

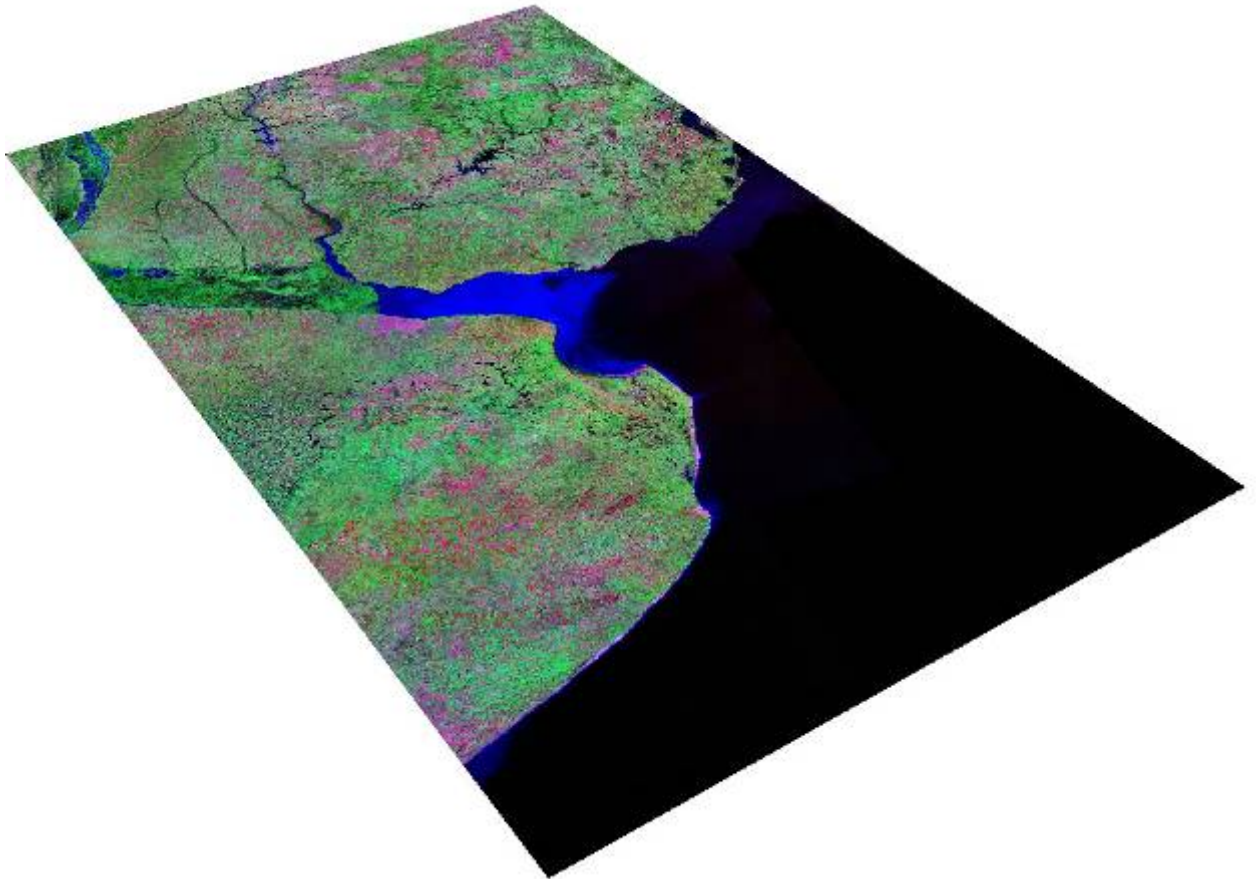


Tesis de grado en Ingeniería Civil

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

*Análisis de riesgo de duración de inundaciones
en las áreas costeras del Río de la Plata
considerando Cambio Climático*



EMILIO ALEJANDRO LECERTUA

2010

Tesis de grado en Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería

Universidad de Buenos Aires

***Análisis de riesgo de duración de inundaciones en las
áreas costeras del Río de la Plata considerando
Cambio Climático***

Tesista: **Emilio Alejandro Lecertua**

Tutor: **Dr. Ángel Nicolás Menéndez** (Facultad de Ingeniería, UBA)

Fecha de presentación: Marzo del 2010

Tribunal examinador:

1. **Ing. Pablo Bronstein** (Facultad de Ingeniería, UTN)
2. **Dra. Inés Camilloni** (Facultad de Ciencias Exactas, UBA)
3. **Ing. Juan Hoopwood** (Facultad de Ingeniería, UBA)

La Región Metropolitana de Buenos Aires representa la zona más densamente poblada del país, un extensa área de esta región se considera vulnerable a las inundaciones durante el pasaje de ondas de tormenta conocidas usualmente como "Sudestadas".

En la presenta tesis se presenta una metodología para la construcción de mapas de riesgo de inundación sobre la costa argentina del Río de la Plata. Estos mapas se construyen para un escenario de línea de base (década de 1990) y dos escenarios futuros de Cambio Climático (década de 2030 y 2070), permitiendo evaluar las alturas y duraciones de las inundaciones para diferentes períodos de retorno.

Para llevar a cabo los mapas de riesgo de inundación se utilizó un modelo hidrodinámico denominado RPP-2D, previamente calibrado y verificado, que permite representar la dinámica del Río de la Plata. Con el modelo se han obtenido niveles del río en estaciones de control, que permiten generar diferentes análisis estadísticos. Por un lado se estudió la frecuencia de ocurrencia de eventos para el caso de recurrencias intranuales y por el otro se efectuó un análisis de extremos bivariado para el caso de recurrencias interanuales. Con la información estadística y el modelo digital del terreno se construyeron los respectivos mapas de riesgo de inundación.

Análisis de riesgo de duración de inundaciones en las áreas costeras del Río de la Plata considerando Cambio Climático



1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. PLANTEO DEL PROBLEMA	1
1.2. INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO.....	3
1.2.1. GASES DE EFECTO INVERNADERO.....	3
1.2.2. TEMPERATURA.....	5
1.2.3. NIVEL MEDIO DEL MAR	6
1.2.4. PRECIPITACIONES.....	7
1.2.5. CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA	8
1.3. ANTECEDENTES DEL TRABAJO.....	8
1.4. OBJETIVOS DE LA TESIS	8
1.5. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	9
2. ANÁLISIS DE EVENTOS.....	11
2.1. FRECUENCIA DE OCURRENCIA DE EVENTOS	11
2.1.1. VALOR UMBRAL DE INUNDACIÓN	11
2.1.2. FRECUENCIA DE DURACIONES	13
2.1.3. FILTRADO DE MAREA ASTRONÓMICA	16
2.2. RECURRENCIA DE EVENTOS EXTREMOS.....	20
2.2.1. DISTRIBUCIONES MARGINALES	23
2.2.1.1. IDENTIFICACIÓN DE EVENTOS	23
2.2.1.2. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS.....	24
2.2.1.3. PROBABILIDAD EMPÍRICA.....	25
2.2.1.4. DISTRIBUCIONES MARGINALES DE PICOS Y DURACIONES	26
2.2.2. DISTRIBUCIÓN CONJUNTA	30
2.2.3. DISTRIBUCIONES CONDICIONALES	32
2.2.4. APLICACIÓN DE LAS FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN.....	33
3. MODELACIÓN DE EVENTOS	38
3.1. PLANTEO GENERAL	38
3.1.1. SOFTWARE HIDROBID	38
3.1.2. MODELO RPP-2D.....	40
3.1.2.1. DOMINIO DE CÁLCULO	40
3.1.2.2. BATIMETRÍA.....	40
3.1.2.3. CONDICIONES DE BORDE	41
3.1.2.4. VIENTOS.....	42
3.1.2.5. PASO DE CÁLCULO	43
3.1.3. FORZANTES	43

3.1.3.1.	CAUDAL DE LOS TRIBUTARIOS.....	43
3.1.3.2.	MAREA ASTRONÓMICA.....	44
3.1.3.3.	VIENTOS.....	45
3.2.	CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO.....	46
3.2.1.	INTRODUCCIÓN.....	46
3.2.1.1.	ESCENARIO DE MAREA ASTRONÓMICA PREDICHA.....	46
3.2.1.2.	NIVEL MEDIO PARA CONDICIONES ACTUALES.....	47
3.2.1.3.	CURVA DE FRECUENCIA DE NIVELES EN BUENOS AIRES.....	48
3.2.1.4.	SIMULACIÓN DE GRANDES ONDAS DE TORMENTA.....	48
3.3.	UTILIZACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO.....	49
3.3.1.	SIMULACIÓN DE FRECUENCIA.....	49
3.3.1.1.	FRECUENCIA DE NIVELES.....	49
3.3.1.2.	FRECUENCIA DE DURACIONES.....	50
3.3.2.	SIMULACIÓN DE EXTREMOS.....	53
3.3.2.1.	AJUSTE HEURÍSTICO DE LOS DATOS.....	54
3.4.	RESULTADOS PARA ESCENARIO DE LÍNEA DE BASE.....	56
3.4.1.	NIVEL MEDIO.....	56
3.4.2.	FRECUENCIA DE NIVELES.....	57
3.4.3.	FRECUENCIA DE DURACIONES.....	58
3.4.4.	EVENTOS EXTREMOS.....	60
4.	<u>MAPAS DE RIESGO DE INUNDACIÓN.....</u>	<u>63</u>
4.1.	MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT).....	63
4.1.1.	MDT BASE.....	63
4.1.2.	PROCESAMIENTO DEL MDT.....	64
4.2.	CONSTRUCCIÓN DE MAPAS DE RIESGO DE INUNDACIÓN.....	66
4.2.1.	MAPAS DE FRECUENCIA DE INUNDACIONES.....	67
4.2.2.	MAPAS DE EVENTOS EXTREMOS.....	70
5.	<u>ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.....</u>	<u>82</u>
5.1.	INTRODUCCIÓN.....	82
5.1.1.	ESCENARIOS SRES.....	82
5.1.2.	ESCENARIOS DE MODELACIÓN FUTUROS.....	84
5.1.2.1.	CAUDAL DE LOS TRIBUTARIOS.....	84
5.1.2.2.	MAREA ASTRONÓMICA.....	85
5.1.2.3.	NIVEL MEDIO DEL MAR.....	85
5.1.2.1.	VIENTOS.....	85
5.2.	RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS FUTUROS.....	86
5.2.1.	NIVEL MEDIO.....	86
5.2.2.	FRECUENCIA DE NIVELES.....	86
5.2.3.	FRECUENCIA DE DURACIONES.....	89
5.2.4.	MAPAS DE FRECUENCIA DE INUNDACIÓN.....	92
5.2.5.	EVENTOS EXTREMOS.....	95
5.2.6.	MAPAS DE RIESGO DE INUNDACIÓN.....	98
6.	<u>CONCLUSIONES.....</u>	<u>115</u>
7.	<u>REFERENCIAS.....</u>	<u>118</u>

