidos con el modelo HADCM3

En la figura VI-4 se observa, para uno de los puntos de la base NCEP/NCAR ubicado en el Río de la Plata Exterior, una comparación de las intensidades y direcciones del viento para el Escenario Presente y los dos Escenarios Futuros. Las comparaciones entre cada uno de ellos se muestran en la figura VI-5.

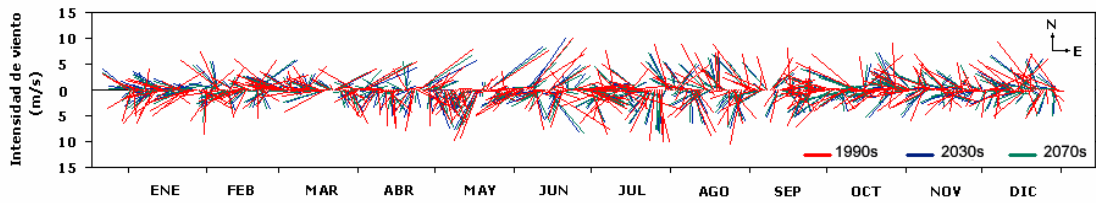
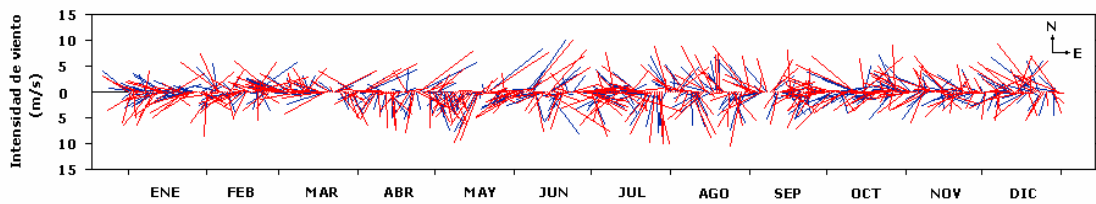
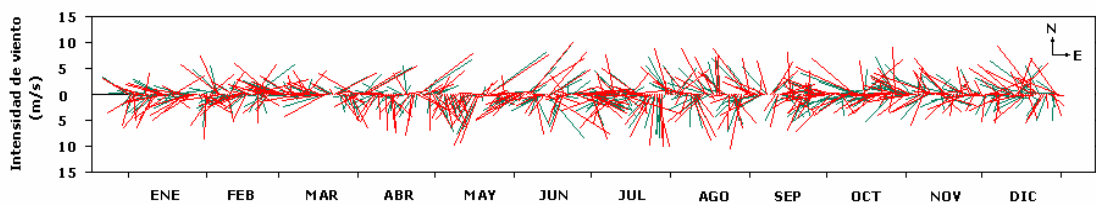


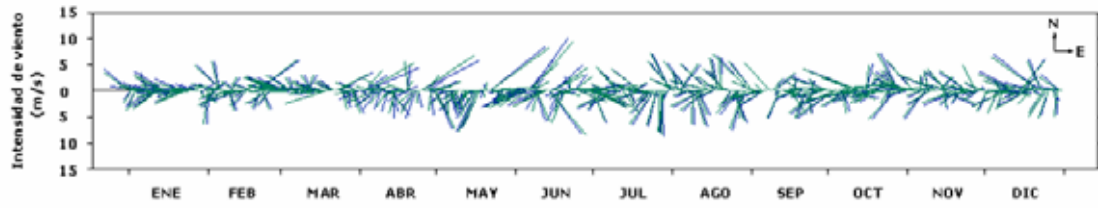
Figura VI-4 Comparación de las componentes de viento en el Río de la Plata Exterior para los distintos escenarios



a. 1990s (rojo) vs. 2030s (azul)



b. 1990s (rojo) vs. 2070s (verde)



c. 2030s (azul) vs. 2070s (verde)

Figura VI-5 Comparación de las componentes de viento en el Río de la Plata Exterior

Se destaca que los escenarios futuros de vientos plantean intensidades crecientes y cambios de dirección hacia el Este, las figuras VI-6 y VI-7 lo muestran para las resultantes media anual y medias estacionales en el punto elegido para la comparación.

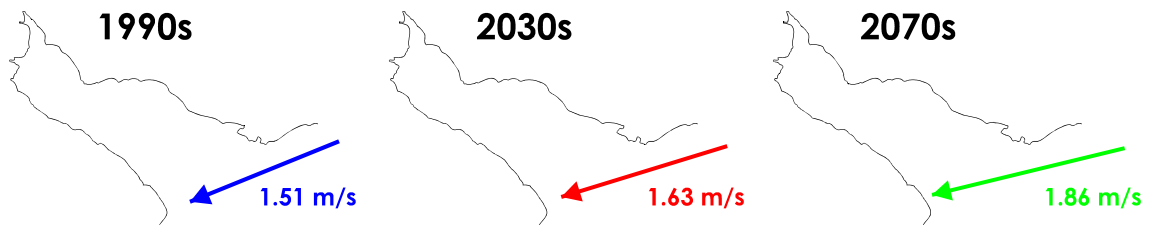


Figura VI-6 Intensidad y dirección media anual de viento en el Río de la Plata Exterior.

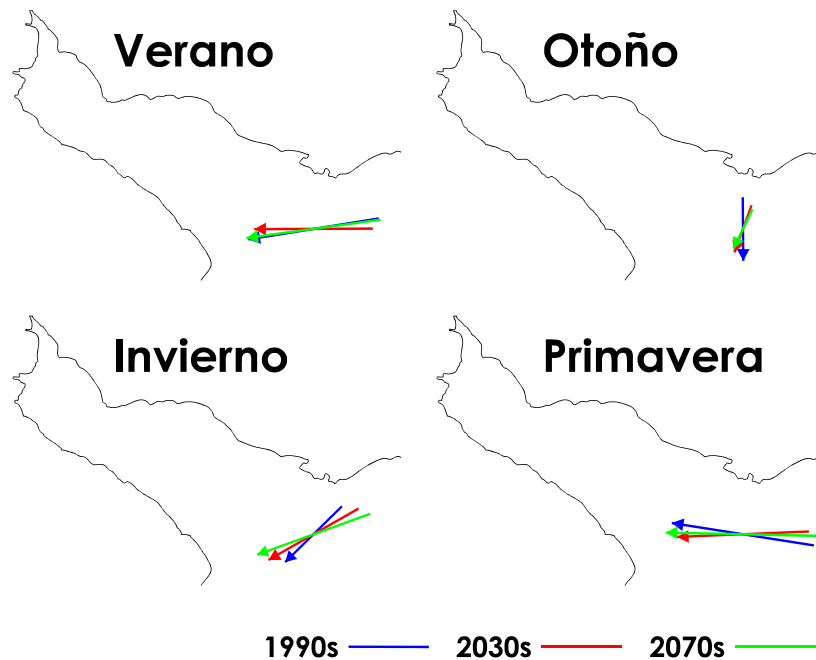


Figura VI-7 Intensidades y direcciones medias estacionales de viento en el Río de la Plata Exterior.

## **VI - 3 Resultados de las simulaciones**

### ***VI - 3.1 Niveles medios anuales***

A partir de los resultados de las cinco simulaciones realizadas (PRE 1990s, FUT 2030s med, FUT 2030s max, FUT 2070s med y FUT 2070s max) se calcularon los niveles medios anuales resultantes en el Río de la Plata y su Frente Marítimo. Para esto se promediaron mapas de niveles instantáneos obtenidos de la simulación, con una discretización temporal de dos horas.

En la figura VI-8 se observan los niveles resultantes de las simulaciones de los cinco escenarios elegidos, advirtiéndose que los cambios en el nivel medio del río están acompañados por el cambio en el nivel medio del mar.

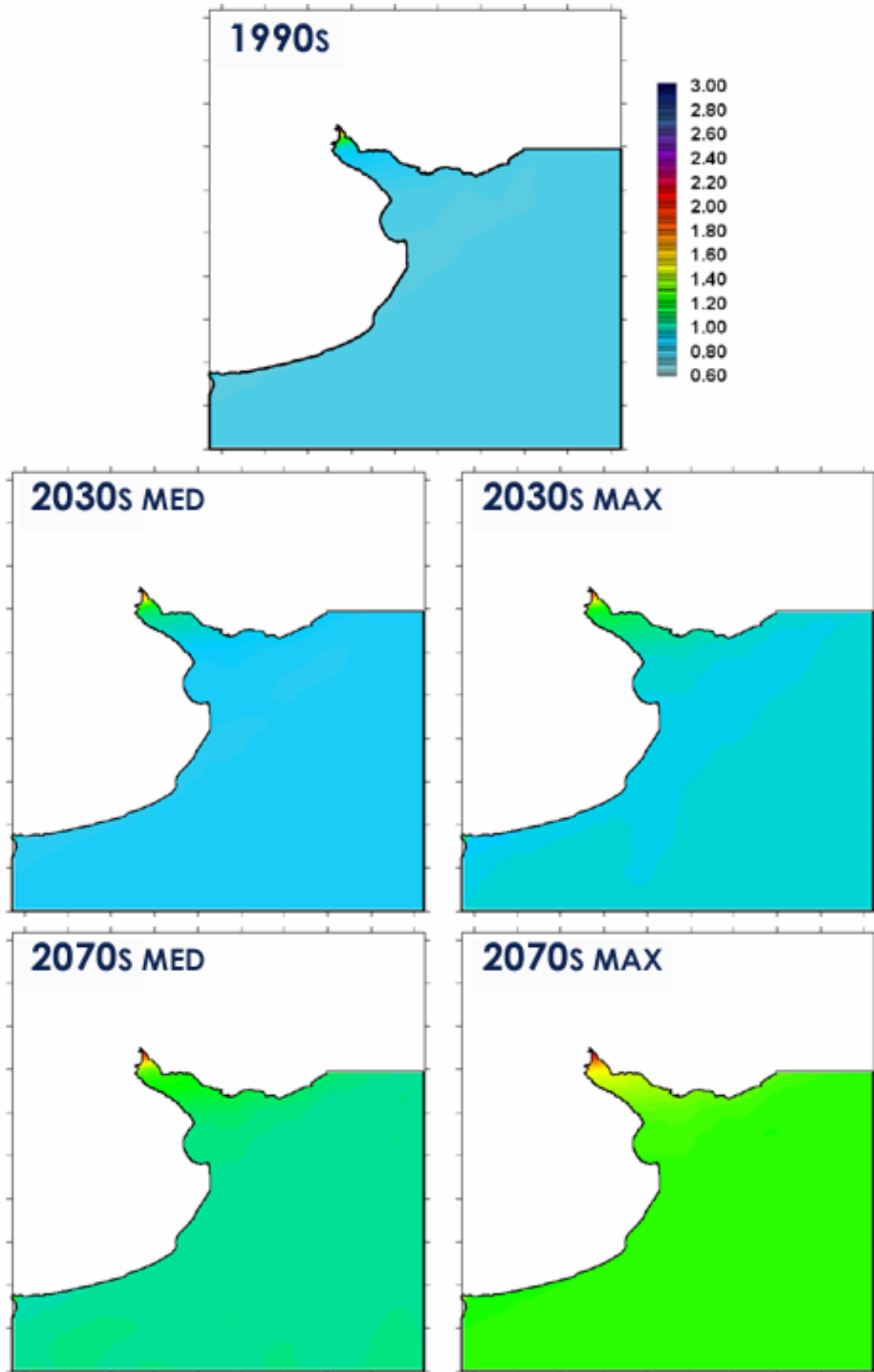


Figura VI-8 Niveles medios en el Río de la Plata y su Frente Marítimo (m).

Una observación de los niveles más detallada se plantea en las figuras VI-9 a VI-13. En todos los casos se distinguen tres regiones de niveles diferentes: una de niveles más altos en la zona de las desembocaduras de los tributarios, una con un fuerte gradiente de niveles en el Río de la Plata Interior y otra de menor variación en las cercanías del Frente Marítimo.

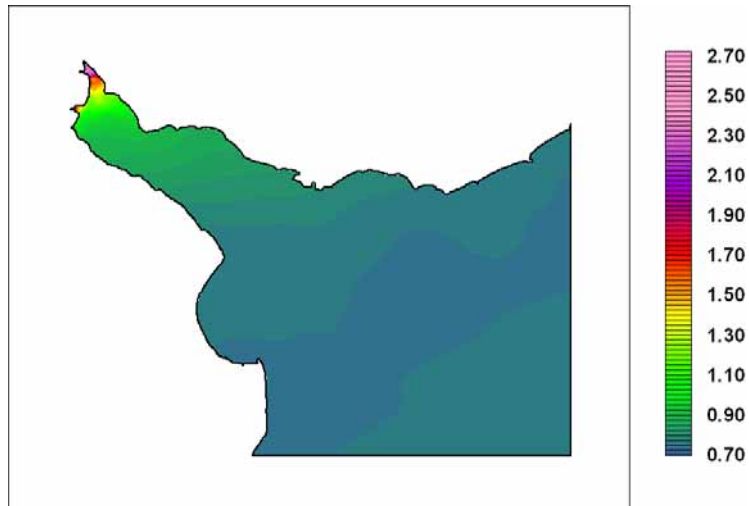


Figura VI-9 Niveles medios en el Río de la Plata, PRE 1990s (m).

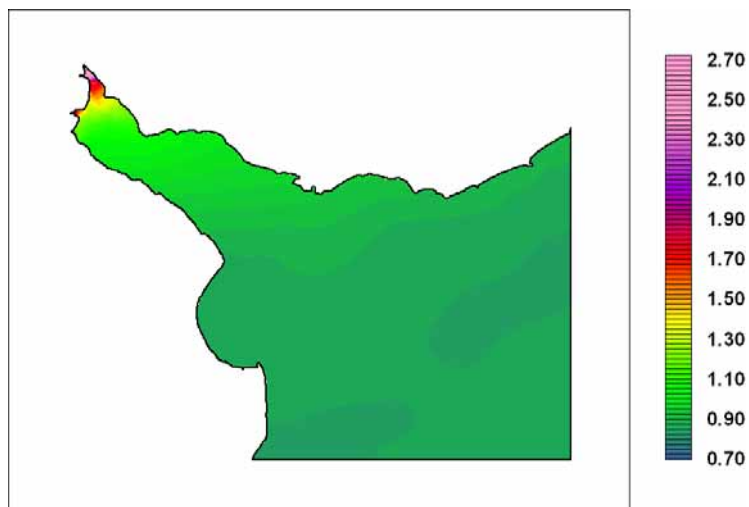


Figura VI-10 Niveles medios en el Río de la Plata, FUT 2030s med (m).

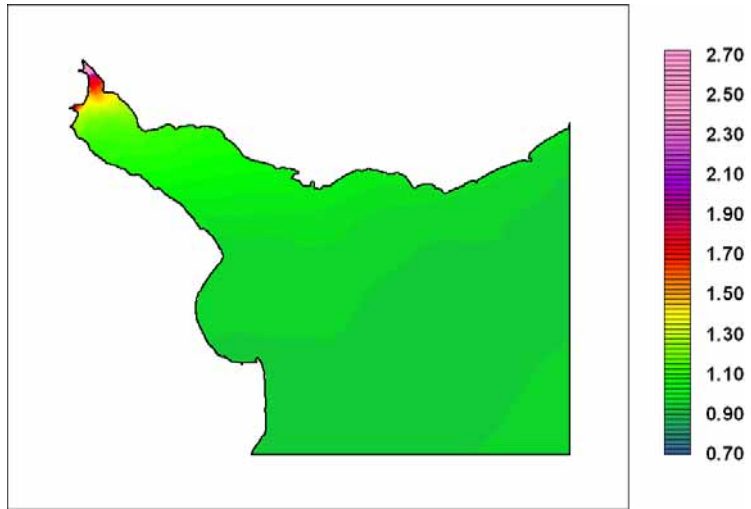


Figura VI-11 Niveles medios en el Río de la Plata, FUT 2030s max (m).

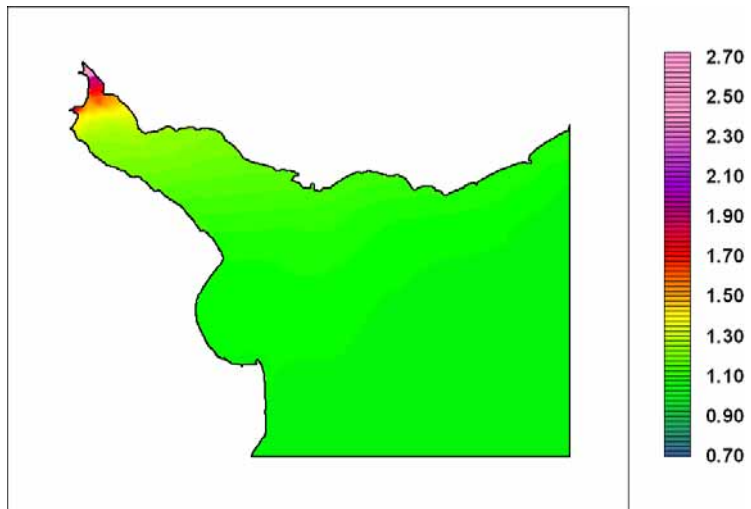


Figura VI-12 Niveles medios en el Río de la Plata, FUT 2070s med (m).

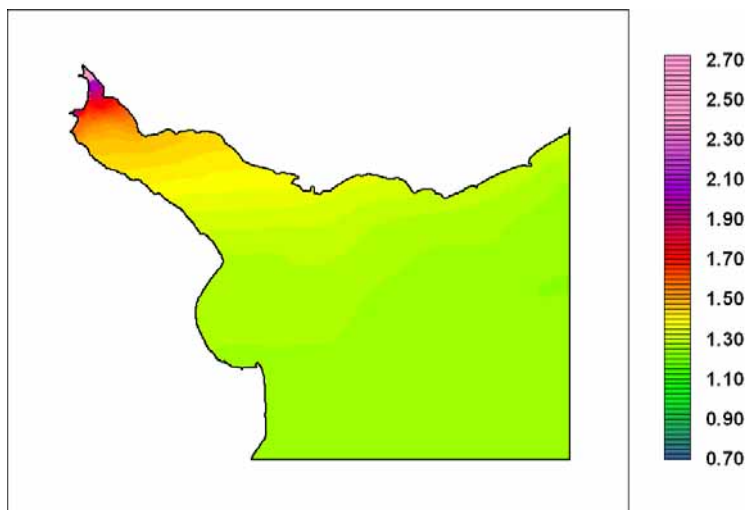


Figura VI-13 Niveles medios en el Río de la Plata, FUT 2070s max (m).