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteo del Problema

El Río de la Plata es un extenso estuario formado por los ríos Paraná y Uruguay, situado en la costa este de Sudamérica. El río se orienta en el sentido Noroeste – Sudeste, con una longitud aproximada de 290 km. El ancho en la zona superior es de alrededor de 50 km, ensanchándose hasta alcanzar 100 km la sección Montevideo (Uruguay) – Punta Piedras (Argentina) (límite interior del Río de la Plata). Luego se amplía progresivamente hasta la sección Punta Rasa (Argentina) – Punta del Este (Uruguay) (límite convencional exterior del Río de la Plata), en dónde alcanza 220 km de ancho en su desembocadura al Océano Atlántico, como se puede apreciar en la figura 1.1.



Figura 1.1. Río de la Plata

Su caracterización como “río” proviene del carácter dulce de sus aguas en la zona superior e intermedia, producto del gran aporte de sus dos tributarios principales, que totalizan un caudal medio de alrededor de 23000 m³/s.

La profundidad media del Río de la Plata es de unos 10 m, existiendo zonas muy poco profundas en el interior del río que oscilan entre 1 y 4 m, llegando a los 18 m en la zona exterior.

La cuenca del Río de la Plata es la quinta cuenca hidrográfica más grande del mundo y la segunda de América del Sur, con una superficie aproximada de 3,1 millones de km², abarcando una gran superficie de los países de Argentina, Bolivia, Brasil, Paraguay y Uruguay.

Sobre la costa argentina del Río de la Plata se desarrolla la Región Metropolitana de Buenos Aires (RMBA) (figura 1.2), el principal conglomerado del país, con una población de alrededor de 14 millones de habitantes. El Río de la Plata constituye la fuente principal de abastecimiento de agua de la ciudad y también es el sitio de descarga de los efluentes industriales y domésticos. A través del mismo se realizan las conexiones oceánicas a los puertos de Buenos Aires y Rosario. También se desarrollan actividades de navegación deportiva y de pasajeros a diario.

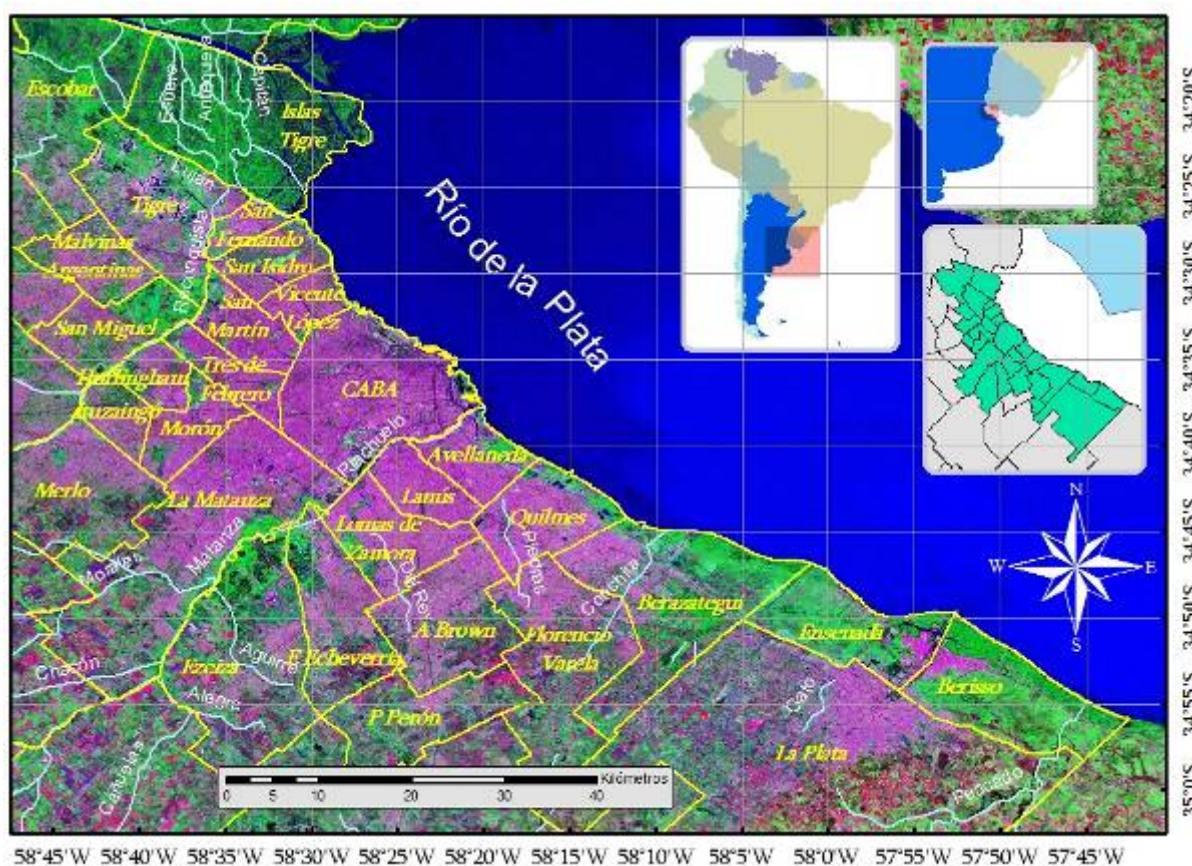


Figura 1.2. Región Metropolitana de Buenos Aires

Un área extensa de la RMBA se encuentra por debajo de la cota de 5 m, a priori considerada como la zona vulnerable a las inundaciones durante el pasaje de las ondas de tormenta. Esta zona de potencial impacto no solo abarca las áreas costeras del Río de la Plata, sino que también se extiende hacia las populosas márgenes de los ríos Matanza - Riachuelo y Reconquista. Alrededor de 1.5 millones de personas habitan esta región, lo que da cuenta de la magnitud del problema ante evidencias de intensificación de efectos.

Las inundaciones por ondas de tormentas están asociadas al fenómeno meteorológico conocido como Sudestada caracterizado por fuertes vientos que provienen del sudeste. Este evento está básicamente representado por la combinación de un sistema de alta presión ubicado al sur del Río de la Plata y una zona de baja presión relativa al norte conduciendo a la producción de vientos provenientes del sector sudeste. Las Sudestadas ocurren durante todo el año y la máxima frecuencia de las mismas es observada en verano, con máximas en el comienzo de la primavera y el otoño (Escobar, Vargas y Bischoff, 2004)

Dada la forma del estuario del Río de la Plata, estos vientos producen, adicionalmente, elevación en los niveles del río, efecto que se propaga hacia aguas arriba de la desembocadura de los tributarios, anegando las zonas bajas. Los costos económicos en la Ciudad de Buenos Aires cuando la sudestada se combina con lluvia fuerte, en algunos casos han excedido US\$ 250 mil (Costa y otros, 1998).

El Río de la Plata está experimentando un incremento de su nivel medio por el aumento del nivel 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; además, se está incrementando la frecuencia de las ondas de tormenta provenientes del océano. Estos efectos significan una mayor vulnerabilidad de la zona costera a las inundaciones. El aumento del nivel medio ha sido alrededor de 17 cm para el siglo XX, de los cuáles el 50% se produjo en las últimas 3 décadas (D'Onofrio et al., 2003).

1.2. Influencia del Cambio Climático

1.2.1. Gases de efecto invernadero

Las actividades humanas producen la emisión de los 4 gases principales de efecto invernadero: dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y halocarbonos. Estos gases se acumulan en la atmósfera causando concentraciones que se incrementan a lo largo del tiempo. Las concentraciones atmosféricas mundiales de estos gases han aumentado sensiblemente como resultado de las actividades humanas desde 1750, y en la actualidad han superado los valores preindustriales determinados en muestras de testigos de hielo que abarcan muchos cientos de años (IPCC, 2007).

El dióxido de carbono es el gas de efecto invernadero antropogénico más importante. Desde 1950 se han efectuado mediciones directas de la concentración de

dióxido de carbono en la atmósfera, para periodos precedentes la concentración de este gas fue determinada en base al análisis de burbujas de aire atrapadas en los casquetes polares. La principal causa del crecimiento de su concentración en la atmósfera desde la época preindustrial es el uso de combustibles fósiles en las actividades industriales y el transporte. Durante los últimos 250 años ha habido un incremento en la concentración desde aproximadamente 280 ppm a 379 ppm, lo que constituye una variación del 36 %. La mayor tasa de crecimiento de la concentración de dióxido de carbono para una década desde que existe medición directa ha sido durante el periodo 1995 - 2005 de 1.9 ppm/año. El valor promedio de la tasa de crecimiento durante el periodo 1960 - 2005 fue de 1.4 ppm/año. El cambio en los usos del suelo constituye otra contribución significativa, pero de menor escala.

La concentración de metano en la atmósfera también ha aumentado desde 715 ppb, en la época preindustrial, a 1774 ppb en el año 2005, lo que constituye un aumento en la concentración de aproximadamente 2.5 veces. La tasa de crecimiento ha disminuido desde la década de los noventa, siendo casi constante durante ese periodo. Es muy probable que el incremento observado en la concentración del mismo se deba a actividades antropogénicas, predominantemente agrícolas y al uso de combustibles fósiles.

De la misma manera se ha incrementado la concentración de óxido nitroso en la atmósfera mundial desde la era preindustrial de 270 ppb a 319 ppb en 2005. La tasa de crecimiento se ha mantenido constante desde 1980. Más de un tercio de todas las emisiones de óxido nitroso son antropogénicas, principalmente por la agricultura.

Los cambios en la abundancia de los gases de efecto invernadero y aerosoles atmosféricos, en la radiación solar y en las propiedades de la superficie de la tierra, alteran el balance de energía del sistema climático.

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) define al Forzamiento Radiativo (FR) como la medida de la influencia que un factor ejerce en el cambio del balance de la energía entrante y saliente en el sistema atmosférico terrestre. Es un índice de la importancia de ese factor como mecanismo potencial del cambio climático. El FR positivo tiende a calentar la superficie, mientras que el negativo tiende a enfriarla.

Las contribuciones antropogénicas a los aerosoles (principalmente sulfato, carbono orgánico, carbono negro, nitrato y polvo), en conjunto, producen un efecto de enfriamiento y indirecto en el albedo de las nubes. Los aerosoles también influyen en el período de vida de las nubes y en las precipitaciones.

Debido también a fuentes antropogénicas se ha registrado cambios del ozono troposférico debidos a las emisiones de productos químicos formadores del ozono (óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono e hidrocarburos) contribuyen positivamente.

En la figura 1.3 se observan los componentes del FR correspondientes al año 2005 siendo relativos a las condiciones del periodo preindustrial 1750. El efecto neto medio

mundial de las actividades humanas desde 1750 ha resultado en un calentamiento, con un FR de + 1.60 W/m² en dónde las fuentes antropogénicas contribuyen significativamente. El FR combinado debido al aumento de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso es + 2.30 W/m²; es muy probable que su ritmo de aumento, durante la era industrial, no haya tenido precedentes en más de 10000 años. Los cambios del ozono troposférico contribuyen + 0.30 W/m². Los cambios en el albedo superficial, debidos a cambios en la cubierta del suelo y por depósito de aerosoles de carbono negro en la nieve, ejercen forzamientos negativos.

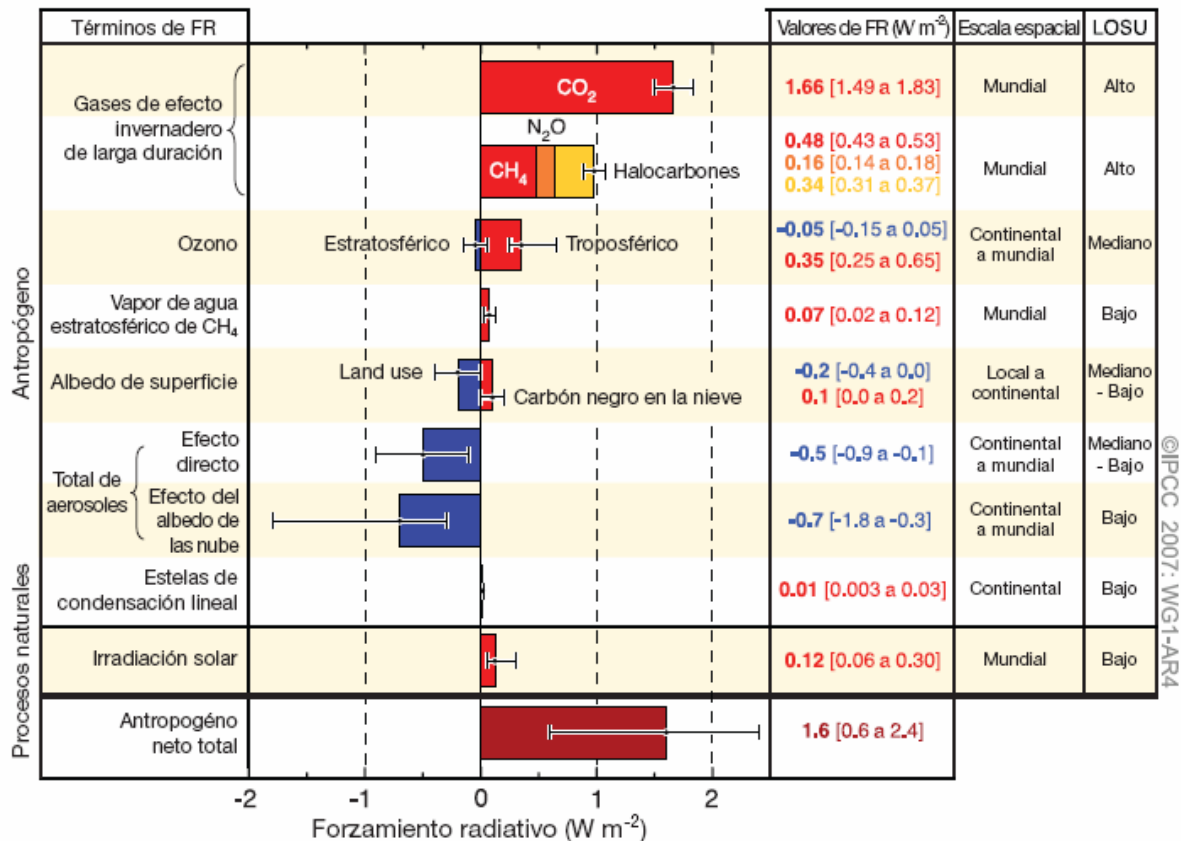


Figura 1.3. Componentes del Forzamiento Radiativo (IPCC, 2007)

1.2.2. Temperatura

El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como lo evidencian ahora las observaciones de los incrementos en las temperaturas medias del aire y del océano, el derretimiento generalizado del hielo y de la nieve, y la elevación del nivel medio del mar en el mundo. Once de los últimos doce años (1995 – 2006) se encuentran entre los años más calurosos en los registros instrumentales de la temperatura global en superficie (desde 1850). La tendencia lineal del calentamiento de los últimos 50 años, de 0.13°C, casi duplica la de los últimos 100 años. El aumento total de la temperatura de 1850 – 1899 hasta 2001 – 2005 ha sido de 0.76°C (IPCC, 2007). En la figura 1.4 se muestra el cambio en la temperatura media global, en dónde las curvas suavizadas representan los valores promedio por decenio mientras que los círculos muestran los valores anuales. Las áreas

sombreadas representan a los intervalos de incertidumbre estimados por un análisis integral de las incertidumbres conocidas.

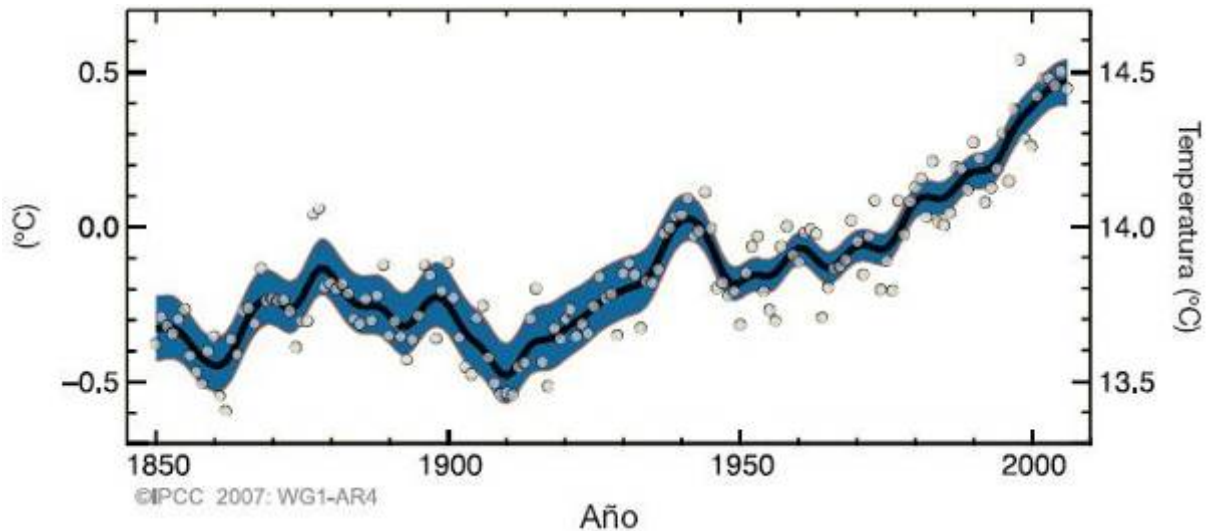


Figura 1.4. Cambios observados en la temperatura media de la superficie mundial (IPCC, 2007)

El promedio del contenido de vapor de agua en la atmósfera ha aumentado, al menos desde el decenio de 1980, tanto en tierra como en el océano, así como en la troposfera superior. El aumento concuerda, en líneas generales, con el vapor de agua adicional que puede contener el aire más caliente.

1.2.3. Nivel medio del mar

Observaciones realizadas desde 1961 muestran que la temperatura media de los océanos del mundo ha aumentado hasta profundidades de, al menos, 3000 m, y que el océano está absorbiendo más del 80% del calor añadido al sistema climático. Dicho calentamiento hace que el agua de mar se expanda, lo cual contribuye a elevar el nivel del mar. Los glaciares de montaña y la cubierta de nieve han disminuido como promedio en ambos hemisferios. Las reducciones generalizadas en los glaciares y en los casquetes de hielo han contribuido a la elevación del nivel del mar.