Analizando los niveles medios anuales y sus diferencias, en seis estaciones de control (Martín García, Buenos Aires, Colonia, La Plata, Montevideo y San Clemente), figuras VI-14 y VI-15, se notan aumentos mayores que el del nivel medio del mar en el Río de la Plata Interior, observándose los mayores cambios en la zona que contiene al eje Buenos Aires - Colonia. Los valores de cambio se muestran en forma detallada en las figuras VI-16 a VI-19

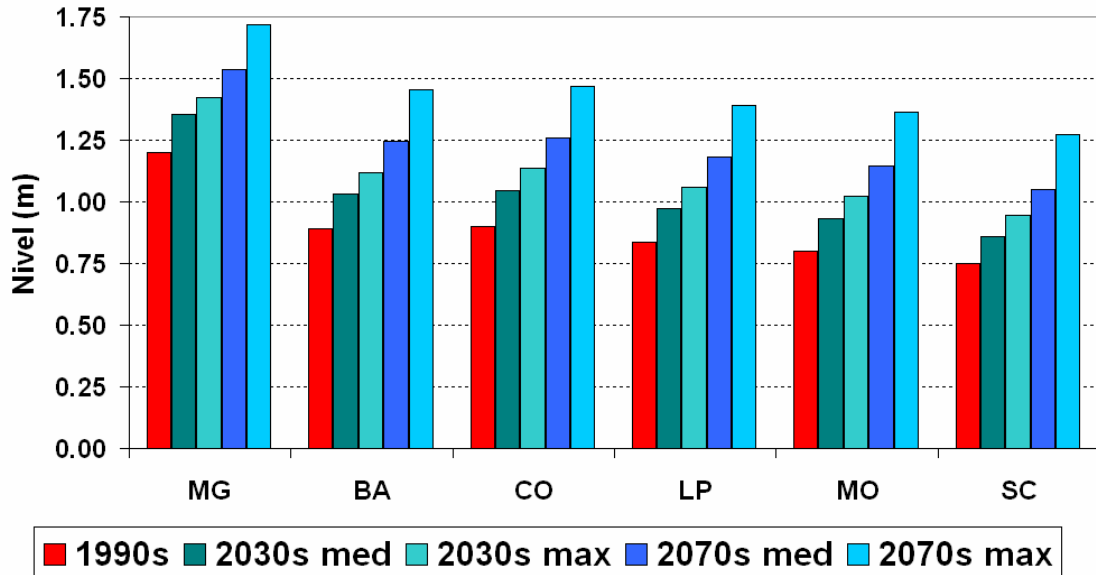


Figura VI-14 Niveles medios anuales obtenidos con el modelo RPP-2D

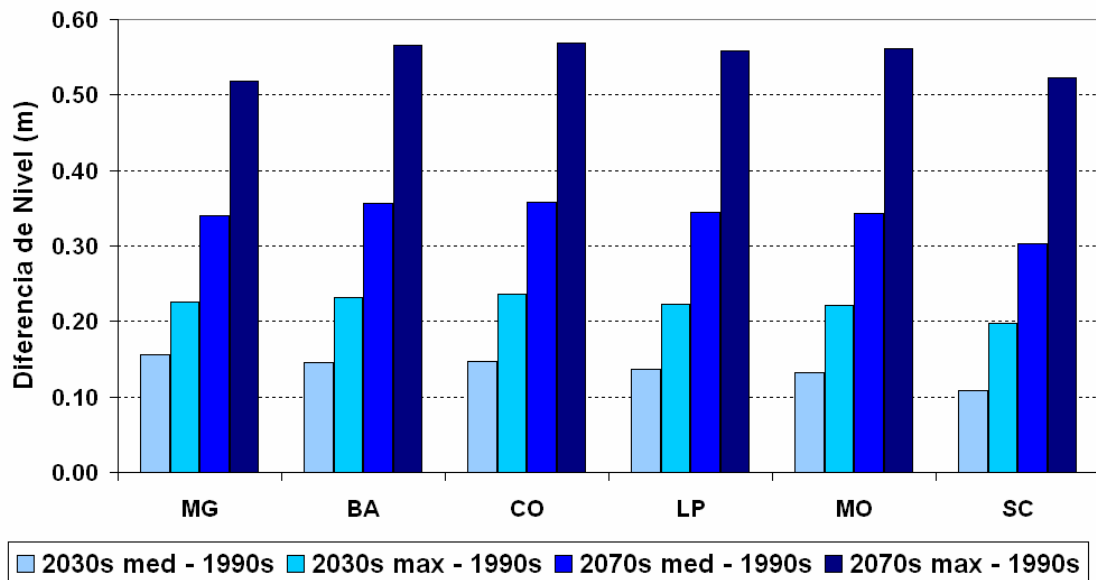


Figura VI-15 Diferencia de niveles medios anuales

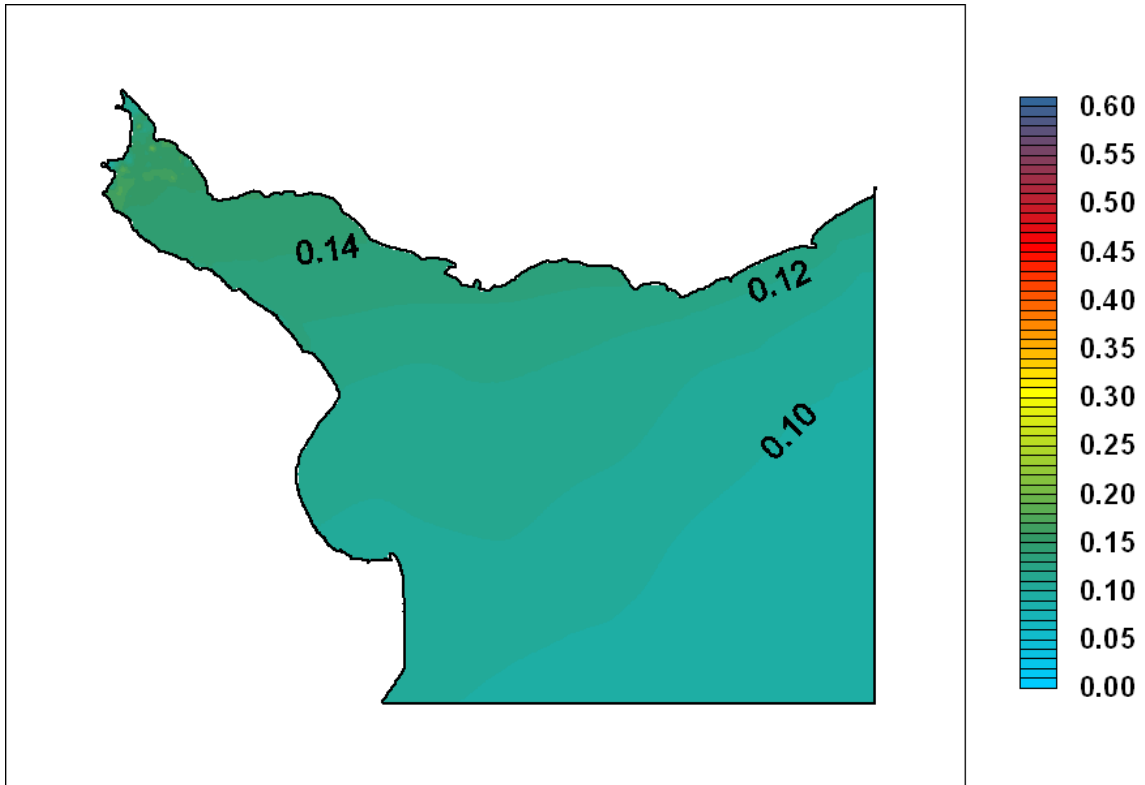


Figura VI-16 Diferencia de nivel medio, 2030s med – 1990s (m)

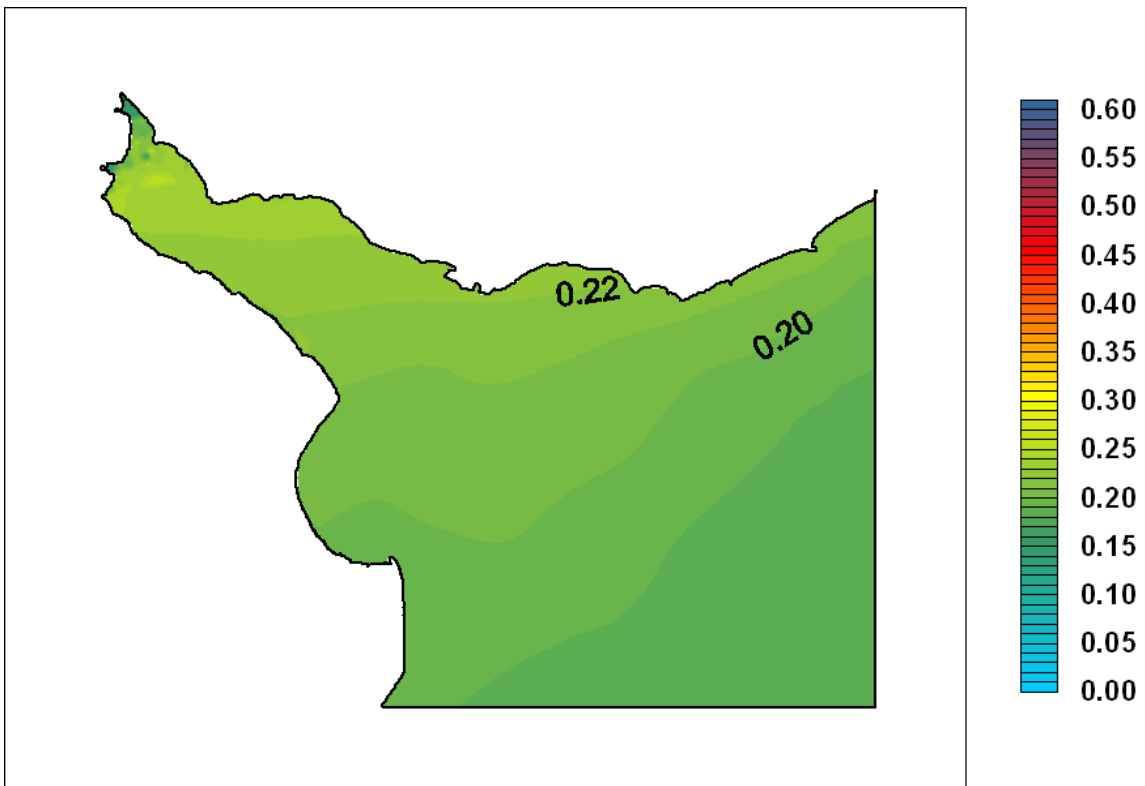


Figura VI-17 Diferencia de nivel medio, 2030s max – 1990s (m)

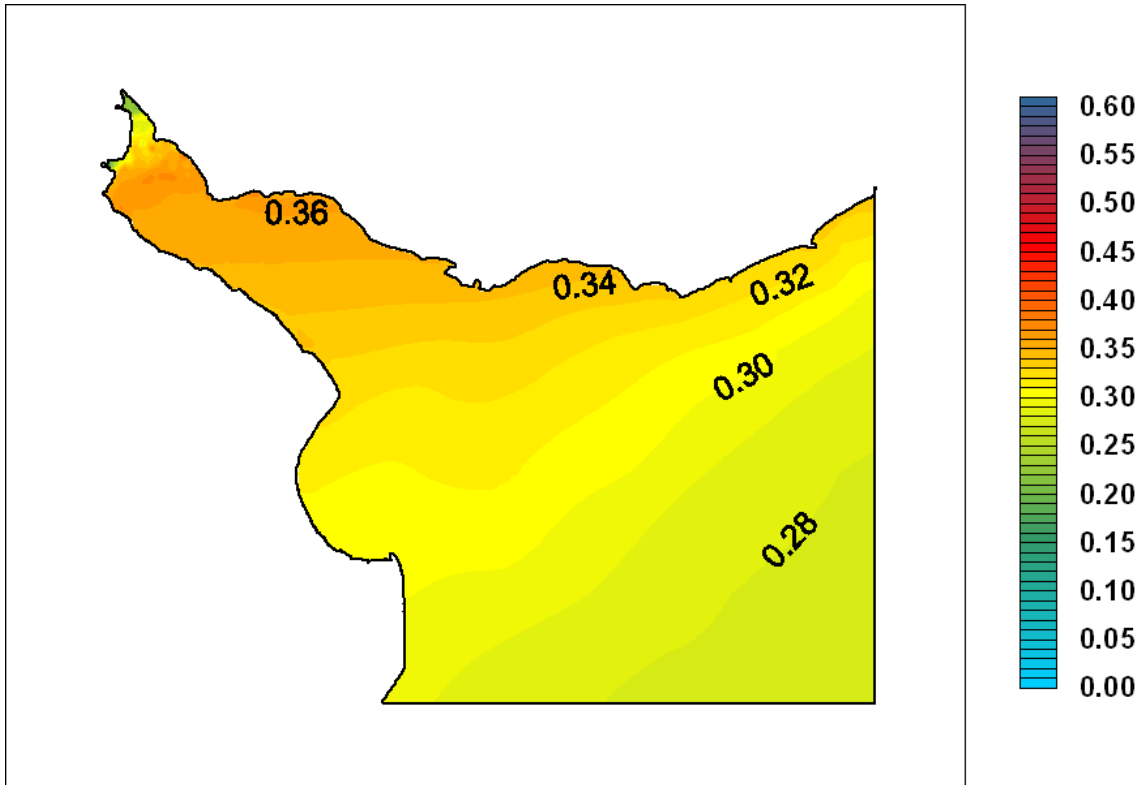


Figura VI-18 Diferencia de nivel medio, 2070s med - 1990s (m)

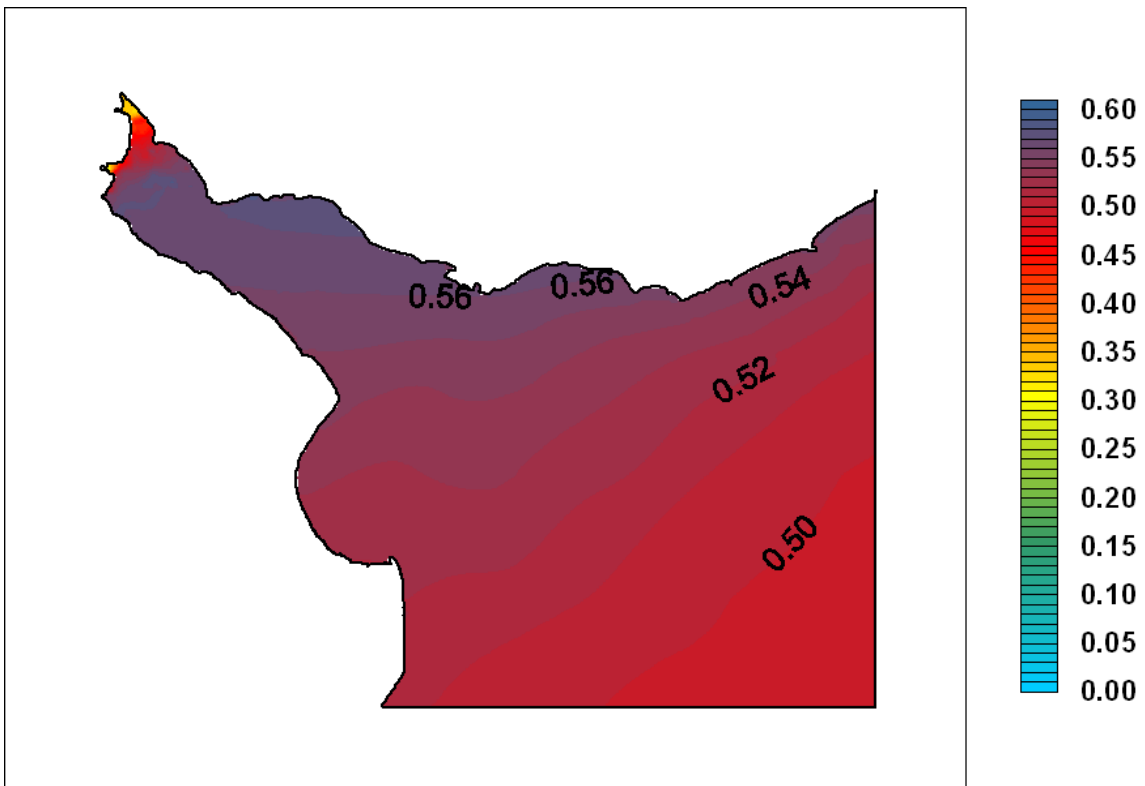


Figura VI-19 Diferencia de nivel medio, 2070s max - 1990s (m)

### VI - 3.2 Niveles medios estacionales

El cálculo de los niveles medios resultantes de las simulaciones para cada estación de año tuvo como objetivo detectar más claramente los periodos de mayor cambio. De igual manera, se tomaron los promedios de los resultados en cada celda del dominio del modelo RPP-2D mostrándose estos resultados en la figura VI-20.

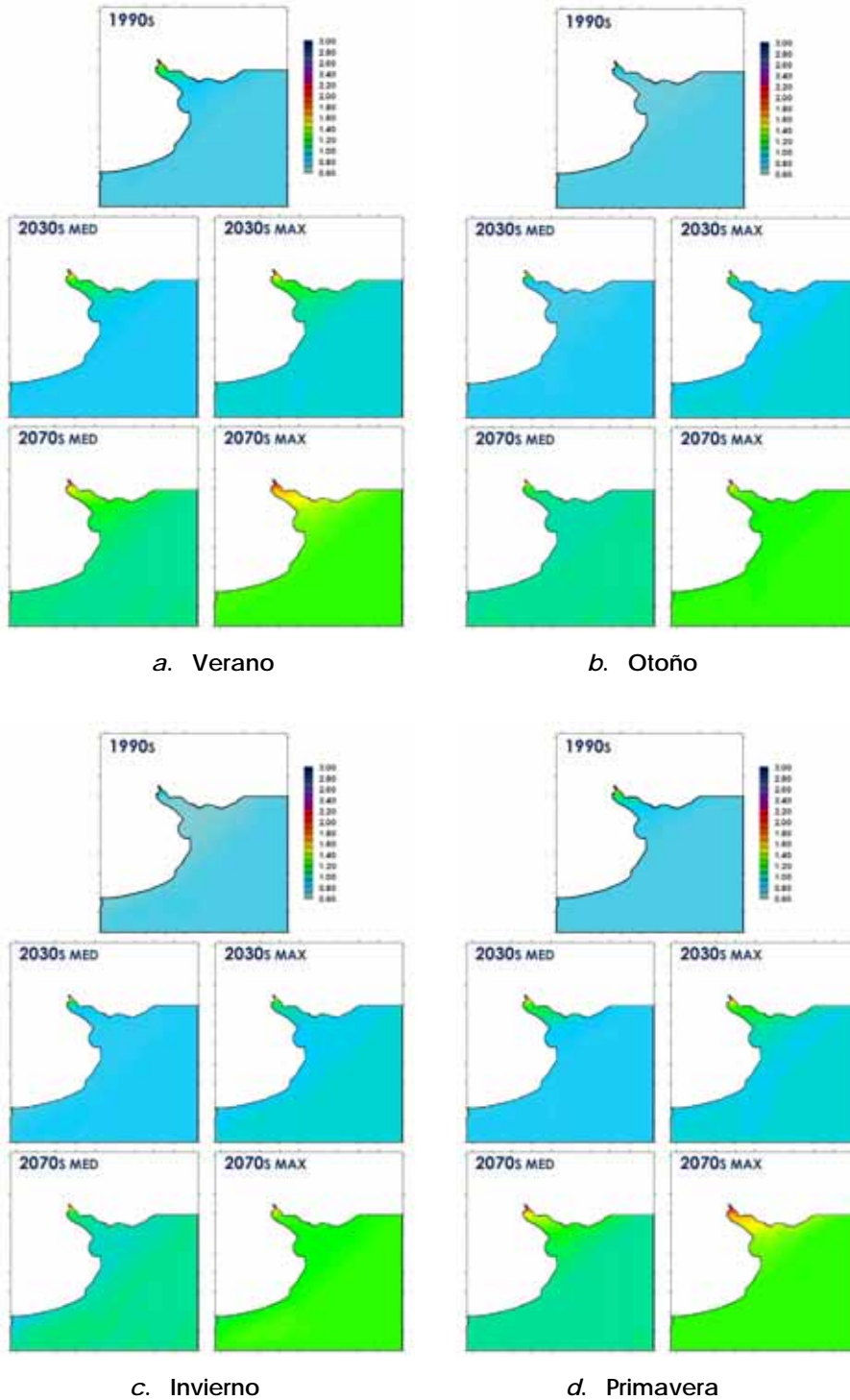


Figura VI-20 Niveles medios estacionales en el Río de la Plata (m).