El nivel medio del mar en el mundo se elevó a un ritmo medio de 1.8 mm anual desde 1961 a 2003. El ritmo fue más acelerado entre 1993 – 2003: aproximadamente 3.1 mm por año. No está claro si el ritmo más rápido de 1993 a 2003 refleja una variabilidad decenal o un incremento en la tendencia largo plazo. Existe confianza alta de que el ritmo del aumento del nivel del mar observado se haya incrementado del siglo IX al XX. El aumento total estimado del siglo XX es 0.17 m. En la figura 1.5 se muestra el cambio en el nivel medio del mar a escala mundial.

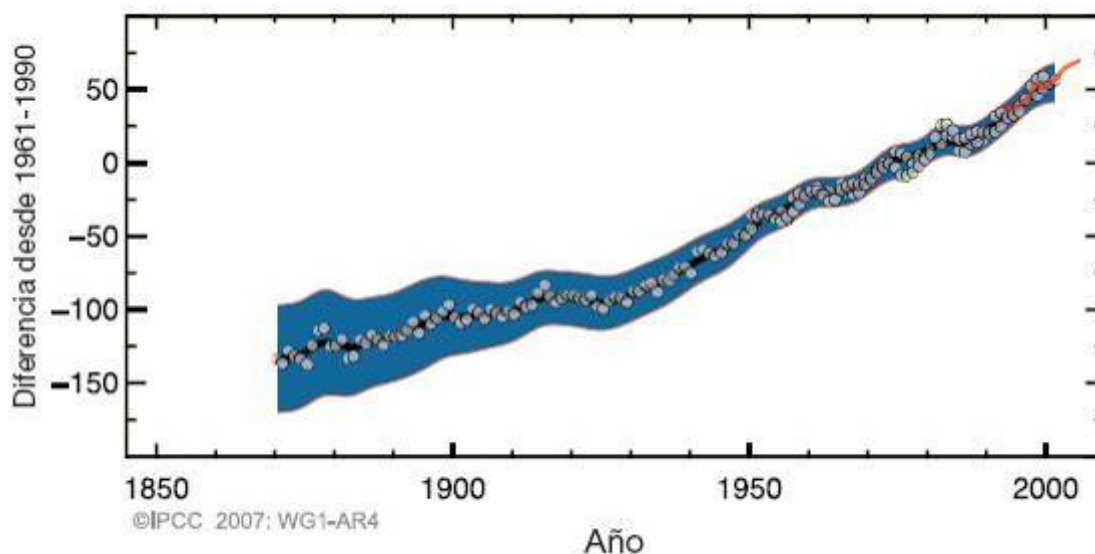


Figura 1.5. Cambios observados en el nivel medio del mar a escala mundial (IPCC, 2007)

1.2.4. Precipitaciones

Se han observado tendencias a largo plazo de 1900 a 2005 en la cantidad de las precipitaciones en muchas regiones extensas. Se ha observado un aumento significativo de las lluvias en las regiones orientales de América del Norte y del Sur, en el norte de Europa y en Asia septentrional y central. Se ha observado una disminución de las precipitaciones en el Sahel, el Mediterráneo, África meridional y en partes de Asia meridional (IPCC, 2007).

Las tendencias de la precipitación en Argentina generalmente han sido positivas desde 1916 con un pronunciado aumento desde los últimos años de la década de 1950 (Castañeda y Barros, 1994). También ha aumentado la frecuencia de precipitaciones intensas desde fines de la década de 1970.

El aumento en las precipitaciones se ha visto reflejado en un aumento de los caudales en los ríos de la cuenca del Río de la Plata. Ha habido un aumento de los caudales del Paraná y el Uruguay. En el Paraná se ha registrado un incremento de los caudales mínimos, medios y máximos anuales y frecuencia de las crecidas extraordinarias durante los últimos 30 años considerando datos desde 1902 hasta 2004. El aumento en los caudales medios significa un aumento en las precipitaciones en la cuenca alta del Paraná conjuntamente con un cambio en el uso del suelo. El aumento de la frecuencia de las grandes crecidas indica cambio en las condiciones climáticas que favorecen la generación de tormentas extraordinarias. El incremento de los caudales mínimos está fuertemente ligado a la regulación impuesta por los embalses brasileños a partir de la década del 60. Para el Uruguay el aumento del caudal medio es similar al del Paraná, pero la amplitud entre caudales mínimos y máximos ha permanecido invariable (Jaime & Menéndez, 2002).

Sin embargo, durante los primeros años de este siglo (2001 – 2004), se ha presentado un descenso del orden del 21% en los caudales medios respecto de la etapa 1980 - 2000 (Menéndez, 2005). Del análisis de las consecuencias del aumento de la temperatura media en la zona imbrífera, surge que podrían llegar a crearse condiciones de disminuciones drásticas de los caudales medios (Camilloni et al, 2005).

1.2.5. Circulación Atmosférica

La circulación sobre el Río de la Plata y el océano adyacente depende fuertemente del anticiclón subtropical del Atlántico sur, especialmente de su borde oriental. Este sistema de alta presión desempeña un papel preponderante en la determinación de los vientos que afectan el estuario del río. La ubicación de este sistema de alta presión varía durante el transcurso del año y en consecuencia también la dirección del viento sobre toda la región de influencia.

El análisis de los dos modelos de circulación superficial sobre el Río de la Plata y océano adyacente desarrollado por Escobar (2003) posibilitó detectar una tendencia del anticiclón subtropical del Atlántico Sur a intensificarse y desplazarse hacia el sur a partir de la década de 1970 y especialmente durante el verano. Este cambio observado trae como consecuencia una rotación e intensificación del viento hacia el este sobre el estuario del Río de la Plata y toda la zona de influencia siendo coherente con el aumento en el nivel medio de las aguas del río observado durante las últimas décadas.

1.3. Antecedentes del trabajo

Este trabajo, financiado como Proyecto 1180 “Mapas de duraciones de crecidas en la costa argentina del Río de la Plata considerando el Cambio Climático” por el INA (Instituto Nacional del Agua), es la continuación del Proyecto “Impact of Global Change on the Coastal Areas of the Río de la Plata: Sea Level Rise and Meteorological Effects”, financiado por la AIACC (Assessment of Impacts and Adaptation to Climate Change), orientado a estudiar los impactos del Cambio Climático y las posibles adaptaciones al mismo en los países en desarrollo. Dicho proyecto fue efectuado en colaboración con las facultades de Ciencias Exactas y Naturales, Filosofía y Letras e Ingeniería de la UBA (Universidad de Buenos Aires) durante el período 2002/05.

1.4. Objetivos de la tesis

El objetivo general de la tesis consiste en el desarrollo de una metodología para elaborar mapas de riesgo de inundación en la costa argentina del Río de la Plata debido a ondas de tormenta, para un escenario base y para escenarios futuros de Cambio Climático, incluyendo la duración de la inundación. De esta manera se complementan los mapas de

riesgo obtenidos en el estudio previo, dónde sólo se consideraba el nivel máximo alcanzado.

Los mapas se construyen para las regiones más densamente pobladas dentro de la costa argentina del Río de la Plata. La región de estudio considerada es el área costera que está comprendida entre las latitudes 34° 20' S y 35° 00' S, desde el Partido de Tigre hasta el partido de Berisso, abarcando toda la RMBA (figura 1.6).

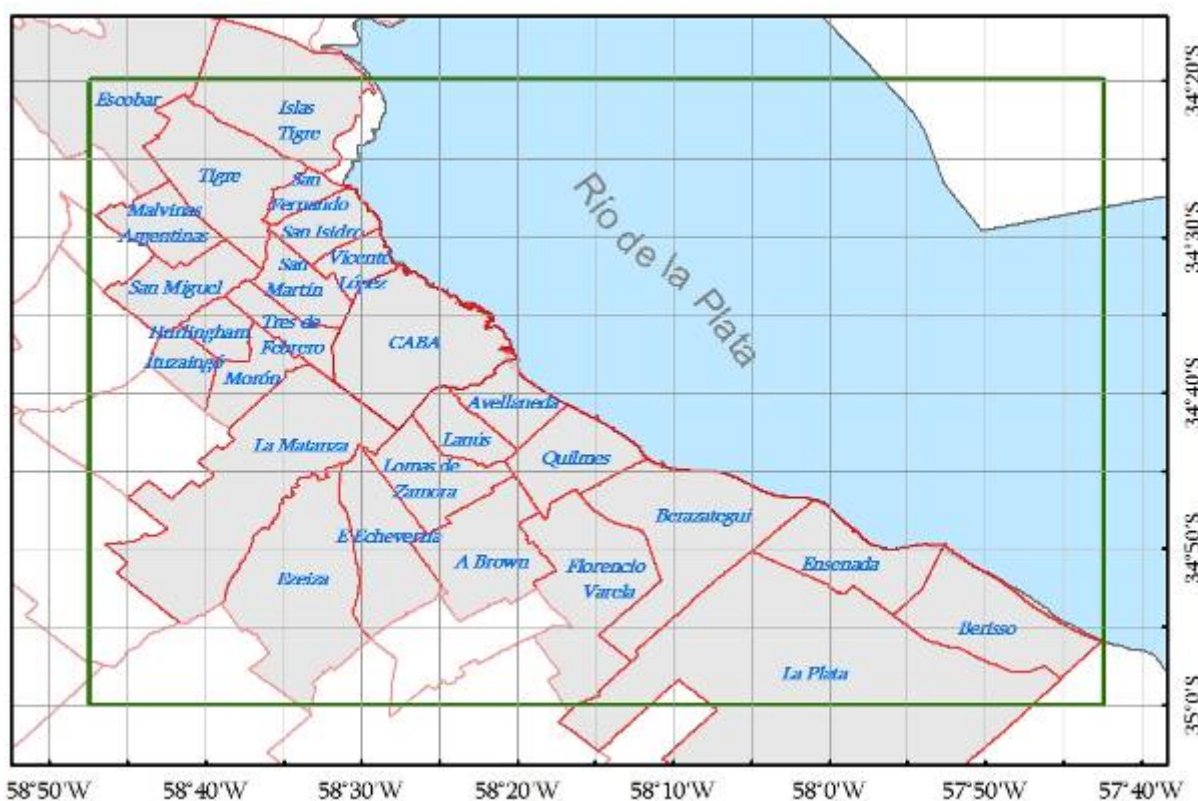


Figura 1.6. Área de estudio de inundaciones

1.5. Organización de la tesis

En el capítulo 2 se utilizan diferentes herramientas para caracterizar los niveles y duración de las inundaciones de forma estadística. Para ello se trabaja con datos de niveles observados en el Río de la Plata. Se analiza la frecuencia de ocurrencia de eventos y la recurrencia de eventos extremos.

En el capítulo 3 se presenta y justifica el modelo numérico hidrodinámico utilizado para simular el comportamiento del sistema. Se lleva a cabo la implementación de la modelación hidrodinámica para el escenario de línea de base y se comparan los resultados de la misma con los datos observados en el Río de la Plata. Se desarrolla el estudio estadístico de dicho escenario y se efectúa un ajuste heurístico del modelo que se utilizará para los escenarios futuros.

En el capítulo 4 se describe la construcción del modelo digital del terreno de la zona costera y la metodología para construir los mapas de riesgo de inundación. Se concluye con la generación de los respectivos mapas de riesgo de inundación para el escenario de línea de base.

En el capítulo 5 se lleva a cabo la modelación hidrodinámica y el estudio estadístico para los escenarios futuros y se los compara con el escenario línea de base. Se elaboran los mapas de riesgo de inundación para estos escenarios.

Por último, el capítulo 6 contiene las conclusiones del trabajo.

2. ANÁLISIS DE EVENTOS

2.1. Frecuencia de ocurrencia de eventos

Se analizan los datos de series temporales de niveles de agua (observados y simulados) en estaciones de control para identificar eventos y caracterizar estadísticamente su duración y frecuencia de ocurrencia. Para identificar eventos se utilizan diferentes umbrales (que eventualmente se asocian a cotas topográficas). En primera instancia se analiza la serie de niveles observados y luego se efectúa la comparación entre las distribuciones de los eventos observados y simulados para verificar los resultados del modelo hidrodinámico. Las duraciones se agrupan en intervalos discretos y se obtienen las frecuencias absolutas y relativas de duración de eventos.

2.1.1. Valor umbral de inundación

Se analiza la serie temporal de los registros de niveles observados en la ciudad de Buenos Aires para el período 1990 – 1999 como representativo de un escenario de línea de base. En la figura 2.1 se muestra un extracto de la serie de niveles que corresponde al mes de septiembre de 1991. Dicha serie temporal, de paso horario y referida al cero MOP (o “cero del Riachuelo”), fue provista por el SHN (Servicio de Hidrografía Naval).

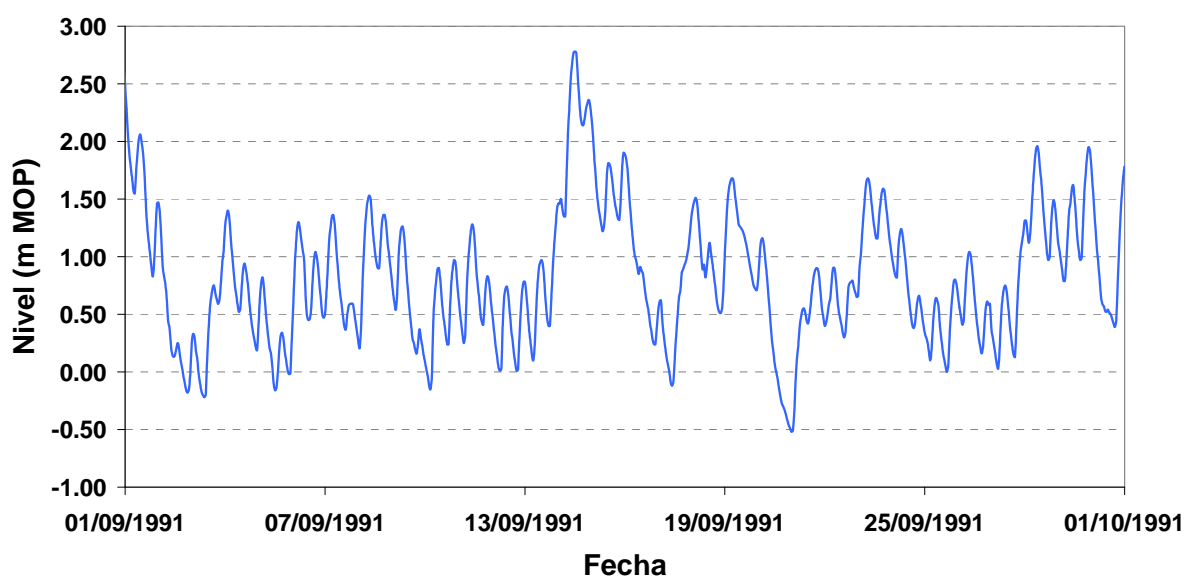


Figura 2.1. Serie temporal de niveles observados en Buenos Aires

En la figura 2.2 se muestra la distribución de frecuencia relativa de ocurrencia de niveles que surge de esa serie, habiéndose tomado un intervalo de clase de 10 cm. Se observa una distribución prácticamente simétrica, con una mediana de 0.80 m MOP.

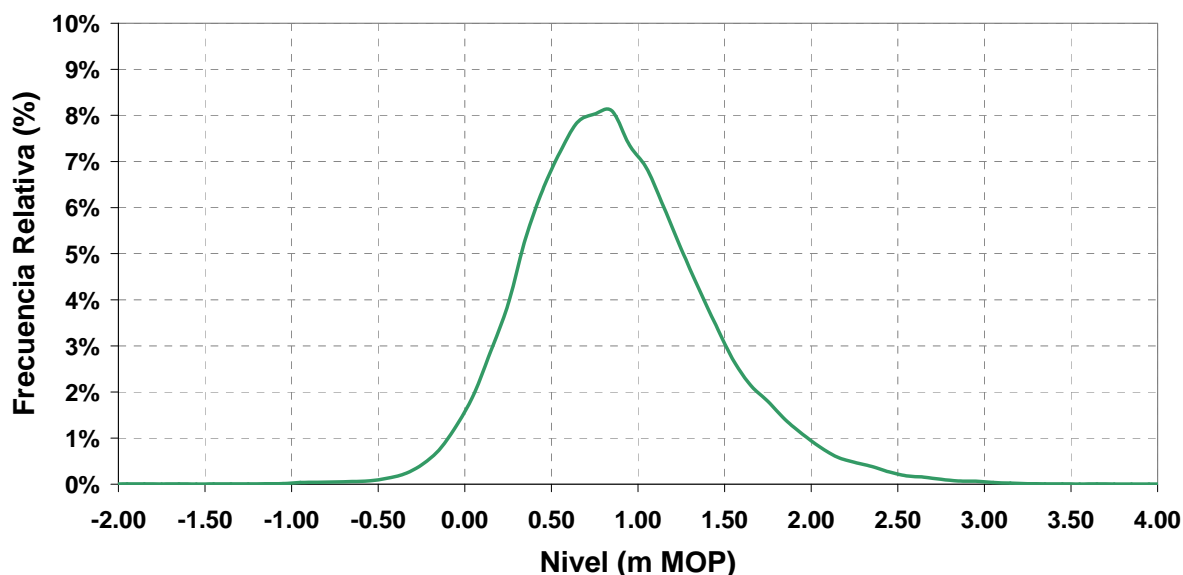


Figura 2.2. Frecuencia relativa de niveles observados en Buenos Aires

Para identificar eventos de inundación es necesario definir un umbral mínimo a partir del cual se considera que se está en una situación de inundación. Se tomó el valor 1.60 m MOP, que corresponde a un nivel representativo del máximo de marea astronómica. Además, como se verá mas adelante, este umbral es superado al menos 1 vez por mes dentro de los 10 años de registro.

La figura 2.3 presenta la distribución acumulada de la frecuencia relativa de ocurrencia de niveles obtenida a partir de la mostrada en la figura 2.2, y sobre ella se indica el valor umbral mínimo considerado. Se observa que a este le corresponde una frecuencia acumulada del 91%, es decir, ese nivel se ve superado un 9% del tiempo (aproximadamente, 5 semanas por año). Como complemento, en la tabla 2.1 se indican los valores umbral a los que les corresponden frecuencias decrecientes de superación.

<i>Tiempo de superación por año (semanas)</i>	<i>Umbral (m MOP)</i>
5 Semanas	1.60
4 Semanas	1.70
3 Semanas	1.80
2 Semanas	1.90
1 Semana	2.20
Media Semana	2.40

Tabla 2.1. Tiempo de inundación

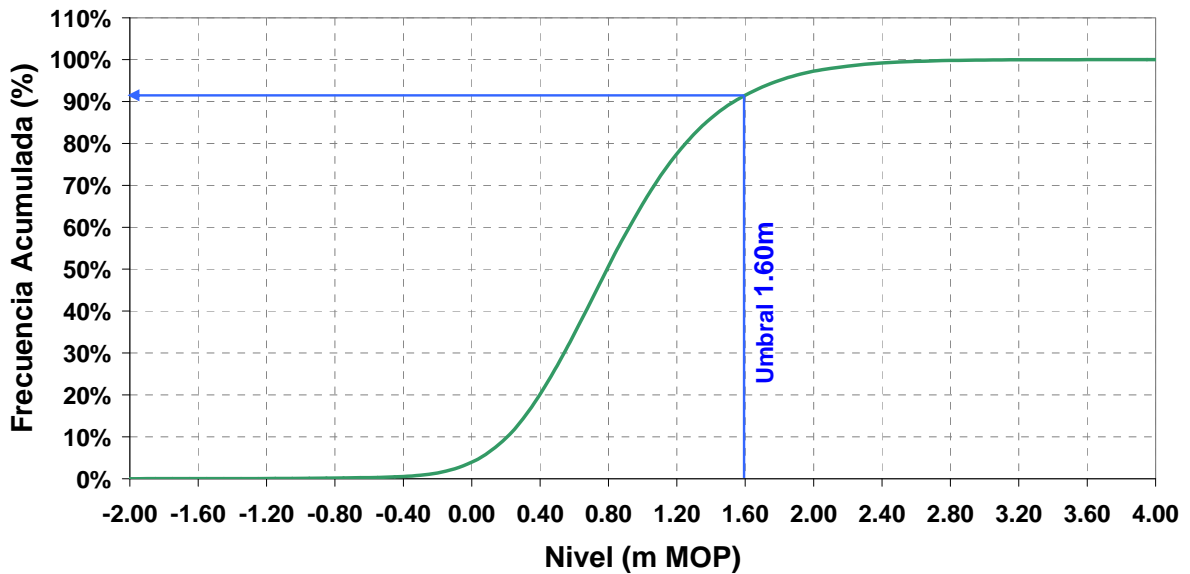


Figura 2.3. Frecuencia relativa acumulada de niveles observados en Buenos Aires

En adelante, cada vez que se haga mención de los picos, niveles o umbrales, éstos van a estar referidos al cero MOP, caso contrario se especificará.