Para seis de las estaciones de control costeras anteriormente identificadas se presentan en la figura VI-21 los niveles medios estacionales. Los mayores niveles medios se observan en el verano, mientras que en el invierno los menores. Respecto de los escenarios futuros, la mayor variación se da en el invierno, debido a que en la simulación de la situación presente se dan algunas bajantes importantes que luego de aumentos de nivel medio del mar dejan de serlo. En las figuras VI-22 y VI-23 se muestran las diferencias para los escenarios medios de las décadas de 2030 y 2070, destacándose en el primero la variación durante el invierno, mientras que en las VI-24 a VI-27 se ven detalladamente las diferencias para todos los escenarios.

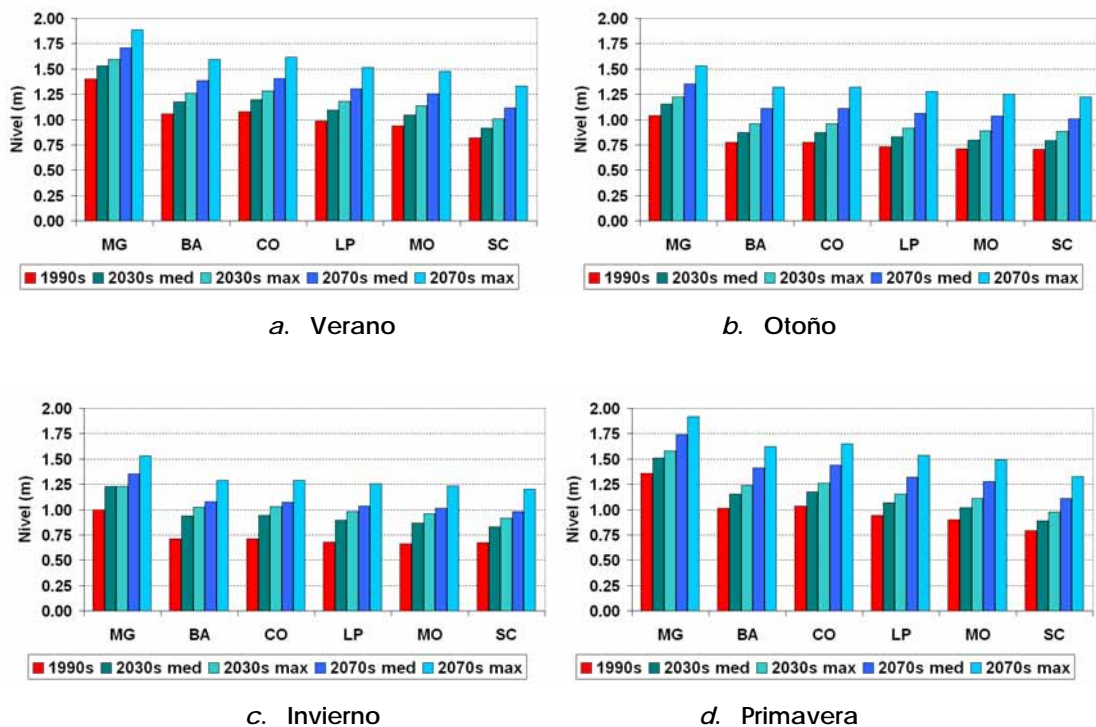


Figura VI-21 Niveles medios estacionales en el Río de la Plata (estaciones de control).

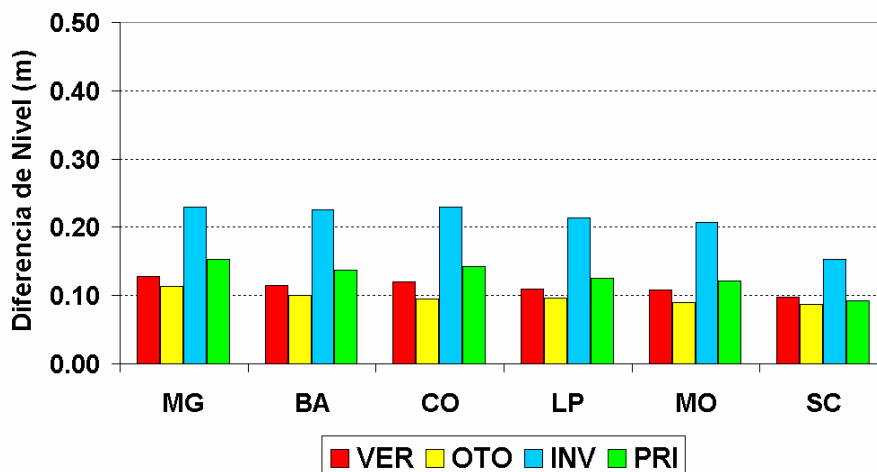


Figura VI-22 Diferencias estacionales de nivel medio (2030s med – 1990s)

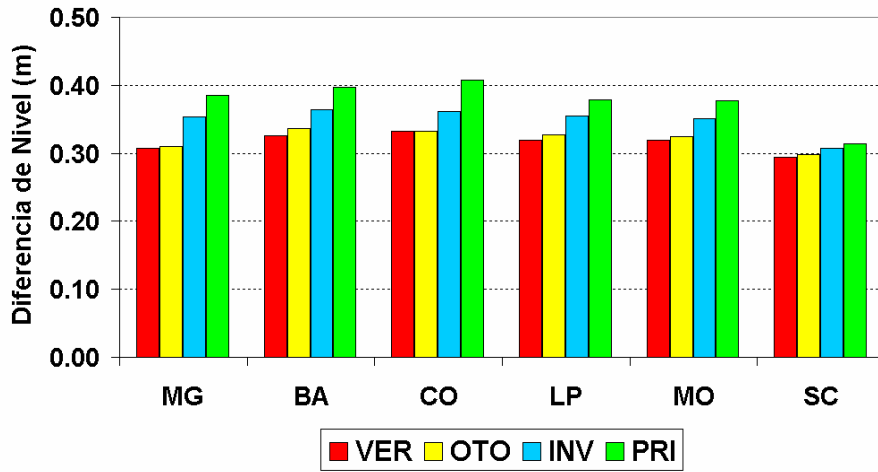


Figura VI-23 Diferencias estacionales de nivel medio (2070s med - 1990s)

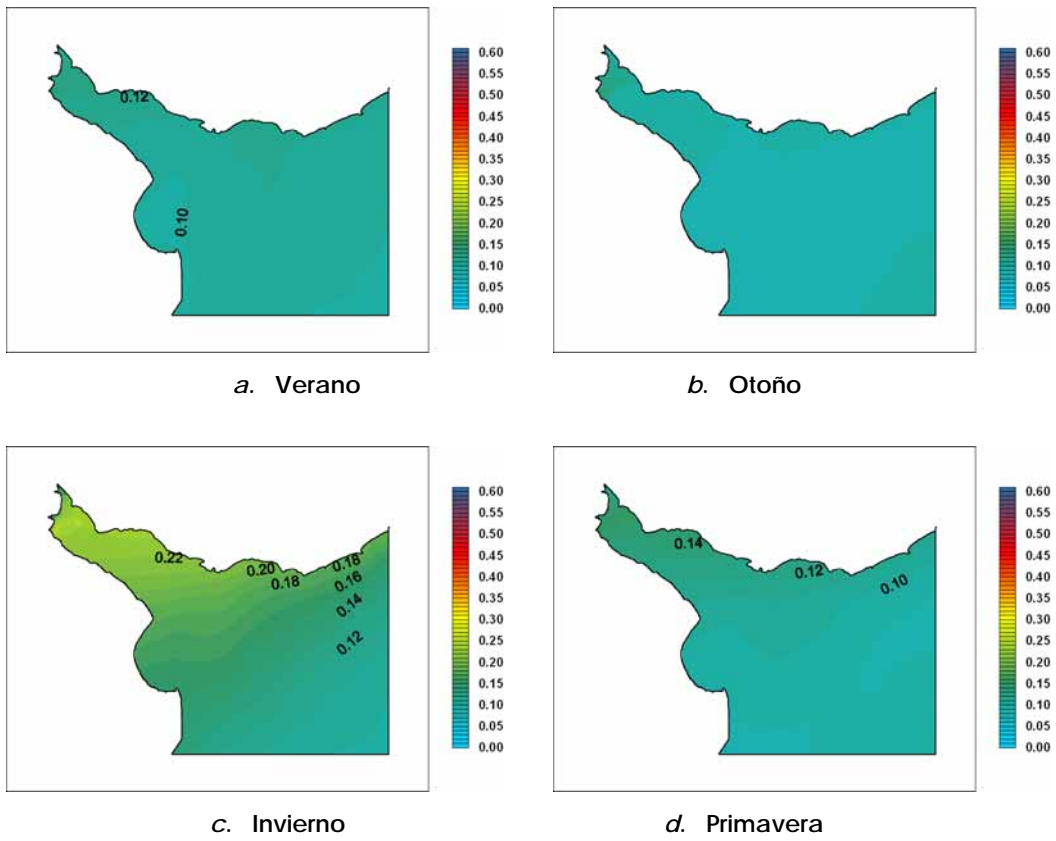


Figura VI-24 Diferencia de nivel medio, 2030s med - 1990s (m)

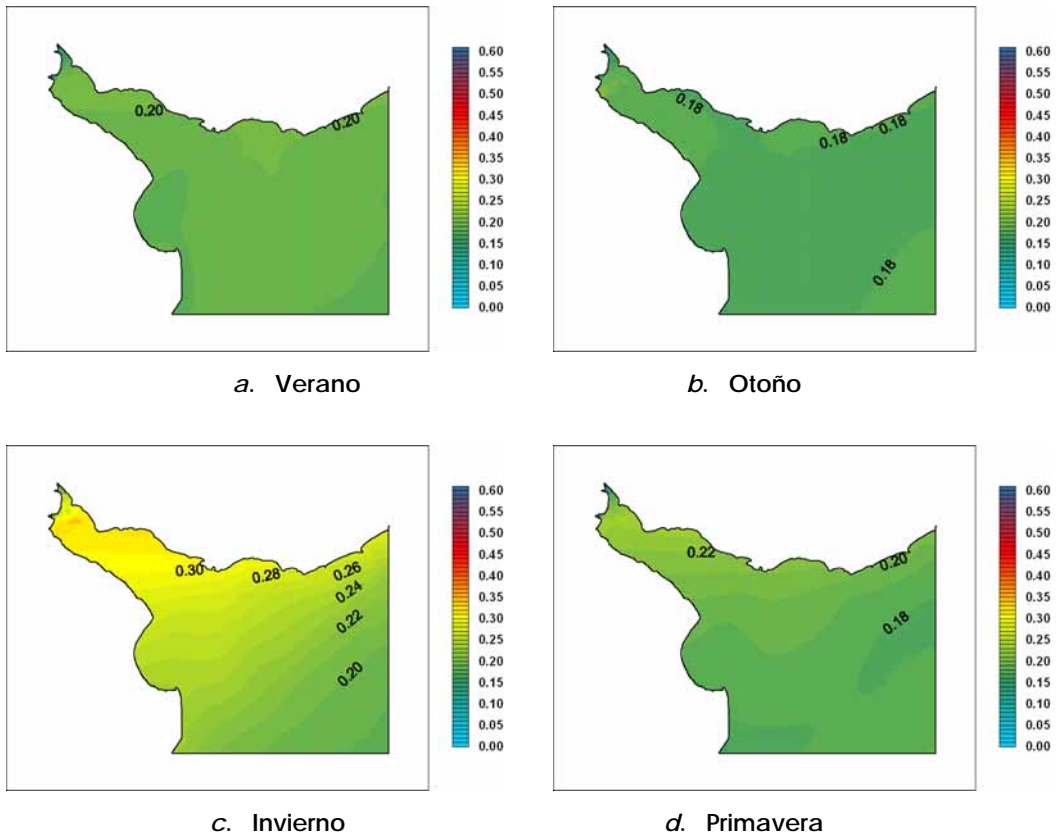


Figura VI-25 Diferencia de nivel medio, 2030s max - 1990s (m)

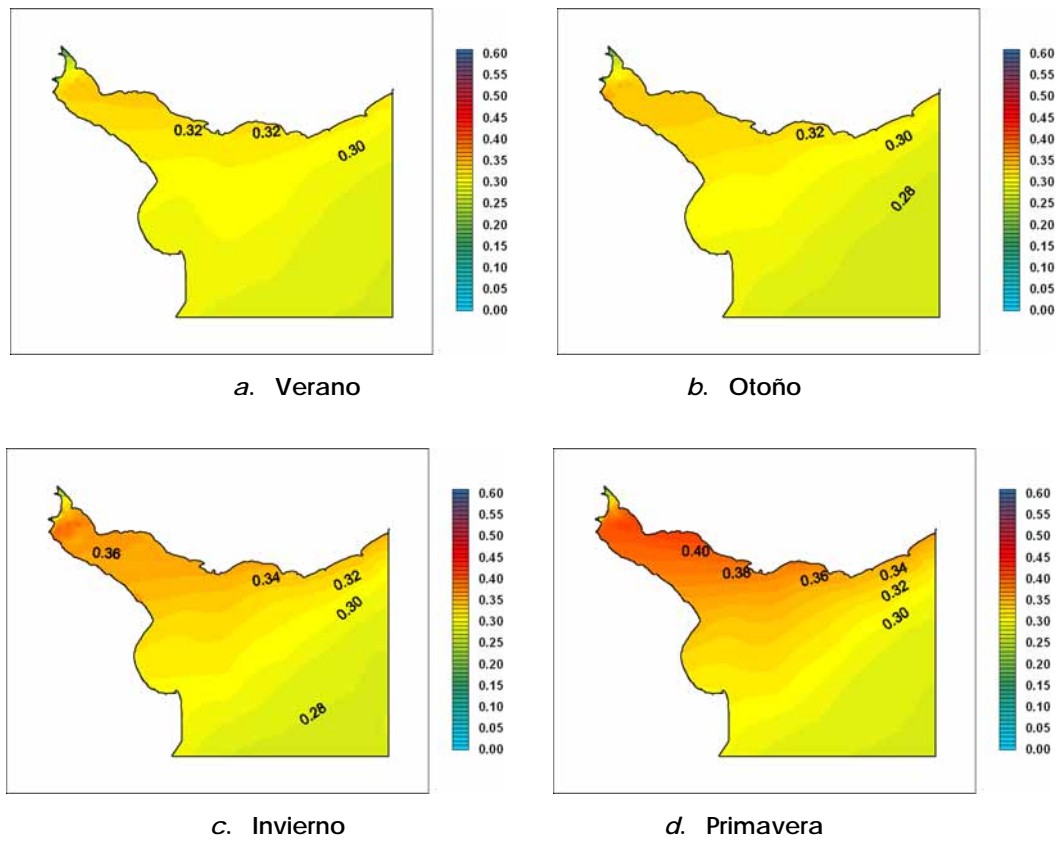


Figura VI-26 Diferencia de nivel medio, 2070s med - 1990s (m)

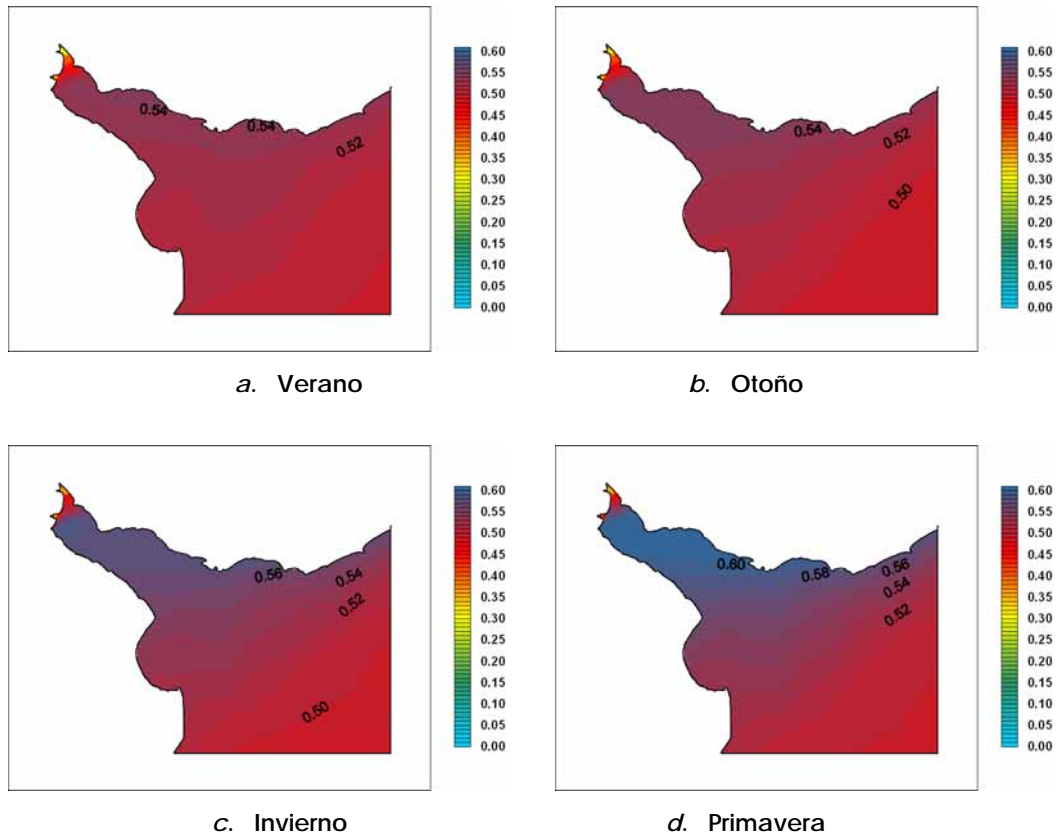


Figura VI-27 Diferencia de nivel medio, 2070s max – 1990s (m)

### VI - 3.3 Componentes del cambio

Resulta importante discernir entre las contribuciones de los distintos forzantes al cambio en los niveles medios del Río de la Plata para escenarios futuros. Anteriormente se planteó que el aporte de pequeños cambios en los caudales de los tributarios tiene escasa influencia en las variaciones de los niveles medios a escala anual y estacional. Por lo tanto, se analizaron solo los cambios que aporta cada uno de los dos forzantes que adoptan nuevas formas en los escenarios futuros, estableciéndose órdenes de magnitud de los mismos. Para esto, se ensayaron los escenarios 2030s med y 2070s med solamente variando los forzantes de interés con el objetivo de realizar las diferencias de niveles medios en la totalidad del Río de la Plata estableciendo valores de cambio respecto del ensayo del escenario 1990s. Para analizar los cambios en los niveles medios debidos a aumentos del nivel medio del mar, se realizaron los ensayos 1990s, 2030s med y 2070s med sin campos de vientos variando solo el nivel medio de la onda de marea que ingresa por el borde Sur del modelo RPP-2D (2030s med +10 cm y 2070s med +28 cm). Para los cambios debido a variaciones en los campos de vientos se efectuaron los mismos ensayos, con un mismo nivel medio del mar y los vientos correspondientes.

En la figura VI-28 se muestran las diferencias de niveles medios anuales debido a cambios en los niveles medios del mar. El nivel medio del Río de la Plata es muy sensible al cambio en el mar. Se mantienen, excepto en la zona de descarga de los tributarios (Martín García), prácticamente los mismos valores de aumento en casi la totalidad del río (Figuras VI-29 y VI-30).