2.1.2. Frecuencia de duraciones

Dentro de la zona inundada por un evento, la duración de la inundación depende de la cota topográfica del terreno. Obviamente, para niveles topográficos más bajos la incidencia de la inundación será mayor tanto en altura como en duración. En la figura 2.4 se muestra, a modo de ejemplo, la identificación de eventos y sus respectivas duraciones para el caso de 3 umbrales diferentes, que representan tres cotas topográficas (no inferiores al valor umbral de inundación). Se observa que, al aumentar la cota, se pasa de 4 eventos a 2 y luego a 1, y que disminuyen las duraciones de los eventos comunes asociados.

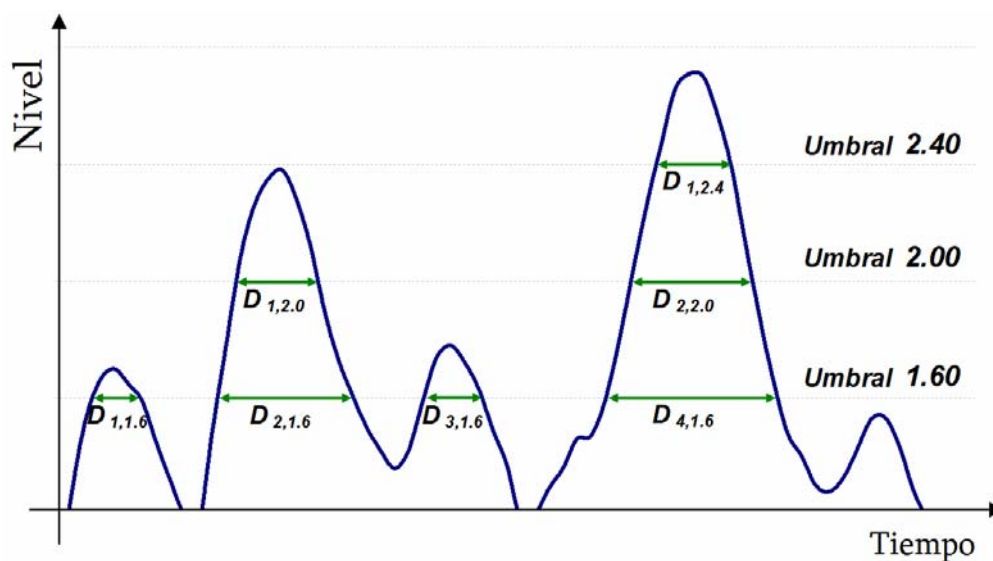
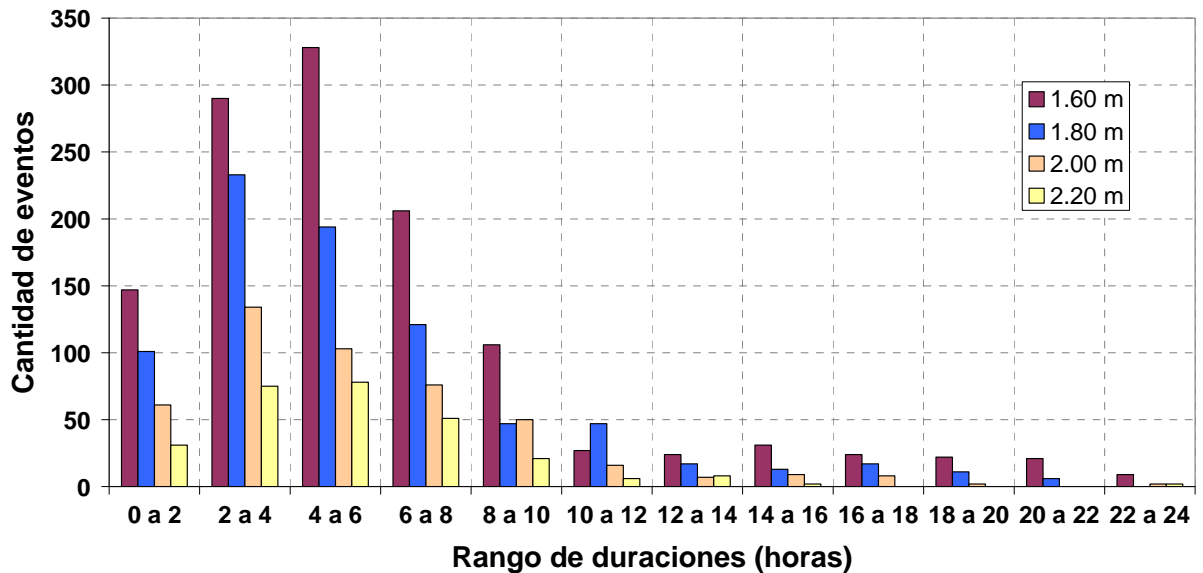
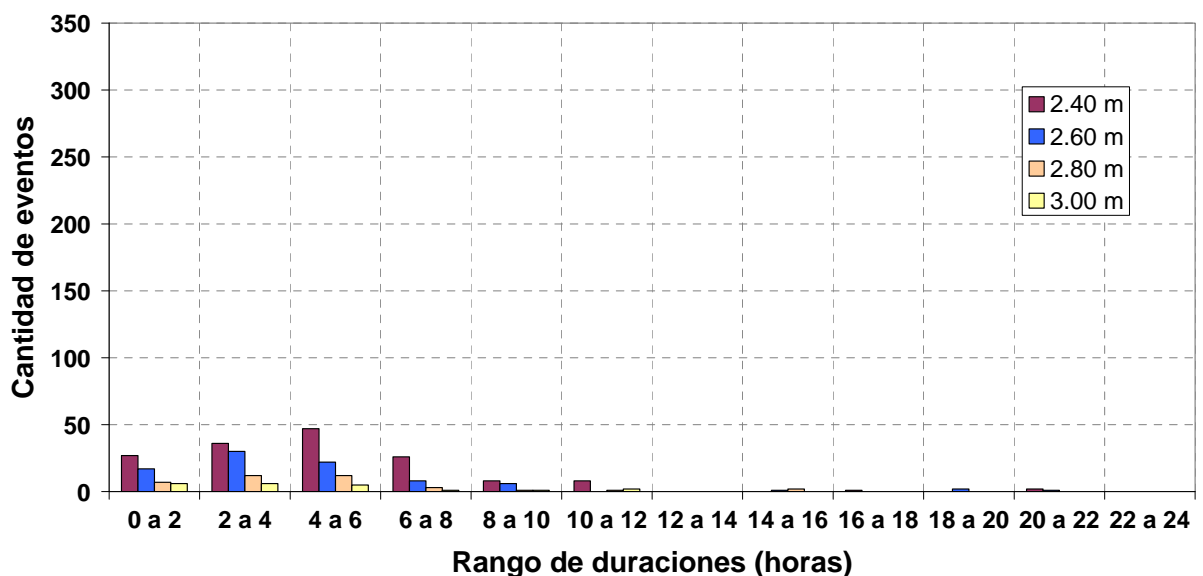


Figura 2.4. Duraciones asociadas a umbrales de 1.60, 2.00 y 2.40 m

Se ha efectuado un análisis de frecuencia de ocurrencia de duraciones. Se han agrupado los eventos según intervalos discretos de 2 horas de duración, para diferentes valores umbrales (por sobre el de inundación). En la figura 2.5 se muestran los histogramas de frecuencia absoluta para umbrales desde 1.60 a 3.00 m, espaciados cada 0.20 m, mientras que la figura 2.6 presenta la frecuencia relativa. Se observa que el máximo de frecuencia se da para duraciones de entre 2 y 6 horas.