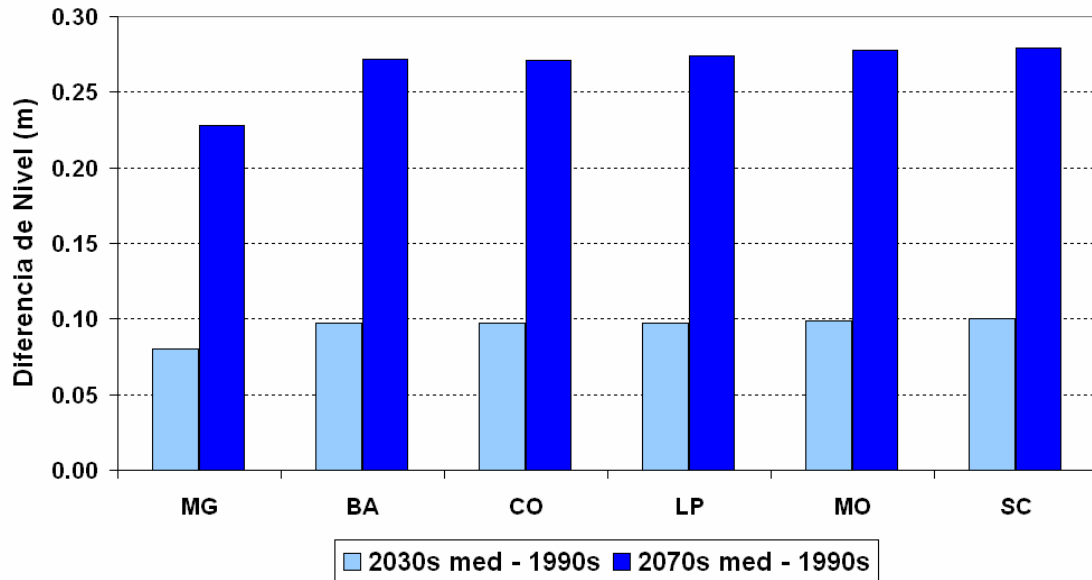


Figura VI-28 Diferencias nivel medio (solo aumento del nivel medio)

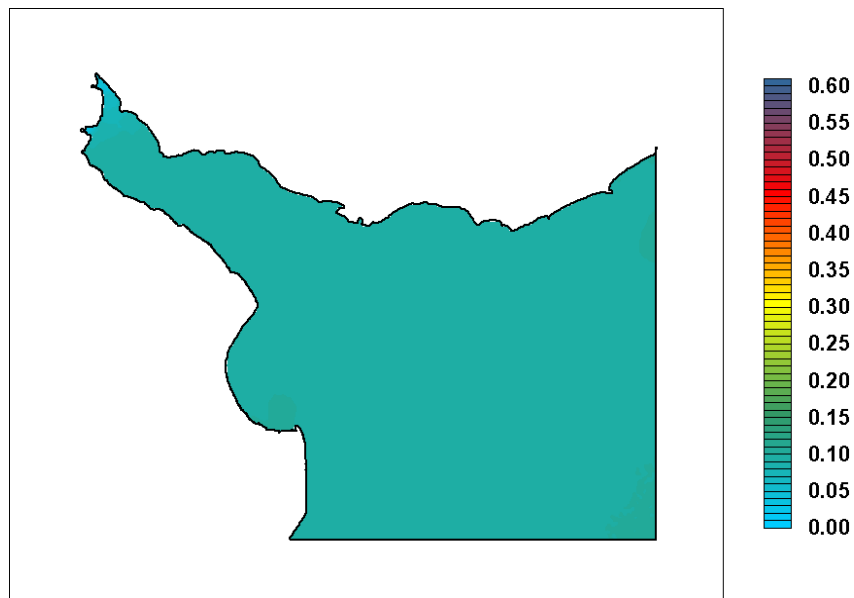


Figura VI-29 Diferencia nivel medio anual (solo aumento del nivel medio del mar, 2030s med - 1990s, m)

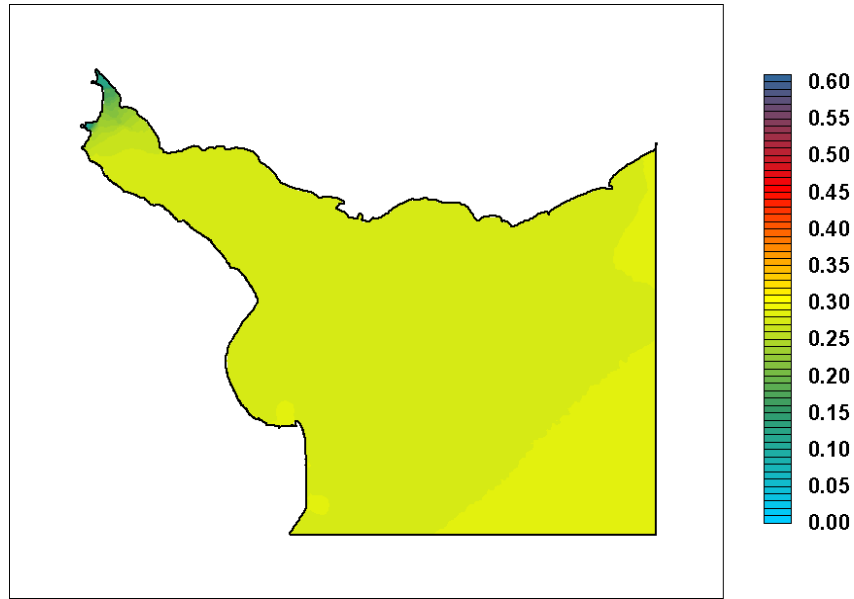


Figura VI-30 Diferencia nivel medio anual (solo aumento del nivel medio del mar, 2070s med - 1990s, m)

La respuesta del sistema a cambios solo en los campos de vientos es diferente de la anterior por magnitud y por escala temporal de variación. De los resultados obtenidos se concluye que los valores de cambio son crecientes hacia el interior del Río de la Plata (Figura VI-31). En las figuras VI-32 y VI-33 se ven claramente tres zonas: la región cercana a la descarga de los tributarios con cambios variables, la zona media y exterior del río con un gradiente constante de aumento del nivel medio y el Frente Marítimo sin mayores cambios.

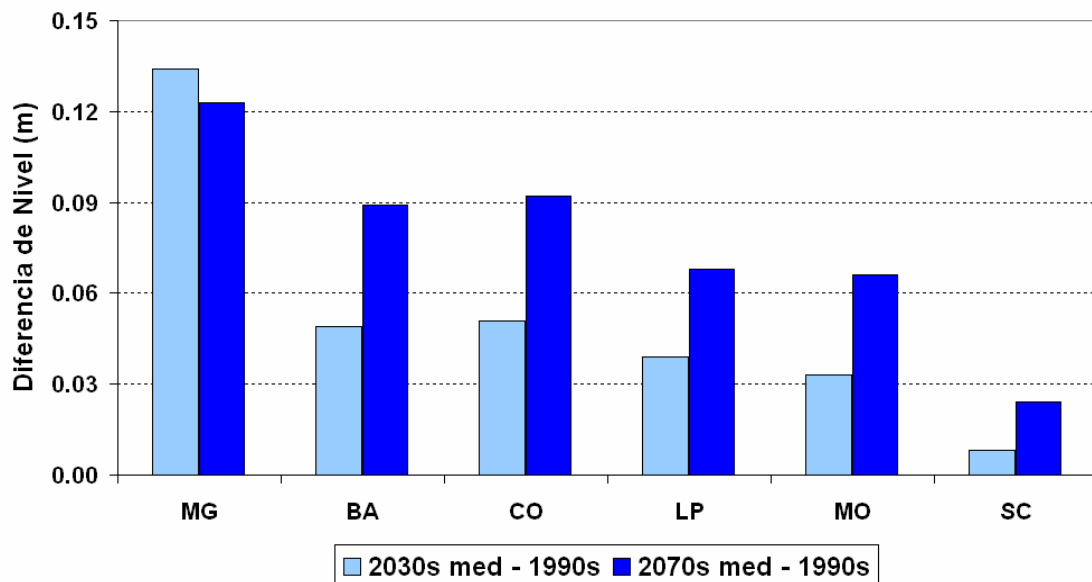


Figura VI-31 Diferencias de nivel medio (solo aumento del viento)

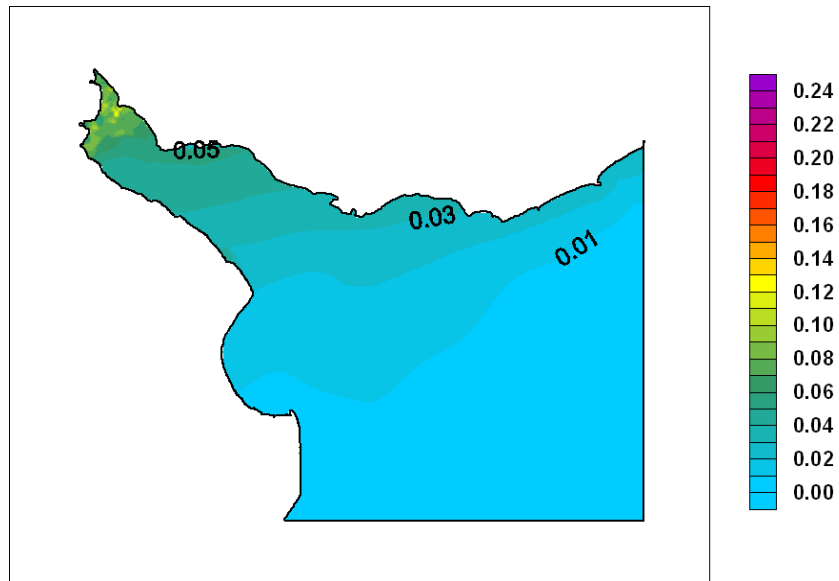


Figura VI-32 Diferencia nivel medio anual (solo aumento del viento, 2030s med – 1990s, m)

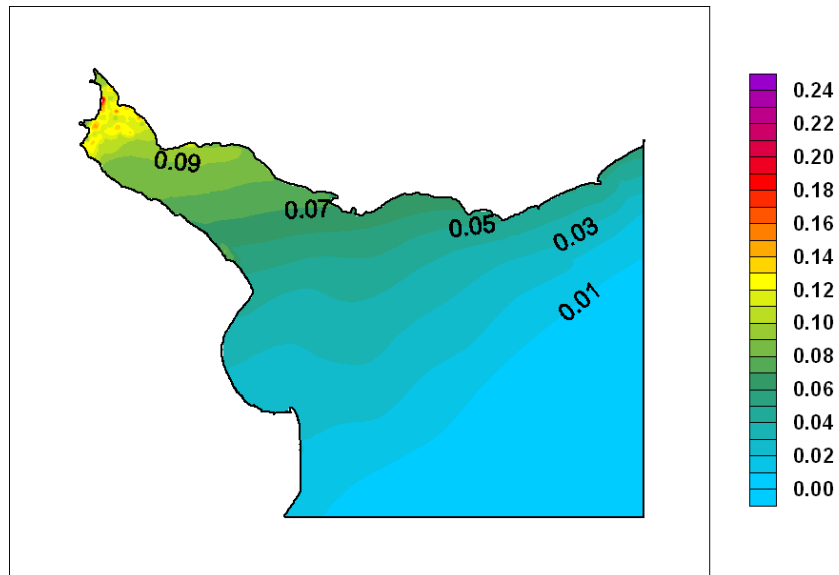


Figura VI-33 Diferencia nivel medio anual (solo aumento del viento, 2070s med – 1990s, m)

La componente estacional de los campos de vientos de los escenarios futuros tiene distintos comportamientos en cuanto a la variación de niveles en el Río de la Plata. Las figuras VI-34 y VI-35 muestran las diferencias de niveles medios para las cuatro estaciones del año. En los ensayos del escenario 2030s no se observan cambios en verano y otoño, destacándose las variaciones más importantes de nivel aportadas por el forzante viento en el invierno (del orden de los 10 cm). Para el escenario 2070s, tanto en verano, otoño e invierno, se ven cambios del mismo orden; en la primavera se agudizan estos alcanzando valores de hasta 20 cm en el interior del río.

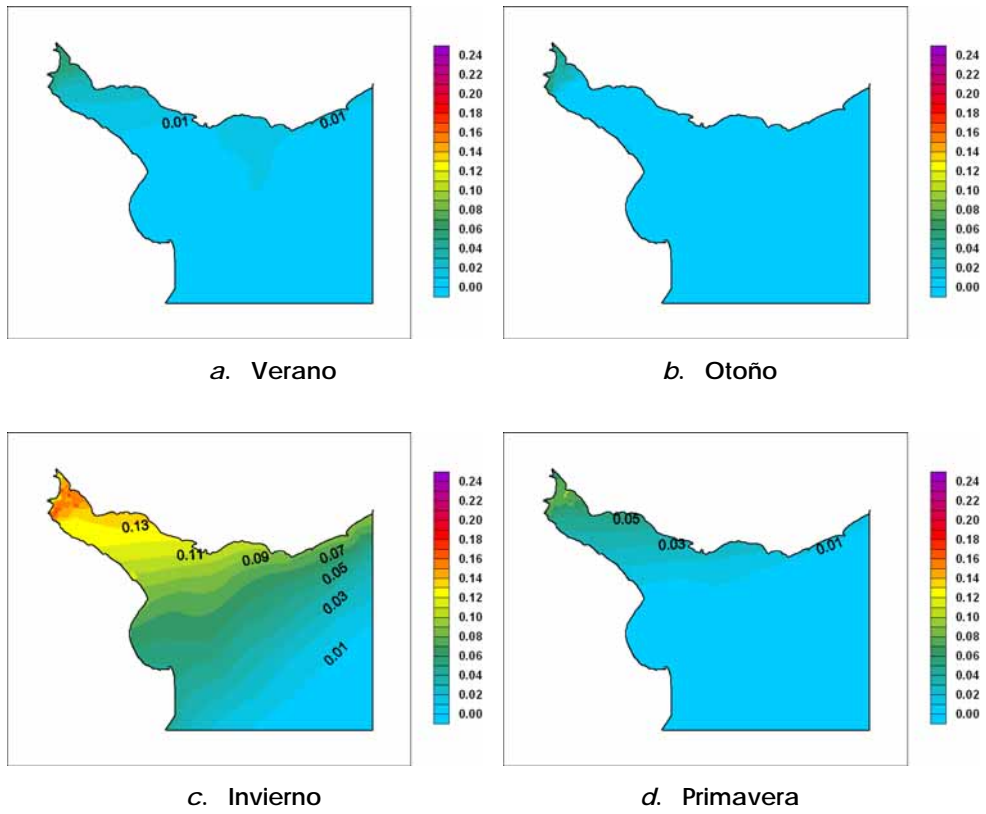


Figura VI-34 Diferencia de nivel medio estacional, 2030s med – 1990s (m)

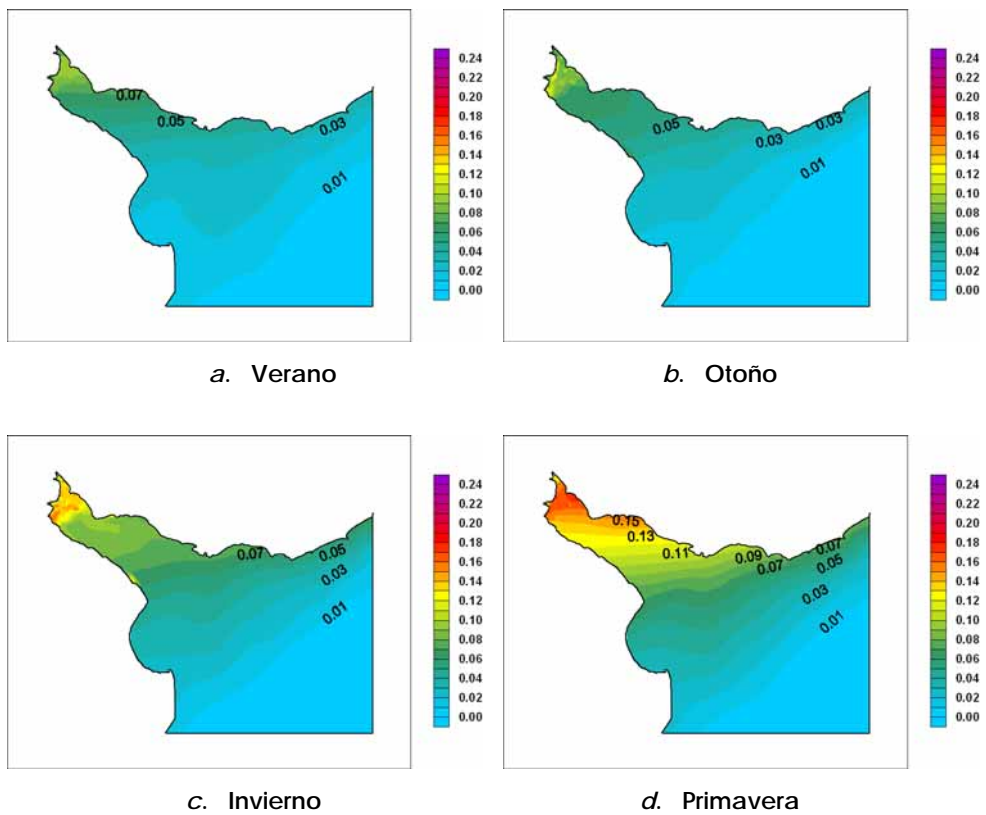


Figura VI-35 Diferencia de nivel medio estacional, 2070s med – 1990s (m)

## Capítulo VII Riesgo de inundación

### VII - 1 Escenario de riesgo

Los escenarios de riesgo de inundaciones en el Río de la Plata están caracterizados por la recurrencia de las ondas de tormenta, siendo las principales las asociadas a las Sudestadas.

Una importante superficie de costas argentinas del Río de la Plata se encuentra por debajo de los 5 m respecto del nivel del mar (Figura VII-1), incluyendo un área apreciable de la Región Metropolitana de Buenos Aires. Este territorio, a priori, resulta ser el envolvente de inundaciones recurrentes.

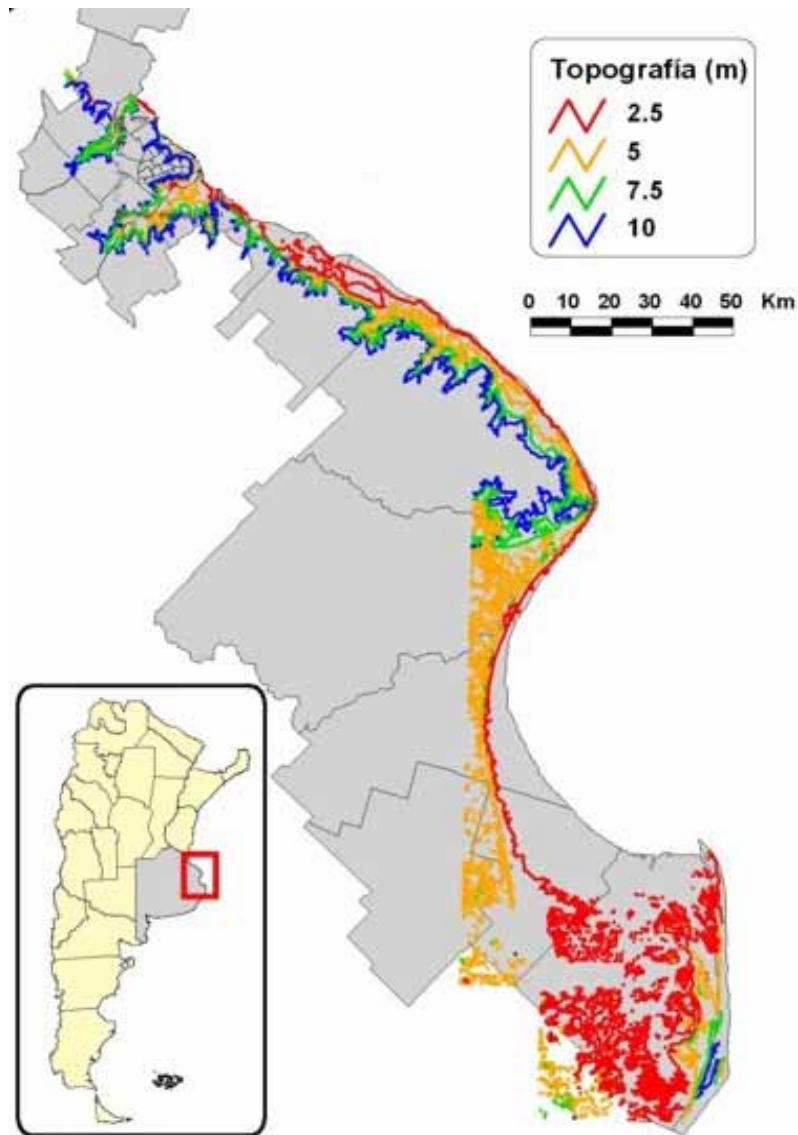


Figura VII-1 Topografía de la costa argentina del Río de la Plata

En la figura VII-2 se muestra la recurrencia de los niveles máximos anuales en Buenos Aires (referidos al nivel medio del mar), en base a datos del período 1905 - 2002 provistos por el SHN, obtenidos graficando sobre la escala de probabilidad de Gumbel. Todos ellos corresponden a eventos de Sudestadas. Dado que la muestra no es estacionaria (existen tendencias debido al cambio climático), se han representado los resultados considerando la serie total y la serie parcial 1970 - 2002, más representativa de las condiciones presentes. Se observa que si bien aparecen diferencias para las recurrencias menores (los niveles máximos actuales son mayores), estas no llegan a manifestarse claramente para períodos de recurrencia mayores a 5 años, de modo para esos períodos se tomó la serie total.

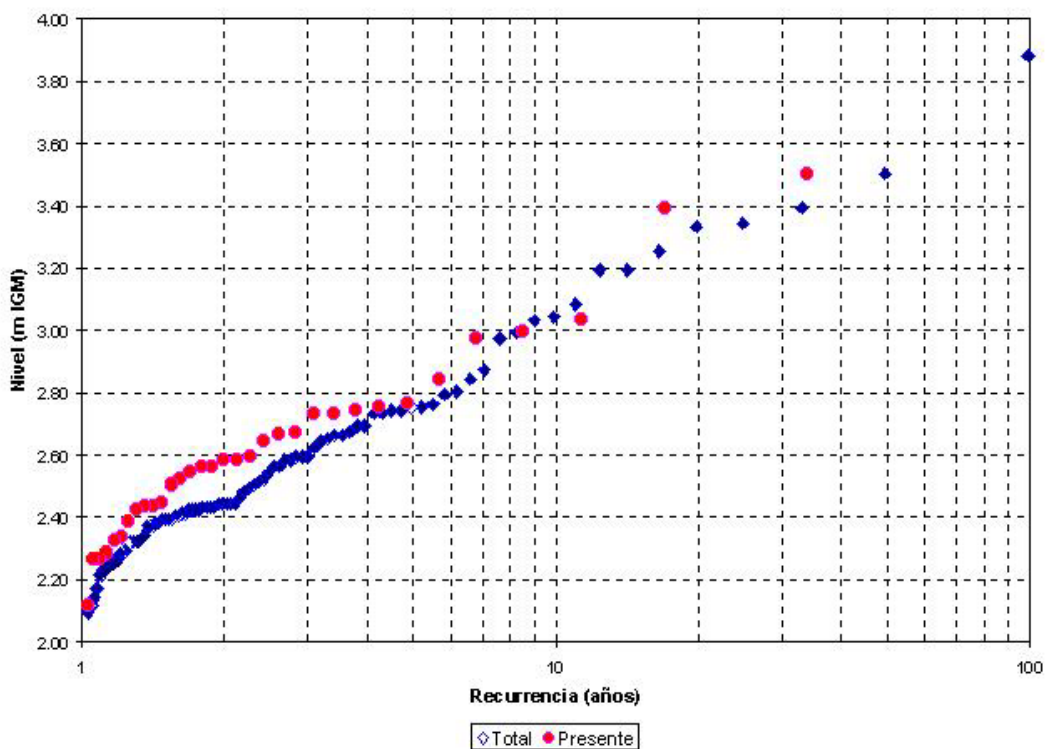


Figura VII-2 Recurrencia de niveles máximos anuales en Buenos Aires.

## VII - 2 Metodología de construcción de mapas de riesgo

Para construir los mapas de riesgo se utilizó como tormenta base la correspondiente al evento de mayor intensidad del año 2000, sucedido en el mes de mayo, que constituyó un pico importante y bien definido, y con una duración típica. Se construyeron, entonces, escenarios de tormenta sintéticos variando la intensidad del viento por medio de un factor, de modo de obtener una serie de niveles máximos en Buenos Aires correspondientes a distintas recurrencias: 1, 5, 10, 20, 50 y 100 años

(Tabla VII-1). En la figura VII-3 se muestran los niveles resultantes en Buenos Aires de la simulación de recurrencia 50 años.

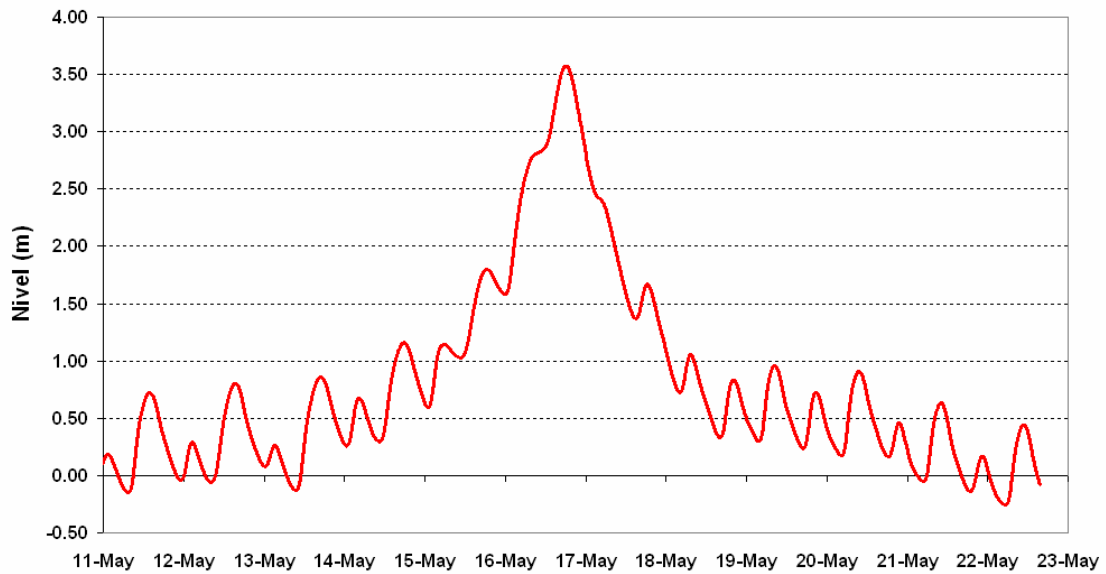


Figura VII-3 Nivel en Buenos Aires (Tormenta sintética con una recurrencia de 50 años)

Tabla VII-1 Máximos niveles registrados

Período de Retorno (años)	Nivel en Buenos Aires (m, IGM)
1	1.95
5	2.76
10	3.06
20	3.34
50	3.51
100	3.89

Se definieron 24 estaciones de control a lo largo de los aproximadamente 250 km de costa argentina, lo que da una separación media de alrededor de 10 km (Figura VII-4). Para cada una de ellas se almacenó la historia temporal del nivel de doce días de simulación, con un paso de 10 minutos. Luego se procedió a calcular la envolvente, encontrando el máximo de cada serie. También se obtuvo el momento de ocurrencia del pico correspondiente, relativo al instante de ingreso de la onda calculado como el momento del máximo en la estación de control E 24 (la más cercana a la desembocadura del Río de la Plata).

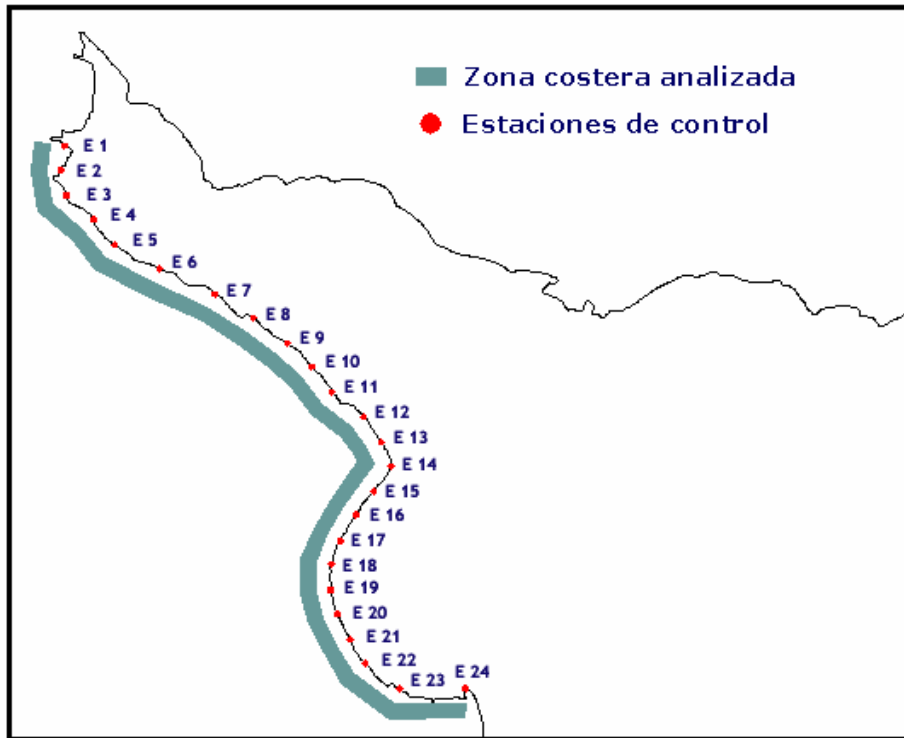


Figura VII-4 Estaciones de control (Costa argentina del Río de la Plata)

En la figura VII-5 se presentan los niveles máximos, representativos del escenario presente, obtenidos en cada una de las estaciones anteriormente mencionadas para el caso de tres tormentas cuyos niveles en Buenos Aires son de una recurrencia de 1, 10 y 100 años respectivamente (la distancia recorrida por la onda está referida a la estación E 24). Los mismos resultados se grafican de manera diferente en las figura VII-6 a VII-8, notándose la diferencia entre máximos según la zona del río.

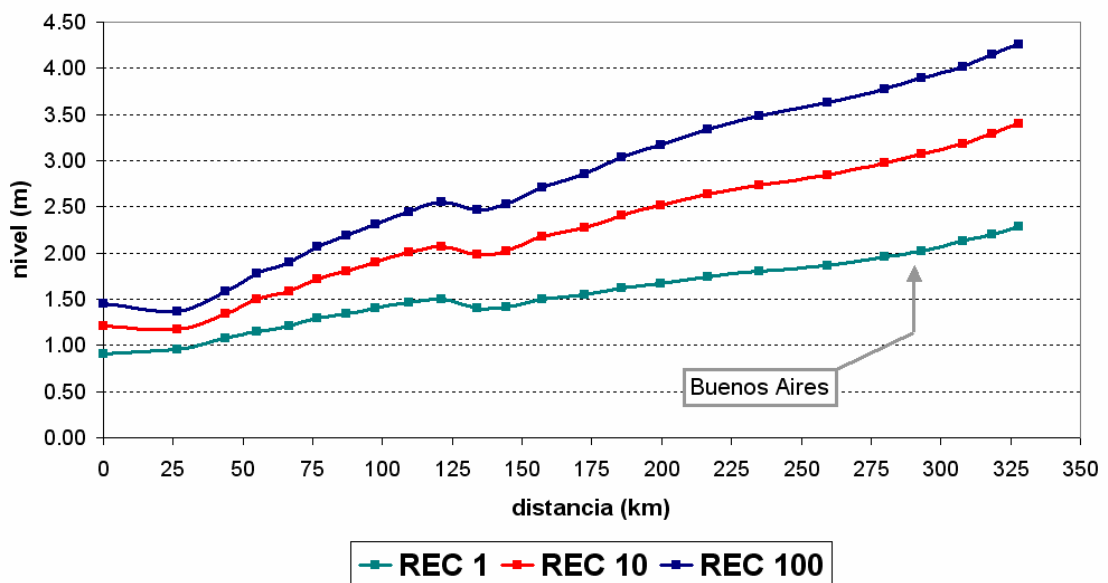


Figura VII-5 Niveles máximos en las distintas estaciones de control, para tormentas de recurrencia 1, 10 y 100 años (situación presente)

**Recurrencia = 1 año**

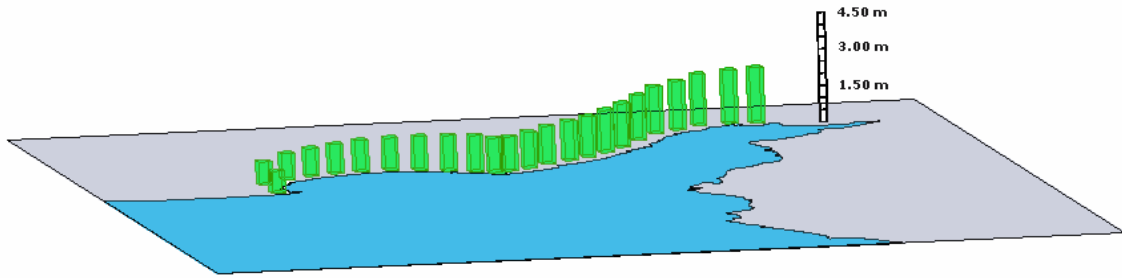


Figura VII-6 Niveles máximos en las distintas estaciones de control (recurrencia 1 año, situación presente)

**Recurrencia = 10 años**

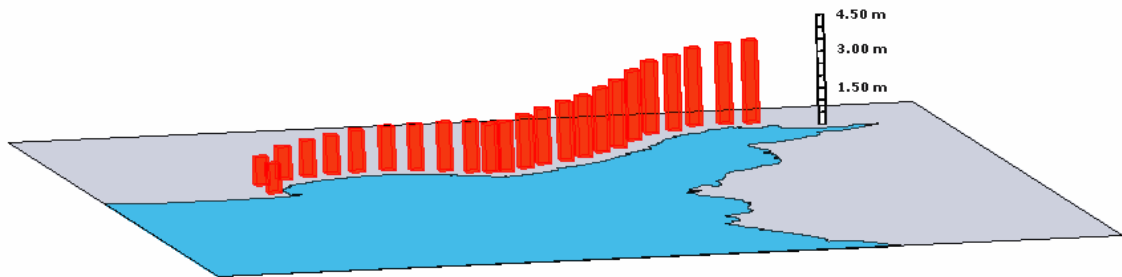


Figura VII-7 Niveles máximos en las distintas estaciones de control (recurrencia 10 años, situación presente)

**Recurrencia = 100 años**

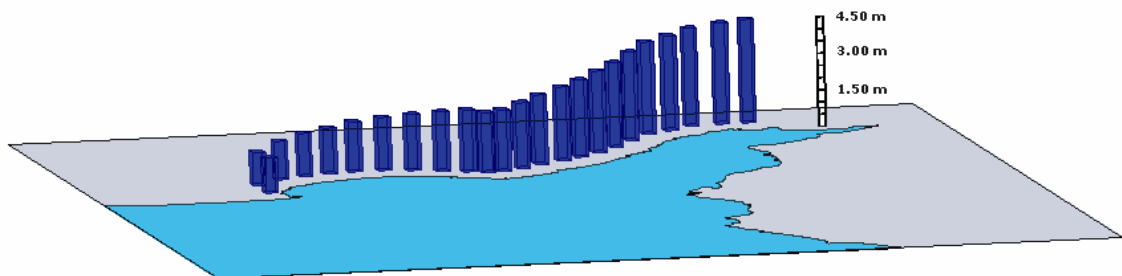


Figura VII-8 Niveles máximos en las distintas estaciones de control (recurrencia 100 años, situación presente)

Para los distintos escenarios PRE 1990s, FUT 2030s med, FUT 2030s max, FUT 2070s med y FUT 2070s max, se obtuvieron los máximos de cada simulación en todas las estaciones de control elegidas. En las distintas simulaciones, las condiciones de vientos se mantuvieron iguales para similares períodos de retorno en distintos escenarios, al igual que las descargas de los tributarios y las amplitudes de marea, variando en cada una de ellas los niveles medios del mar.

## VII - 3 Mapas de riesgo

### VII - 3.1 Inundación Permanente

Con los resultados obtenidos en las simulaciones de los escenarios futuros para analizar niveles medios (*Capítulo VI*), se buscó interpretar las zonas de la costa argentina del Río de la Plata que pasaban a estar inundadas permanentemente.

En la tabla VII-2 se muestran las diferencias de niveles medios anuales obtenidos de cada simulación en las estaciones de control anteriormente presentadas, respecto del escenario presente.

Tabla VII-2 Diferencias de niveles medios (inundación permanente)

Estación	DIF 2030s med – 1990s (cm)	DIF 2070s med – 1990s (cm)
E 1	0.13	0.28
E 2	0.17	0.36
E 3	0.17	0.37
E 4	0.15	0.36
E 5	0.14	0.35
E 6	0.14	0.35
E 7	0.15	0.36
E 8	0.15	0.35
E 9	0.14	0.35
E 10	0.14	0.34
E 11	0.14	0.34
E 12	0.13	0.33
E 13	0.13	0.33
E 14	0.12	0.32
E 15	0.12	0.32
E 16	0.12	0.32
E 17	0.12	0.32
E 18	0.11	0.31
E 19	0.11	0.31
E 20	0.11	0.31
E 21	0.11	0.31
E 22	0.11	0.30
E 23	0.11	0.30
E 24	0.11	0.30

Se observan las pequeñas diferencias que se dan a lo largo de toda la línea de costa para los distintos escenarios, crecientes hacia el interior del río. Estas diferencias no se traducen en pérdidas significativas de terreno. La estación E 1 tiene un comportamiento relativamente diferente de las demás debido a su cercanía con la descarga del Paraná de las Palmas.

Como resultado de estos análisis se puede concluir que la inundación permanente de grandes zonas en la costa argentina del Río de la Plata no es motivo de preocupación ante cambios en las condiciones de forzantes como los planteados en este ejercicio.

### VII - 3.2 Inundaciones recurrentes

Las figuras VII-9 a VII-14 muestran los valores máximos de nivel obtenidos en las estaciones de control de los distintos escenarios para las recurrencias de 1, 5, 10, 20, 50 y 100 años.

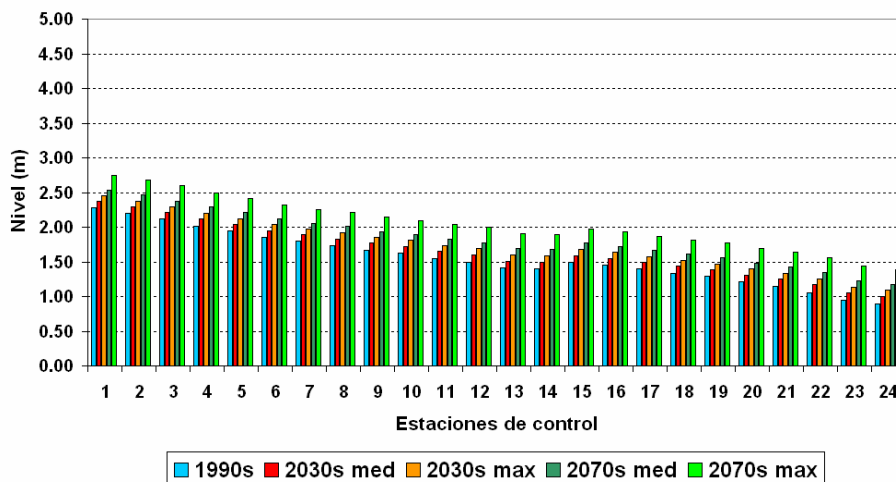


Figura VII-9 Nivel máximo en cada estación de control. Recurrencia 1 año.