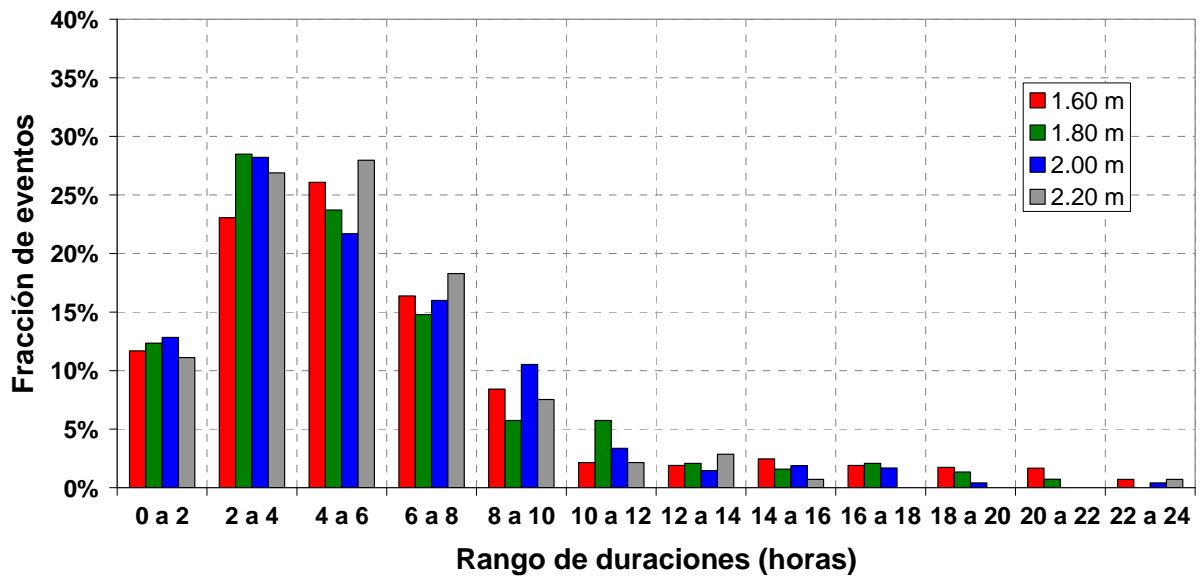


a) Umbrales de 1.60, 1.80, 2.00 y 2.20 m

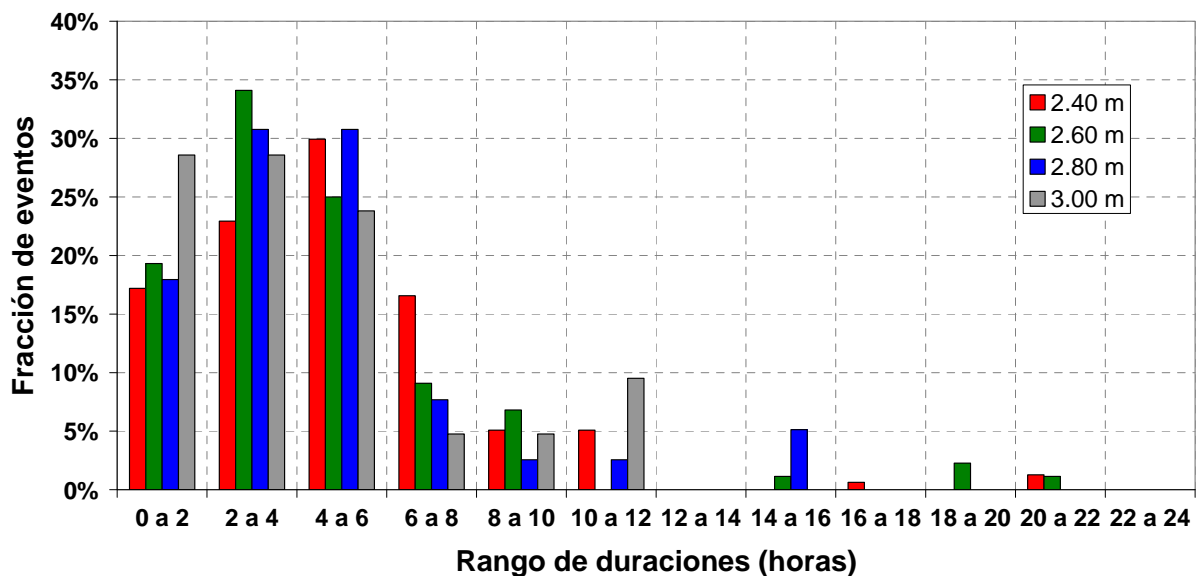


b) Umbrales de 2.40, 2.60, 2.80 y 3.00 m

Figura 2.5. Frecuencia absoluta de duración de eventos



a) Umbrales de 1.60, 1.80, 2.00 y 2.20 m



b) Umbrales de 2.40, 2.60, 2.80 y 3.00 m

Figura 2.6. Frecuencia relativa de duración de eventos

A medida que se consideran umbrales superiores, la cantidad de eventos (frecuencia absoluta) desciende considerablemente (figura 2.5); sin embargo la frecuencia relativa tiende a permanecer aproximadamente igual (figura 2.6).

Como complemento, en las figuras 2.7 y 2.8 se muestran los histogramas de frecuencia acumulada absoluta y relativa de eventos con duraciones menores a 6, 12 y 24 hs para los distintos valores umbral. Nuevamente se observa que la distribución de la frecuencia relativa tiende a permanecer invariable al cambiar el umbral. Nótese que entre el 60 y el 80% de los eventos tiene una duración menor a 6 hs y para casi el 90 % del tiempo su duración es menor a 12 hs.

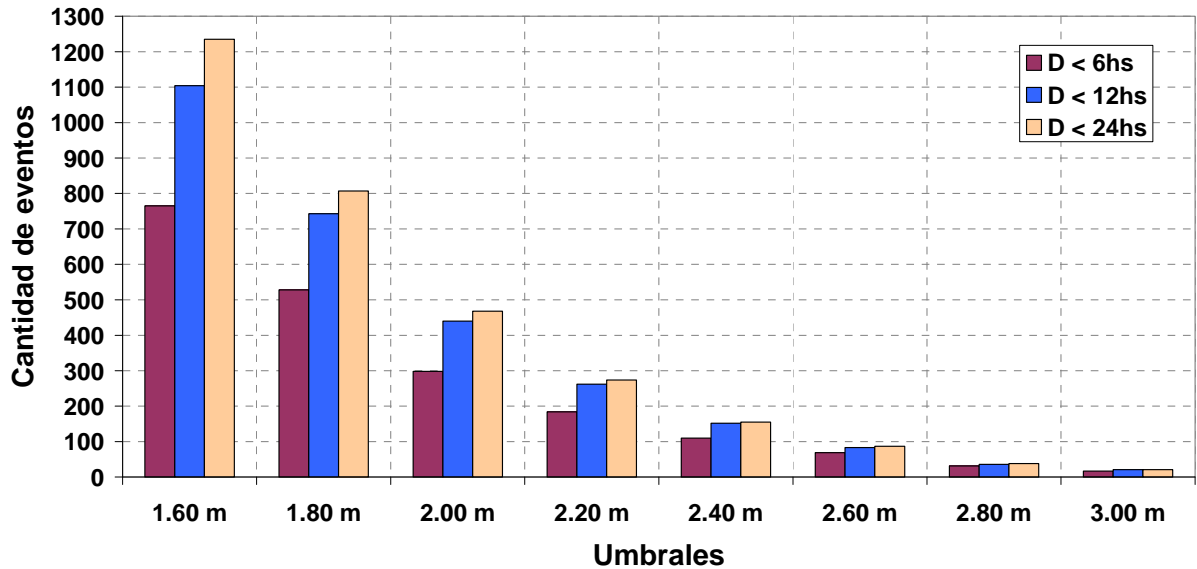


Figura 2.7. Frecuencia absoluta de duración de eventos menor a 6, 12 y 24 horas

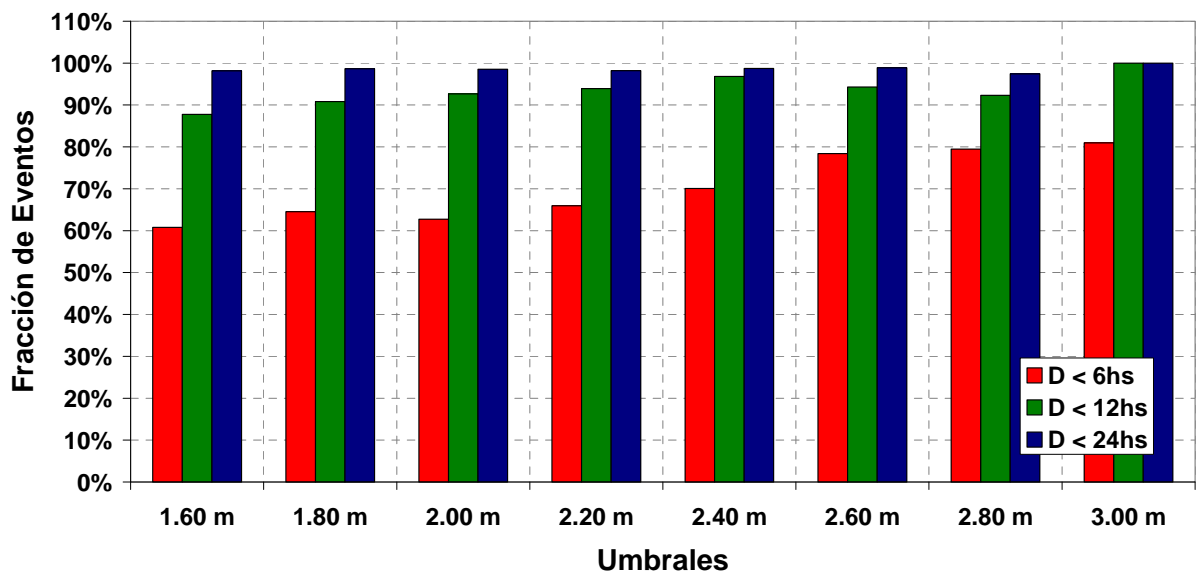


Figura 2.8. Frecuencia relativa de duración de eventos menor a 6,12 y 24 horas

2.1.3. Filtrado de marea astronómica

El nivel del Río de la Plata se encuentra influenciado por los efectos de la marea astronómica, de carácter determinístico, y de los procesos meteorológicos (vientos, presión), que pueden considerarse de carácter estocástico. Se procedió a filtrar las series de niveles observados de los efectos de la marea astronómica, simplemente restando los niveles informados en la Tabla de Mareas para el puerto de Buenos Aires producida por el SHN, pero manteniendo el nivel medio que en Buenos Aires es de alrededor de 0.80 m.