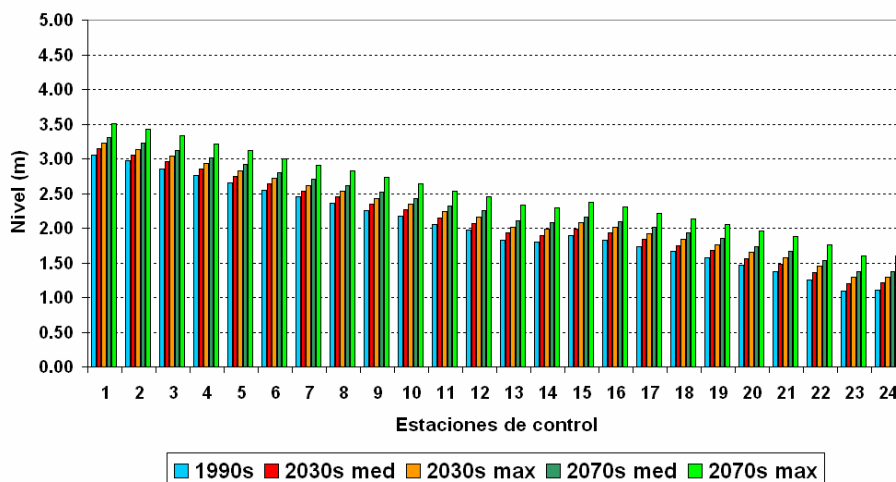


Figura VII-10 Nivel máximo en cada estación de control. Recurrencia 5 años.

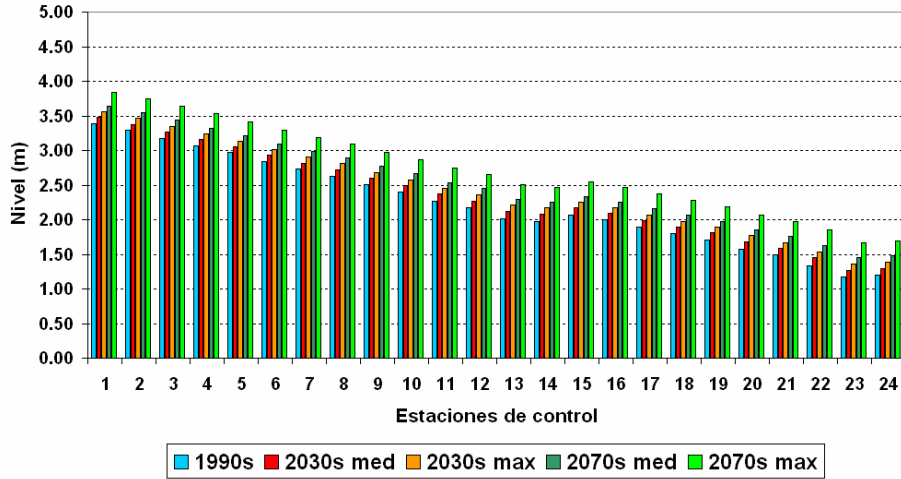


Figura VII-11 Nivel máximo en cada estación de control. Recurrencia 10 años.

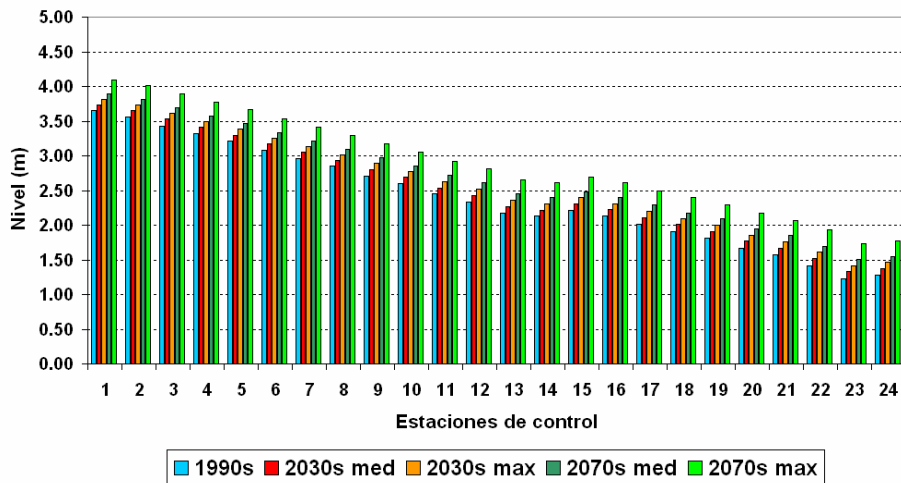


Figura VII-12 Nivel máximo en cada estación de control. Recurrencia 20 años.

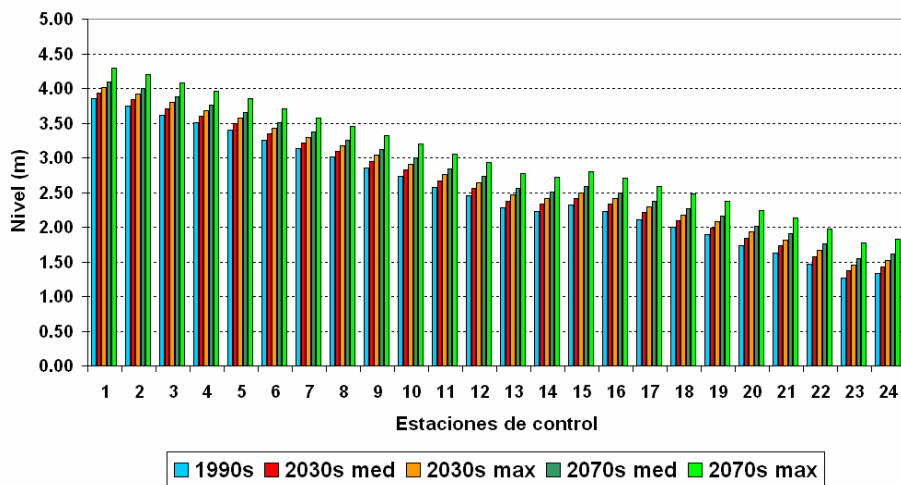


Figura VII-13 Nivel máximo en cada estación de control. Recurrencia 50 años.

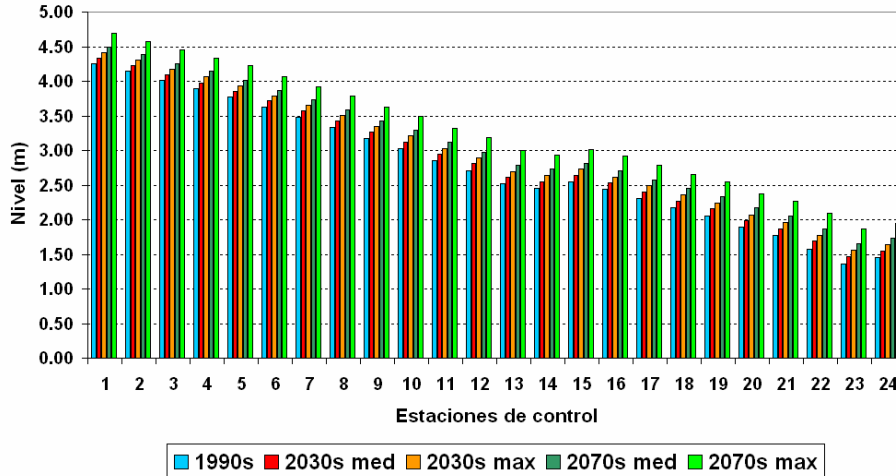


Figura VII-14 Nivel máximo en cada estación de control. Recurrencia 100 años.

Para las mismas recurrencias, se muestran en las figuras VII-15 a VII-18, las diferencias en cada estación de control de los niveles obtenidos en la línea de costa para los escenarios futuros respecto de la situación presente.

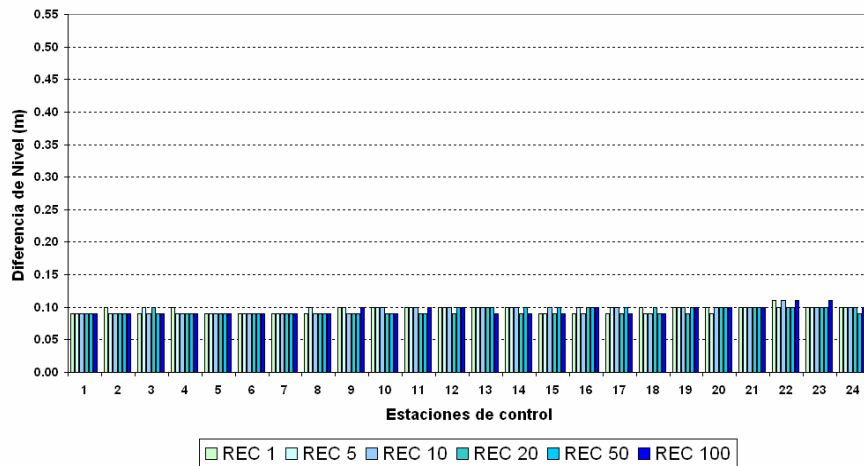


Figura VII-15 Diferencias de nivel (Tormentas 2030s – 1990s).

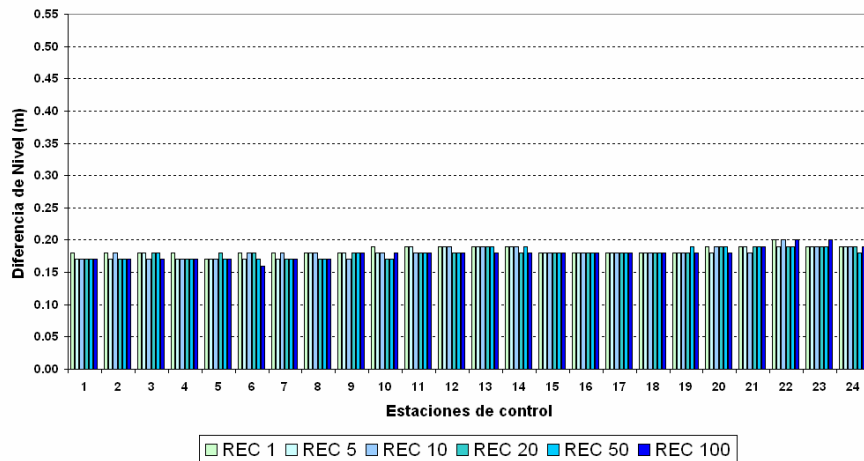


Figura VII-16 Diferencias de nivel (Tormentas 2030s max – 1990s).

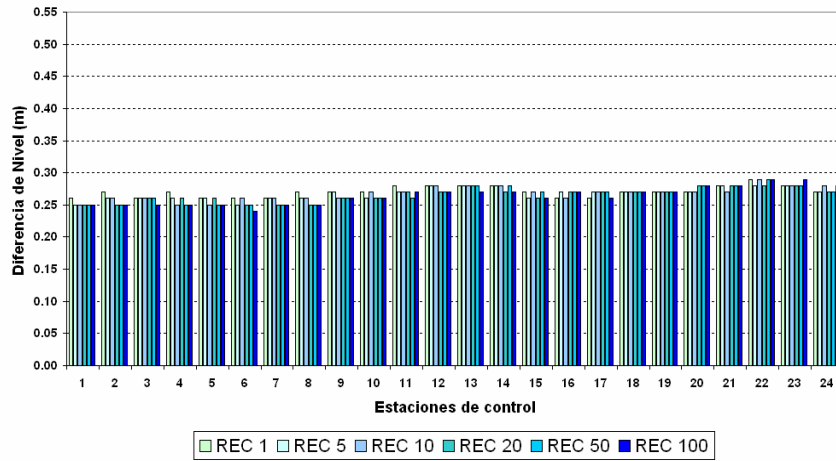


Figura VII-17 Diferencias de nivel (Tormentas 2070s – 1990s).

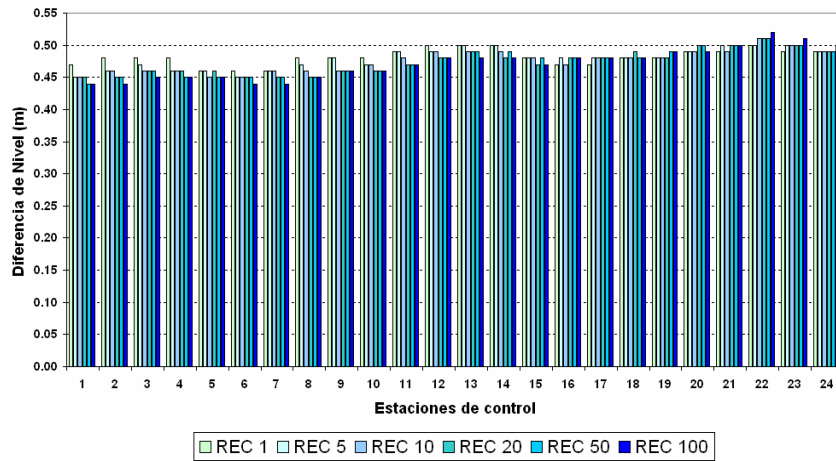


Figura VII-18 Diferencias de nivel (Tormentas 2070s max – 1990s).

También se obtuvieron los momentos en que los picos de cada simulación llegaron a cada estación de control. En la figura VII-19 se muestran los tiempos que tarda en recorrer la onda de tormenta la distancia entre la estación E 24 y la estación de control de Buenos Aires para cada recurrencia. Se destaca que a medida que aumenta la recurrencia de los eventos, comparando todos los escenarios, los tiempos de duración del recorrido de la onda tienden a igualarse.

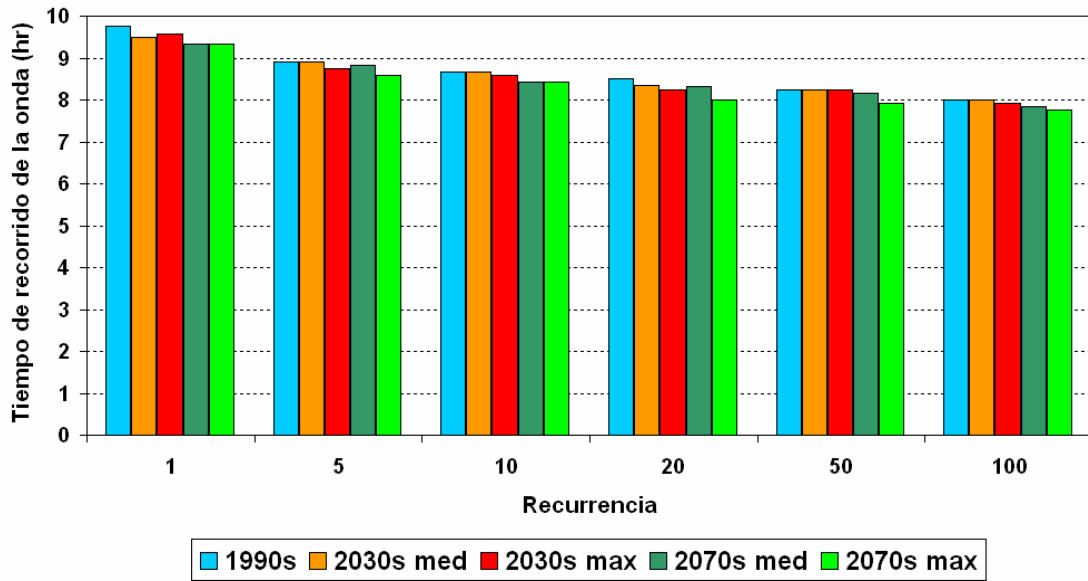


Figura VII-19 Tiempo de recorrido de la onda desde la estación E 24 hasta Buenos Aires

Con los resultados de las simulaciones con distintas recurrencias se construyeron los mapas de riesgo interpolando linealmente en los puntos intermedios de las estaciones de control, utilizando las herramientas de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Este sistema, fue implementado para las costas argentinas del Río de la Plata por el equipo de trabajo del PIRNA (Programa de Investigación en Recursos Naturales y Ambiente de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Buenos Aires) a partir de distintas fuentes de información (cartas topográficas del Instituto Geográfico Militar, datos topográficos de radar, etc.). Los nodos del SIG están separados cada 1000 m en sentido horizontal y vertical. A modo de ilustración, en la figura VII-21 se muestran las zonas de inundación para una recurrencia de 100 años en la Región Metropolitana de Buenos Aires (escenarios PRE 1990s, FUT 2030s med y FUT 2070s med).



Figura VII-20 Zonas inundables (Región Metropolitana de Buenos Aires, recurrencia 100 años)

Los mapas de riesgo de inundación para distintas recurrencias resultantes se muestran en las figuras VII-21 a VII-26. Los escenarios elegidos para la graficación resultaron ser los medios de las tres décadas estudiadas, más el escenario máximo de la década de 2070. El escenario máximo de la década 2030 no se analizó debido a la poca diferencia, observable en las costas, entre el aumento del nivel medio del mar para condiciones medias y máximas.

En los mapas resultantes se distinguen tres zonas claramente vulnerables: el Frente del Delta del Paraná, la franja costera que va desde Berisso – Ensenada hasta Berazategui – Quilmes y la región Sur de la Bahía Samborombón. La zona más urbanizada no se ve amenazada de manera importante; sin embargo, en las márgenes de los ríos Matanza – Riachuelo y Reconquista (afluentes del Río de la Plata) se puede ver riesgo de inundación en los escenarios futuros. La zona de mayor impacto territorial de las inundaciones resulta ser la Bahía Samborombón, ya que tanto para el presente como para los escenarios futuros, el avance del agua en eventos de recurrencias mayores es importante ya que las pendientes de esa zona costera son muy bajas, características muy distintas de las de la zona de Berisso – Ensenada hasta Berazategui – Quilmes.

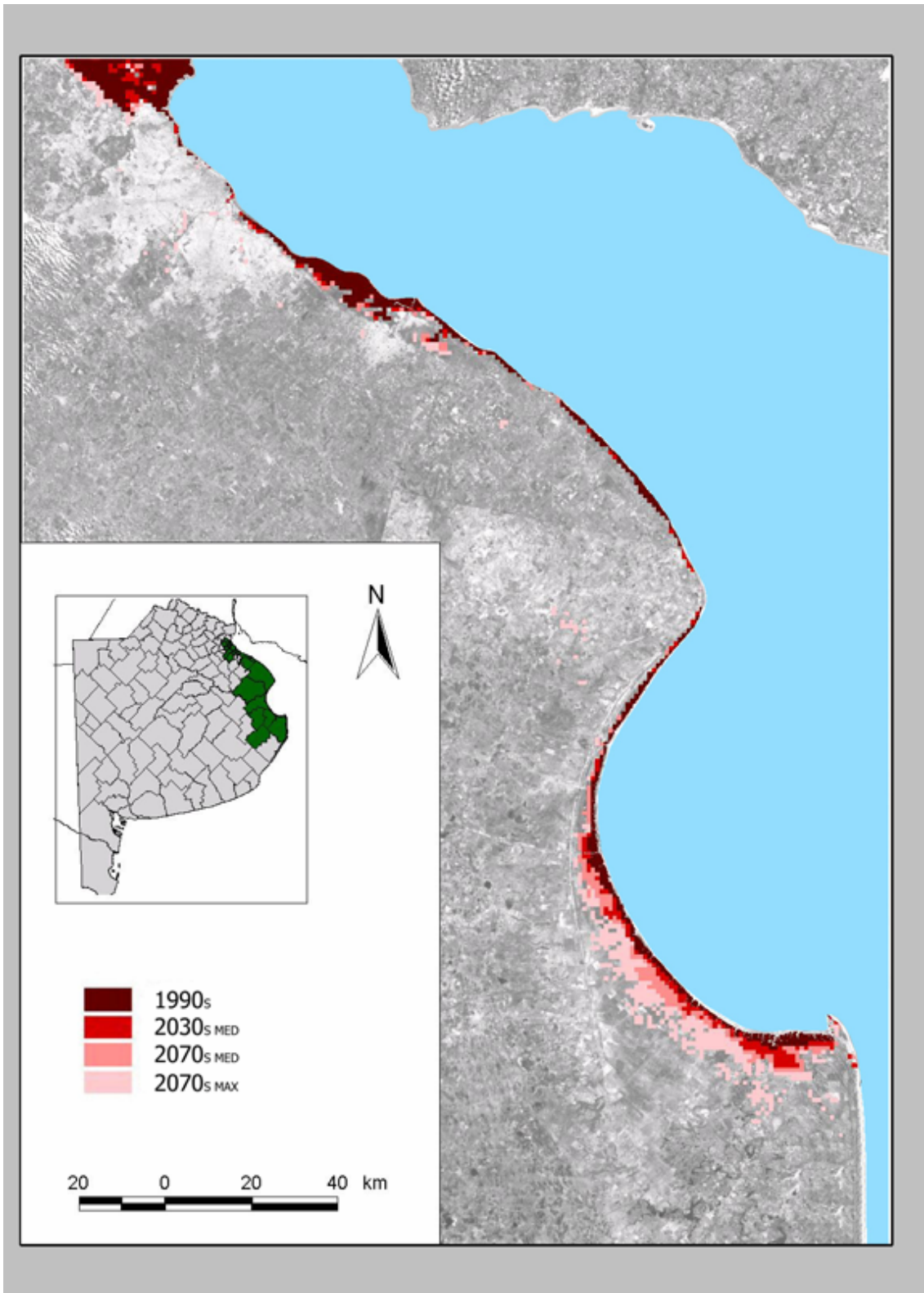


Figura VII-21 Mapa de riesgo. Recurrencia 1 año.

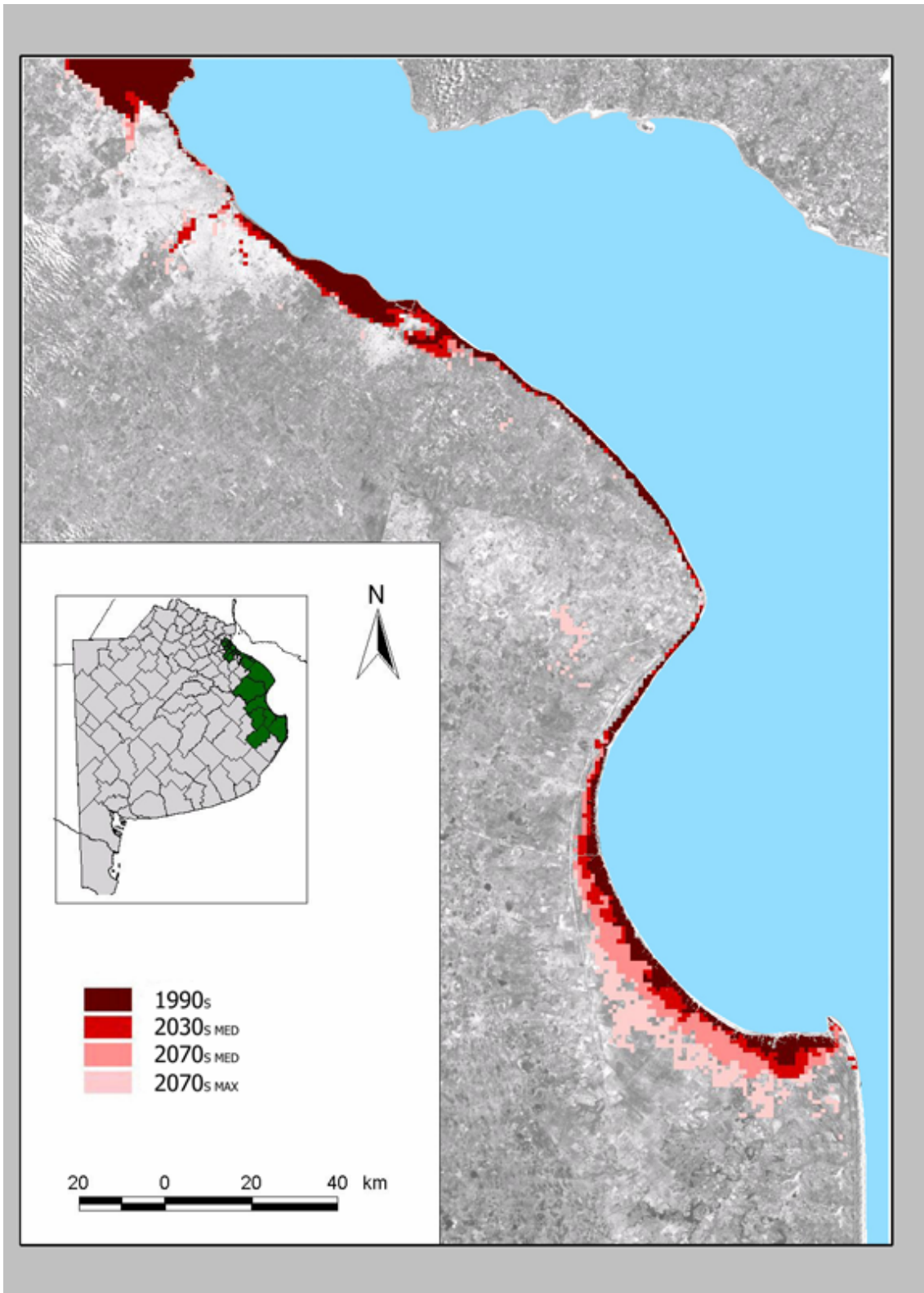


Figura VII-22 Mapa de riesgo. Recurrencia 5 años.

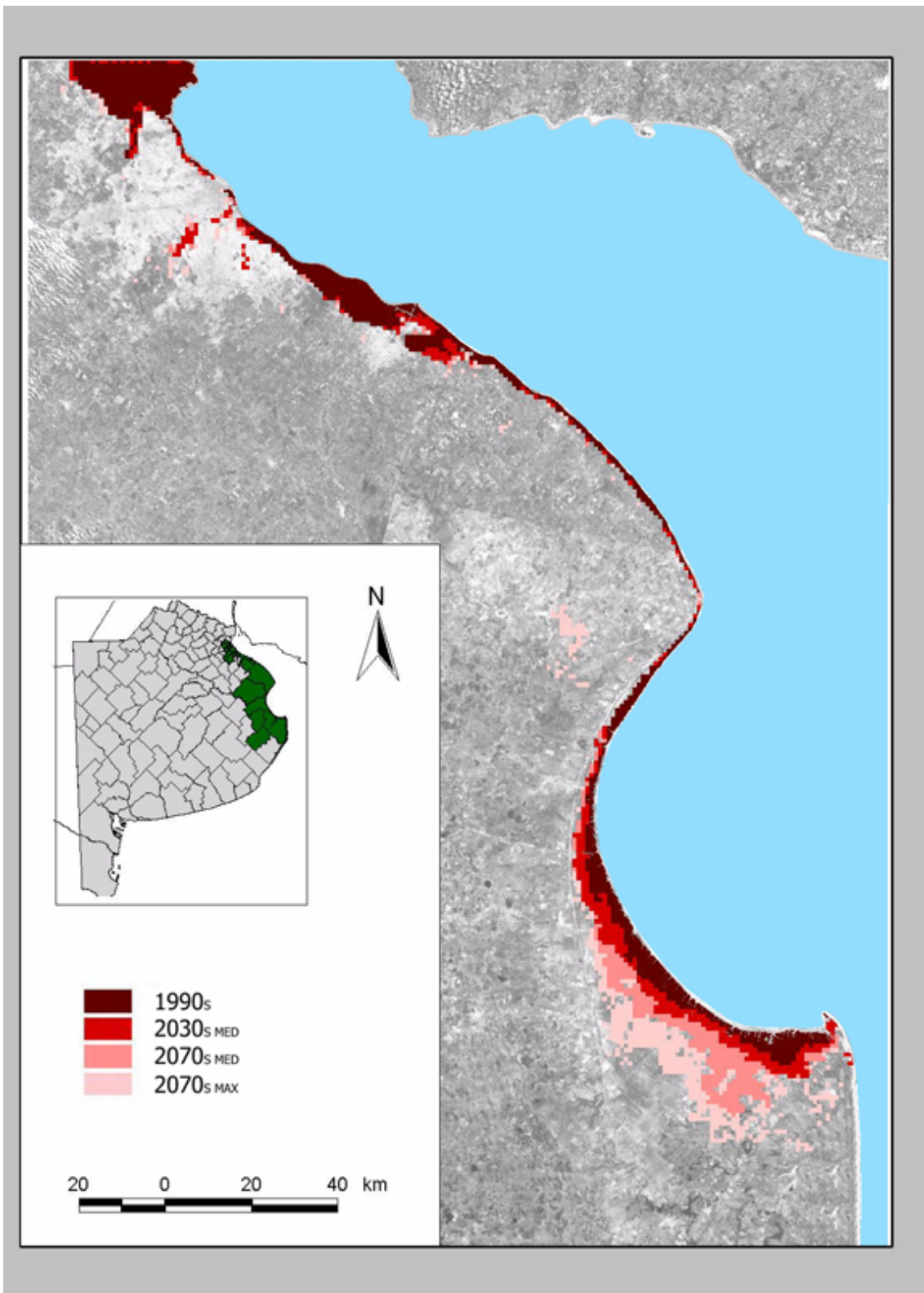


Figura VII-23 Mapa de riesgo. Recurrencia 10 años.

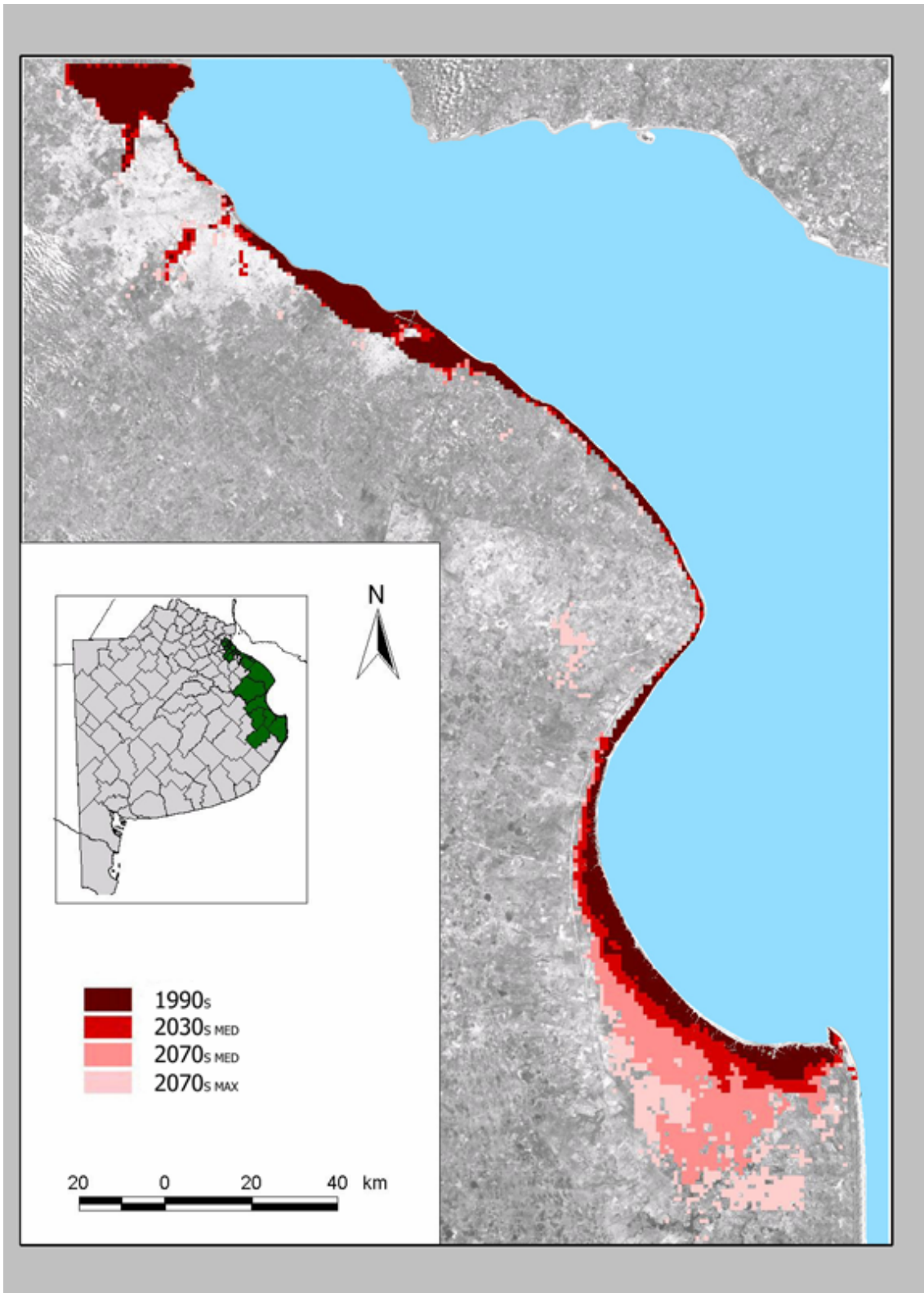


Figura VII-24 Mapa de riesgo. Recurrencia 20 años.

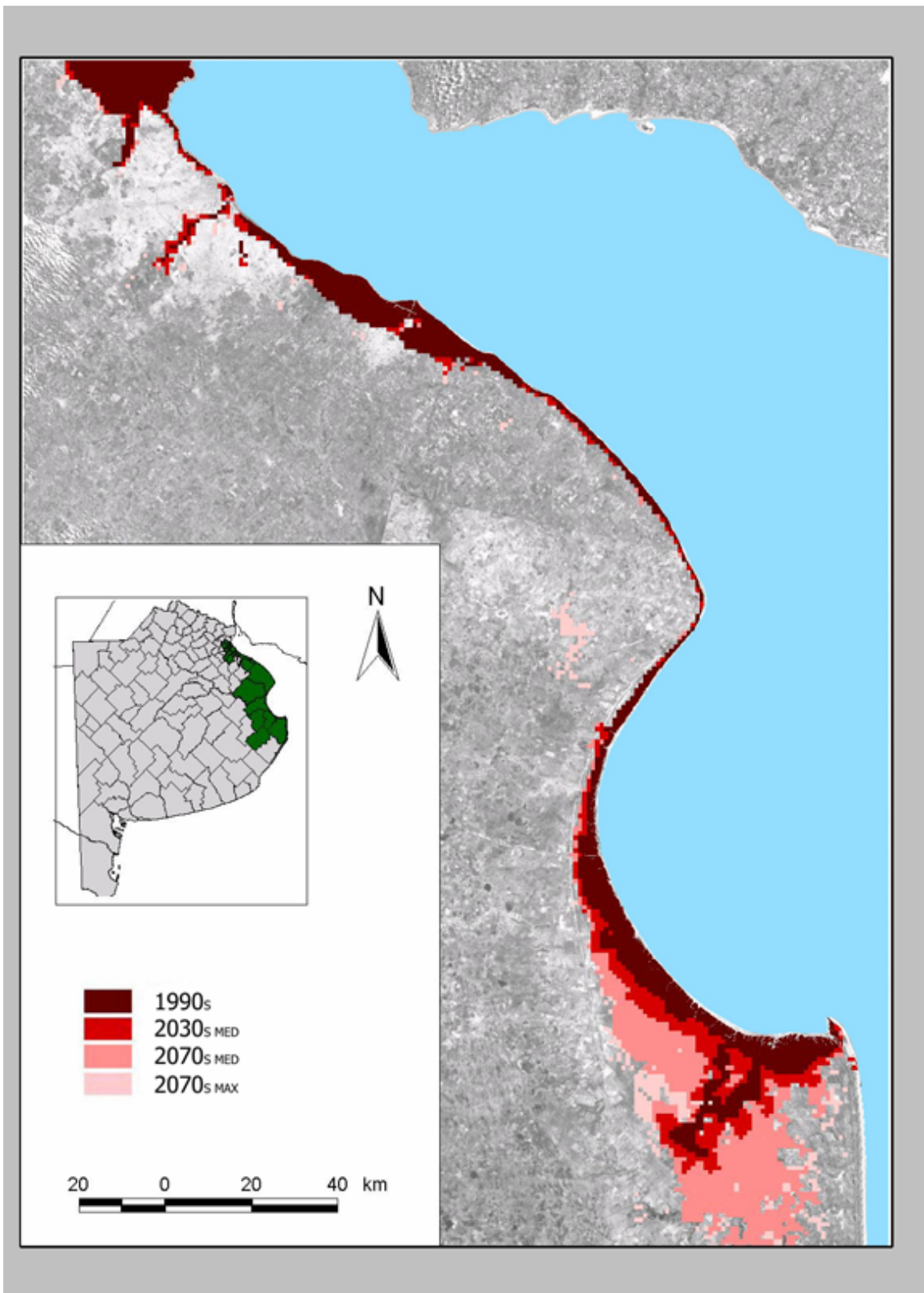


Figura VII-25 Mapa de riesgo. Recurrencia 50 años.

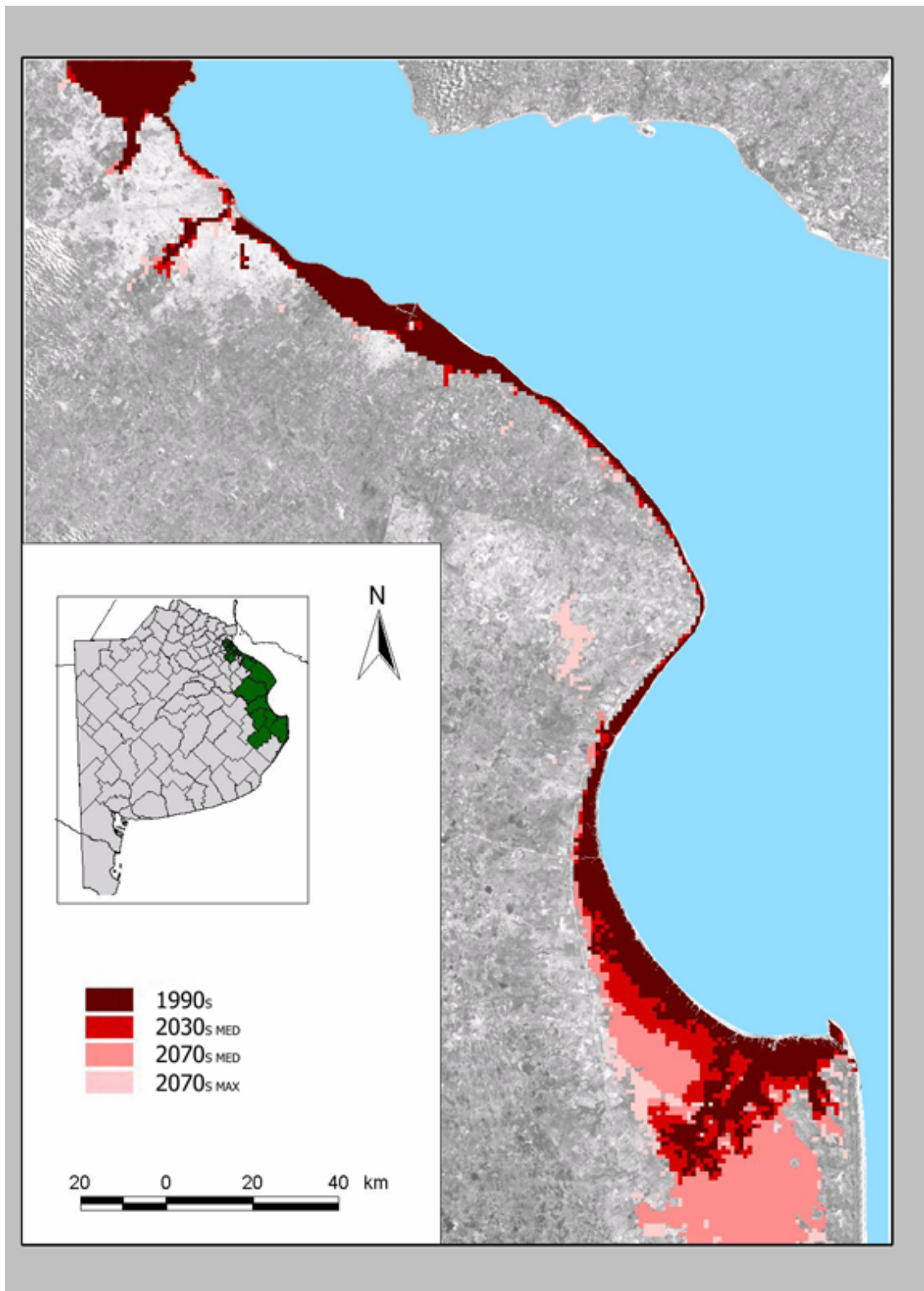


Figura VII-26 Mapa de riesgo. Recurrencia 100 años.

## Conclusiones

---

Las principales conclusiones, que se presentan más abajo, se han organizado en cuatro ítems:

- *Dinámica del sistema:* Se plantean las observaciones provenientes de la modelación que contribuyen a clarificar los mecanismos de los forzantes y sus efectos.
- *Proyecciones para el siglo XXI:* Se indica la probable evolución futura del sistema para el presente siglo, en base a los resultados de la modelación de los escenarios elegidos.
- *Metodología de análisis de riesgo:* Se resaltan los aspectos universales del método de análisis de riesgo empleado, y se plantean algunas de sus limitaciones.
- *Modelo hidrodinámico RPP-2D:* Se destacan sus capacidades.

### DINÁMICA DEL SISTEMA

- Las diferencias estacionales de niveles medios que se manifiestan en el Río de la Plata, de hasta 20 cm entre primavera - verano y otoño - invierno, resultan básicamente de la acción del campo de vientos. En el caso de vientos provenientes desde la dirección oceánica, el área de acción más significativa de los vientos, en relación a los efectos sobre los niveles del Río de la Plata, se limita a la región del Frente Marítimo, sobre la plataforma continental adyacente a su desembocadura.
- La influencia del aporte de caudal de los tributarios principales (ríos Paraná y Uruguay) en las variaciones de nivel del Río de la Plata sólo se advierte con la ocurrencia de muy altos caudales. En la práctica, estas situaciones sólo pueden darse para crecidas extraordinarias de muy alta permanencia, de manera que el Delta del río Paraná no atenúe su pico (tal como ocurrió en la gran crecida 82 - 83).
- La mayor parte de la energía de la onda de marea astronómica que llega al Río de la Plata proviene de la fracción de onda que se desarrolla sobre la plataforma continental y se propaga de Sur a Norte, en contacto con la costa argentina.

- Los picos de las ondas de tormenta que provocan inundaciones en la zona costera argentina del Río de la Plata crecen a medida que la onda se desplaza a lo largo de la misma, de Sudeste a Noroeste, alcanzando valores en el río interior de hasta tres veces los que se dan en la boca.

## **PROYECCIONES PARA EL PRESENTE SIGLO**

- Tanto a escala estacional como anual, la principal componente de cambio de los niveles medios en el Río de la Plata será el aumento del nivel medio del mar, el cual produce un incremento de nivel medio prácticamente constante sobre toda la extensión del río.
- El cambio en los patrones de viento no tendrá una influencia significativa sobre los niveles medios estacionales y anuales del Río de la Plata Exterior. En cambio, para el Río de la Plata Interior es esperable una contribución relevante, que puede llegar hasta un 30% del valor correspondiente por aumento del nivel medio del mar.
- Las áreas inundadas permanentemente en la costa argentina del Río de la Plata por los efectos del Cambio Climático serán de relativamente pequeña extensión. Esto significa que la amenaza de inundaciones seguirá siendo eventual, y ligada a las ondas de tormenta.
- El aumento del nivel máximo de las inundaciones provocadas por las ondas de tormenta será prácticamente igual al aumento del nivel medio del mar.
- Las tres zonas costeras más vulnerables a las inundaciones son: el Frente del Delta del Paraná, la franja costera que va desde Berisso – Ensenada hasta Berazategui – Quilmes y una franja al Sur de la Bahía Samborombón. Para los escenarios futuros, resulta creciente el riesgo de inundación en la cuenca baja de los ríos Matanza – Riachuelo y Reconquista.
- Los tiempos de recorrido del pico de la onda de tormenta a lo largo de la costa del Río de la Plata, no sufrirán cambios apreciables. Las mayores diferencias respecto al presente se manifestarán para las tormentas de menor

recurrencia (hasta 10 años), siendo decrementos del orden del 2% para los escenarios del 2030 y del 4% para los escenarios del 2070.

## **METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE RIESGO**

- La metodología de análisis de riesgo presentada en este trabajo, basada en la modelación matemática de los procesos, constituye quizás la forma más genuina de cuantificación de riesgos de inundación ante situaciones de Cambio Climático, en el presente estado del conocimiento y de desarrollo tecnológico.
- La modelación hidrodinámica bidimensional utilizada ha demostrado tener la capacidad suficiente como para representar adecuadamente la dinámica de niveles de las zonas costeras.
- La información de apoyo de libre disponibilidad (datos topográficos de radar, modelo global de mareas, campos de vientos globales) constituyen elementos fundamentales para la implementación de la metodología.
- Los escenarios de campos de vientos utilizados han sido obtenidos de modelaciones climáticas a escala global. Es esperable una mejoría en las proyecciones si se implementaran modelos regionales, más acordes con la escala del problema estudiado.

## **MODELO HIDRODINÁMICO RPP-2D**

- Como uno de los productos del trabajo, se dispone de un modelo hidrodinámico del Río de la Plata y de su Frente Marítimo, denominado RPP-2D, que reproduce la respuesta en niveles del sistema frente a la acción de los distintos forzantes.
- La respuesta del modelo a la marea astronómica pura muestra una precisión altamente satisfactoria para todas las estaciones de control del Río de la Plata.

- La respuesta del modelo a la acción de los vientos, cuando se utilizan los datos de campos de viento globales, resulta satisfactoria en cuanto a reproducción de frecuencia de ocurrencia de niveles y niveles medios del Río de la Plata, tanto a escala anual como estacional.
- Se especula con que el modelo está en condiciones de reproducir la respuesta a eventos de tormenta, si se dispusiera de información más detallada (escala regional) para el campo de vientos.

## Referencias

---

- Abbott, M., 1979. Computational hydraulics, Pitman, Boston.
- Albarracin, J., 1987., Análisis de la hidrodinámica del Río de La Plata a partir de una simulación numérica, Tesis de grado para la Licenciatura en Oceanografía, ITBA (Argentina), Informe LHA-INCYTH 065-001-88, INCYTH, Argentina.
- Balay, M.A., 1961. El Río de la Plata entre la atmósfera y el mar, Publicación H 621, Servicio de Hidrografía Naval, Buenos Aires.
- Barragán Muñoz, J.M, Dadon, J.R., Matteucci S.D, Morello, J.H, Baxendale, C., Rodríguez, A., 2003. Preliminary basis for an integrated management program for the coastal zone of Argentina, Coastal Management, 31, 55–77.
- Barros, V.R., Escobar G., Camilloni, I., 2003. Desplazamiento del anticiclón subtropical del Atlántico Sur y su relación con el cambio de vientos sobre el estuario del Río de la Plata, V Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar, Mar del Plata, Diciembre.
- Barros, V.R., 2004. El Cambio Climático Global, 1ra. Edición, Libros del Zorzal, Buenos Aires.
- Bombardelli, F.A., Menéndez A.N., Brea, J.D., Montalvo, J.L., Porro, G.O., 1994. Estudio hidrodinámico del Delta del Río Paraná mediante modelación matemática, Informe LHA - INCYTH 137-01-94, INCYTH, Argentina.
- Bronstein, P., Menéndez, A.N., 1995. Plan de protección hídrica de las islas del Delta (Provincia de Buenos Aires), Informe SUCCE (Sub Unidad Central de Control para las Emergencias), Octubre.
- Camilloni, I., Bidegain, M., 2002. Regional climate baselines scenarios for the Río de la Plata basin. Assessments of impacts and adaptation to climate change in multiple regions and sectors (AIACC) - Río de la Plata Workshop, Montevideo, Uruguay,
- Campos, E.D., Lentini, C.A., Miller, J.L., Piola, A.R., 1999. Interannual variability of the sea surface temperature in the South Brazilian Bight, Geophysical Research Letters, 26 (14), 2061-2064.
- CARP, 1989. Estudio para la evaluación de la contaminación en el Río de la Plata, SHN y SOHMA.
- Cartwright, D., Ray, R., 1990. Oceanic tides from Geosat altimetry, Journal of Geophysical Research, 95 (C3), 3069–3090.
- Codignotto, J.O., Kokot, R.R, 2003. Cambio Climático y vulnerabilidad costera en el Río de La Plata. V Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar, Mar del Plata, Diciembre.
- Cohen, J., Small, C., 1998. Hypsographic demography: the distribution of human population by altitude. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 95, 14009-14014.
- D'Onofrio, E.E., Fiore, M.E., Romero, S.I., 1999. Return periods of extreme water levels estimated for some vulnerable areas of Buenos Aires, Continental Shelf Research, 19, 1681-1693.
- D'Onofrio, E.E., Fiore M.E., Ruiz, E.H., 2003. Tendencia relativa del nivel medio del Río de La Plata en el Puerto de Buenos Aires. Contribuciones a la Geodesia Aplicada, Instituto de Geodesia de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, 1.
- Dragani, W.C., 2002. Comunicación personal.

- Dragani, W.C., Romero, S.I., 2004. Impact of a possible local wind change on the wave climate in the upper Rio de la Plata, *International Journal of Climatology*, 24, 9, 1149-1157.
- Escobar, G., Vargas, W.M., Bischoff, S., 2004. Wind tides in the Rio de la Plata estuary: meteorological conditions, *International Journal of Climatology*, 24, 1159-1169.
- Framiñán, M.B., Etala, M.P., Acha, E.M., Guerrero, R.A., Lasta, C.A., Brown, O., 1999. Physical characteristics and processes of the Rio de la Plata estuary, In: Perillo, G.M., Piccolo, M.C., Pino, M. (editores), *Estuaries of South America. Their geomorphology and dynamics*, Springer-Verlag, Berlin, 161-194.
- García, N.O., Vargas, W.M., 1998. The temporal climatic variability in the Rio de la Plata basin displayed by the river discharges, *Climatic Change*, 38, 359-379.
- Glorioso, P. D., 2002. Modelling the South West Atlantic. *Aquatic Conserv: Mar. Freshw. Ecosyst*, 12, 27-37.
- Gornitz V., Couch, S., Hartig, E.K, 2002. Impacts of sea level rise in the New York City metropolitan area. *Global and Planetary Change*, 32, 61-88.
- Grabemann, H.J., Grabemann, I., Hebers, D., Müller, A., 2001. Effects of a specific climate change scenario on the hydrography and transport of conservative substances in the Weser Estuary (Germany) - a case study. *Climate Research*, 18, 77-87.
- Guarga, R., Vinzón, S., Rodríguez, H., Piedra Cueva, I., Kaplan, E., 1991. Corrientes y sedimentos en el Río de la Plata. Reporte CARP (Comisión Administradora del Río de la Plata).
- Hoyme, H., Zielke, W., 2001. Impact of climate changes on wind behaviour and water levels at the German North Sea Coast. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 53, 451-458.
- IPCC, 1995. Cambio Climático 1995: La ciencia del cambio climático, Contribución del Grupo de trabajo I al Segundo informe de evaluación del IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- IPCC, 2000. Escenarios de Emisiones, Informe especial del Grupo de trabajo III, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- IPCC, 2001a. Cambio Climático 2001: La base científica, Contribución del Grupo de trabajo I al Tercer informe de evaluación del IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- IPCC, 2001b. Cambio Climático 2001: Impactos, adaptación y vulnerabilidad, Contribución del Grupo de trabajo II al Tercer informe de evaluación del IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Jaime, P.R., Menéndez, A.N., 1999. Modelo hidrodinámico Río de la Plata 2000, Informe LHA INA 183-01-99, INA, Argentina.
- Jaime, P.R., Menéndez, A.N., 2002. Análisis del régimen hidrológico de los Ríos Paraná y Uruguay, Informe INA - LHA 05-216-02, INA, Argentina.
- Kalnay, E. and Coauthors, 1996. The NCEP/NCAR 40-Year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 437-471.
- Kaplan, E., 1998. A shallow water model distributed using domain decomposition, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay.

- Kind, M.V., 2004. Desplazamiento del frente de salinidad del Río de la Plata debido al aumento del nivel medio del mar, Tesis de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.
- Klein, R.J.T., Nicholls, R.J., Thomalla, F., 2002. The resilience of coastal megacities to weather - related hazards. Workshop "The Future of Disaster Risk: Building Safer Cities", Disaster Management Facility, World Bank, Washington, DC, USA, 4-6 December 2002, 21 pp.
- Konishi, T., Tsuji, Y., 1995. Analyses of storm surges in the western part of the Seto Inland Sea of Japan caused by Typhoon 9119. *Continental Shelf Research*, 15 (14), 1795-1823.
- Kont. A., Ratas, U., Puurmann, E., 1997. Sea-level rise impact on coastal areas of Estonia. *Climatic Change*, 36, 175-184.
- Kreimer A., Kullock D., Valdés J.B. (editores), 2001. Inundaciones en el Área Metropolitana de Buenos Aires. The World Bank, Disaster Management Facility, Disaster Risk Management Series, Washington, D.C.
- McInnes, K.L., Walsh, K.J.E., Whetton, P., Pittock, B., 1998. Impact of Climate Change on coastal New South Wales, Final Report, CSIRO Atmospheric Research, Australia.
- McInnes, K.L., Walsh, K.J.E., Hubbert, G.D., Beer, T., 2003. Impact of sea-level rise and storm Surges on a coastal community, *Natural Hazards*, 30 (2), 187-207.
- Meier, M., Broman, B., Kjellström, E., 2004. Simulated sea level in past and future climates of the Baltic Sea, *Climate Research*, 27, 20-75.
- Menéndez, A.N., Norscini, R., 1982. Spectrum of shallow water waves: an analysis, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 108 (HY1), January.
- Menéndez, A.N., 1985. Simulación numérica de flujos cuasi-bidimensionales a superficie libre, Informe LHA-INCYTH S5-016-85, INCYTH, Argentina.
- Menéndez, A.N., 1987. On the accuracy of numerical methods for the two-dimensional shallow-water equations, XXII IAHR Congress, Lausanne.
- Menéndez, A.N., 1990. Sistema HIDROBID II para simular corrientes en cuencos, *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 6 (1).
- Menéndez, A.N., 2001. Description and modeling of the hydrosedimentologic mechanisms in the Río de la Plata River, VII International Seminar on Recent Advances in Fluid Mechanics, Physics of Fluids and Associated Complex Systems, Buenos Aires, Argentina, October.
- Molinari, G.N., 1986. Simulación numérica de la circulación en el Río de la Plata, Tesis de grado para la Licenciatura en Oceanografía, ITBA (Argentina), Informe LHA-INCYTH S5-017-86, INCYTH, Argentina.
- Nicholls, R.J., Mimura N., 1998. Regional issues raised by sea-level rise and their policy implications. *Climate Research*, 11, 5-18
- Olalde, A.M., 1988. Simulación numérica de corrientes de deriva en el Río de la Plata, Tesis de grado para la Licenciatura en Oceanografía, ITBA (Argentina), Informe LHA-INCYTH 065-002-88, INCYTH, Argentina.
- Palma, E.D., Sitz, L.E., 2003. Diseño e implementación de condiciones de frontera abierta en modelado oceánico costero, XIII Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones, ENIEF 2003, Bahía Blanca, Argentina.

- Piola, A.R., Campos, E.D., Möller, O.O., Charo, M., Martinez, C., 2000. Subtropical Shelf Front off eastern South America, *Journal of Geophysical Research*, 105 (C3), 6565-6578.
- Safaie, B., 1984. Wind stress at air-water interfase, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engeneering*, 110 (2), 287-293.
- Schrum, C, 2001. Regionalization of climate change for the North Sea and Baltic Sea. *Climate Research*, 18, 31-37.
- Shaw, R.W., 2001. Coastal impacts of Climate Change and sea-level rise on Prince Edward Island, Synthesis Report, Climate Change Action Fund project CCAF A041, Canada, june.
- Simionato, C.G., Nuñez, M., Meccia V., 2002. Estudio de la respuesta del modelo HamSOM/CIMA a vientos intensos sobre le Río de la Plata, Informe CIMA/Oct-02-01. Proyecto AIACC LA26.
- Simionato, C.G., Dragani, W., Nuñez, M., Engel, M, 2004 *a*. A set of 3-D nested models for tidal propagation from the Argentinean Continental Shelf to the Río de la Plata Estuary - Part I: M2. *Journal of Coastal Research*, 20 (3), 893-912.
- Simionato, C.G., Dragani, W., Meccia, V., Nuñez, M., 2004 *b*. A numerical study of the barotropic circulation of the Río de la Plata estuary: sensitivity to bathymetry, the Earth's rotation and low frequency wind variability. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 61, 261-273.
- Sterr, H., Klein, R., Reese, S., 2000. Climate Change Zones: An Overview on the state-of-the-art of Regional and Local Vulnerability Assessments. FEEM Working Paper, Series 38.2000.
- Suursaar, U., Kullas, T., Otsmann, M., 2002. A model study of the sea level variations in the Gulf of Riga and the Vainameri Sea. *Continental Shelf Research*, 22, 2001-2019.
- Van Dorn, W., 1953. Wind stress on an artificial pond, *Journal of Marine Research*, Vol. 12, Nro. 3.
- Wells, P.G., Daborn, G.R. (editores), 1997. The Río de la Plata, An Environmental Overview. An EcoPlata Project Background Report, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia. 248 p.
- Whitham, G.B., 1974. Linear and nonlinear waves, Interscience, New York.
- Wu, S.Y., Yarnal, B., Fisher, A., 2002. Vulnerability of coastal communities to sea-level rise: a case study of Cape May County, New Jersey, USA. *Climate Research*, 22, 255-270.
- Zeidler, R.B., 1997. Climate change vulnerability and response strategies for the coastal zone of Poland. *Climatic Change*, 36, 151-173.