A título ilustrativo en la figura 2.9 se ha graficado la marea astronómica para el mes de febrero de 1995. Se observa que los niveles máximos y mínimos son de

aproximadamente 1.40 y 0.20 m, respectivamente, siendo la amplitud del orden de 1.20 m. El régimen de mareas es semidiurno con desigualdades diurnas (Balay, 1961). La componente principal es la M_2 (componente lunar principal semidiurna), con significativa participación de la O_1 (componente lunar principal declinacional diurna) (Mazio y Martínez, 1989).

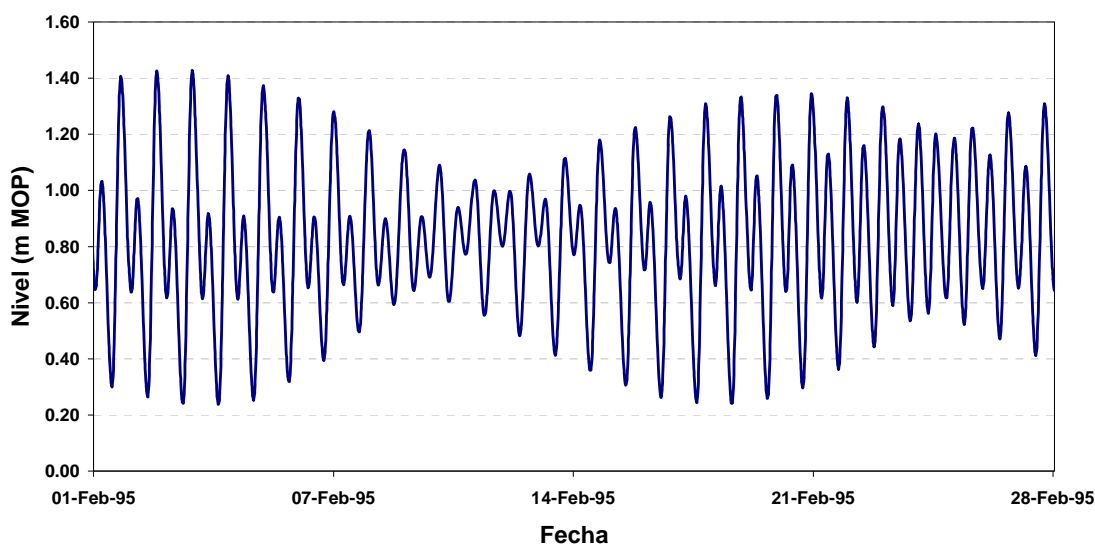
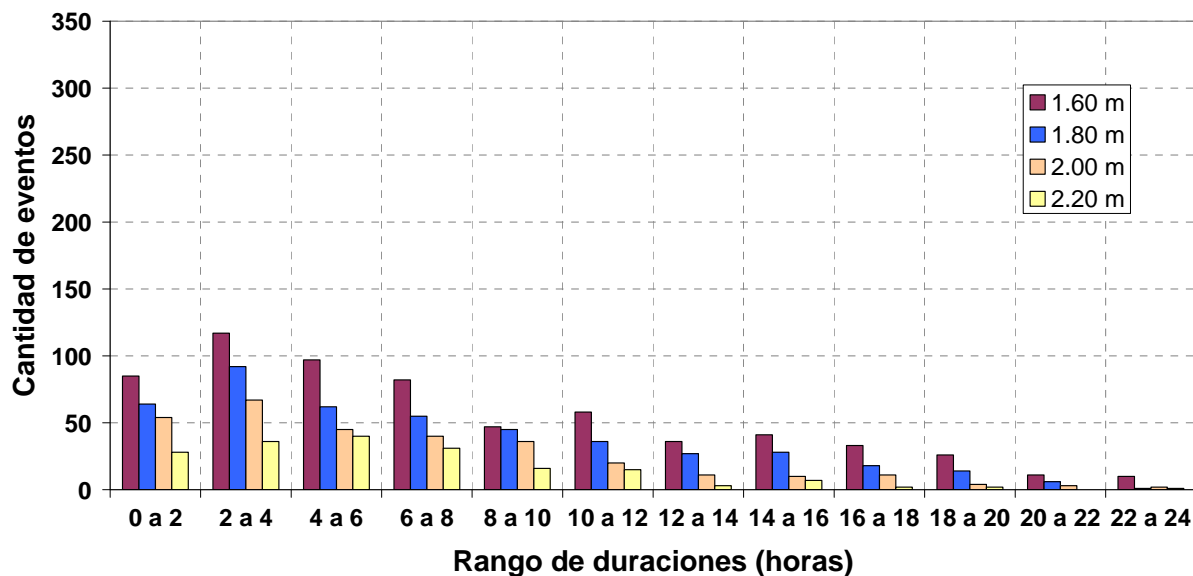
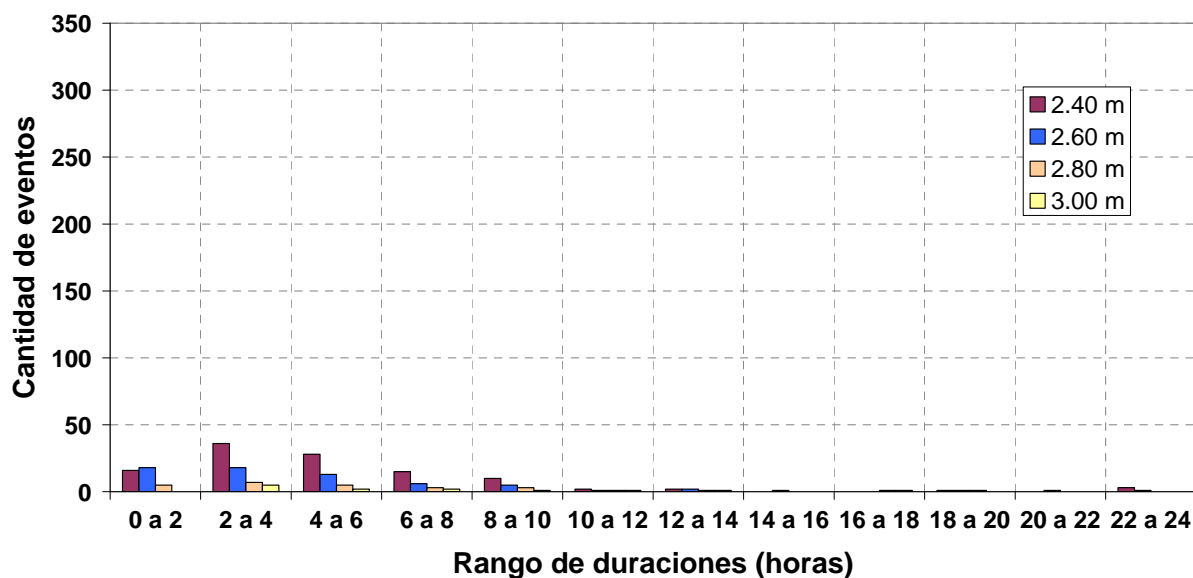


Figura 2.9. Marea astronómica febrero de 1995

De la misma manera que en el caso anterior se han graficado las frecuencias absoluta y relativa de duración de eventos (figuras 2.10 a 2.14). Al filtrar los niveles con la marea astronómica, se puede observar como disminuye la cantidad de eventos (figura 2.10), en relación a los identificados en la serie original (figura 2.5). En el caso de la frecuencia relativa (figura 2.11) también se observa una disminución respecto al caso original (figura 2.6), que es más acentuado en los rangos de duraciones de 0 a 6 hs. Dentro del rango de 0 a 12 hs se observa el cambio más significativo, prácticamente la cantidad de eventos es la mitad, en cambio para duraciones más largas se puede ver que no hay variaciones tan importantes. Se evidencia que para las duraciones de hasta 12 horas hay una gran influencia de la marea astronómica.

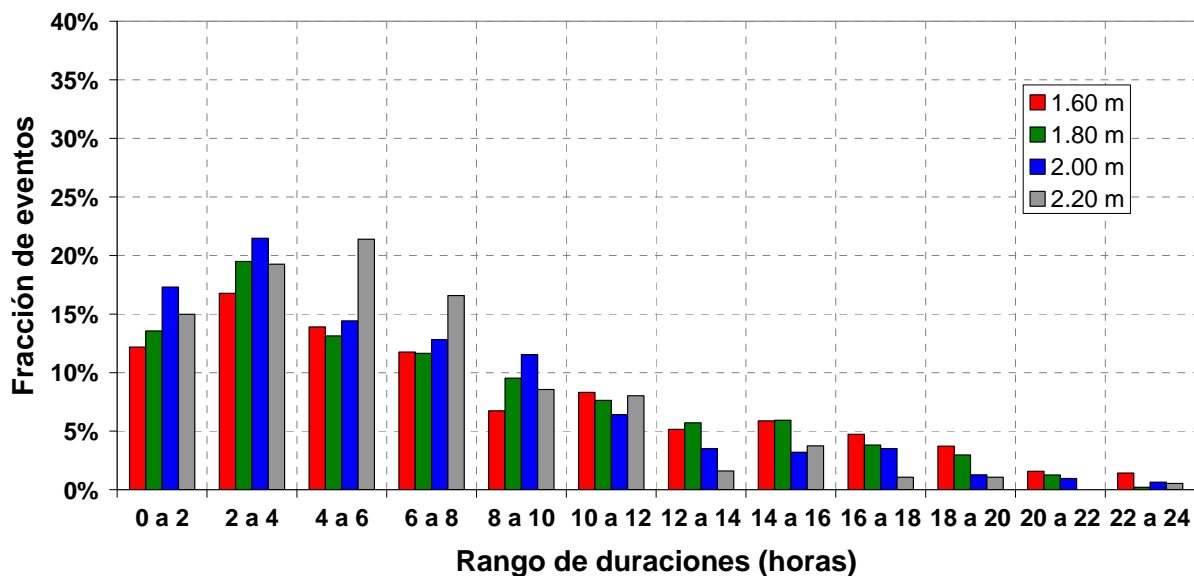


a) Umbrales de 1.60, 1.80, 2.00 y 2.20 m

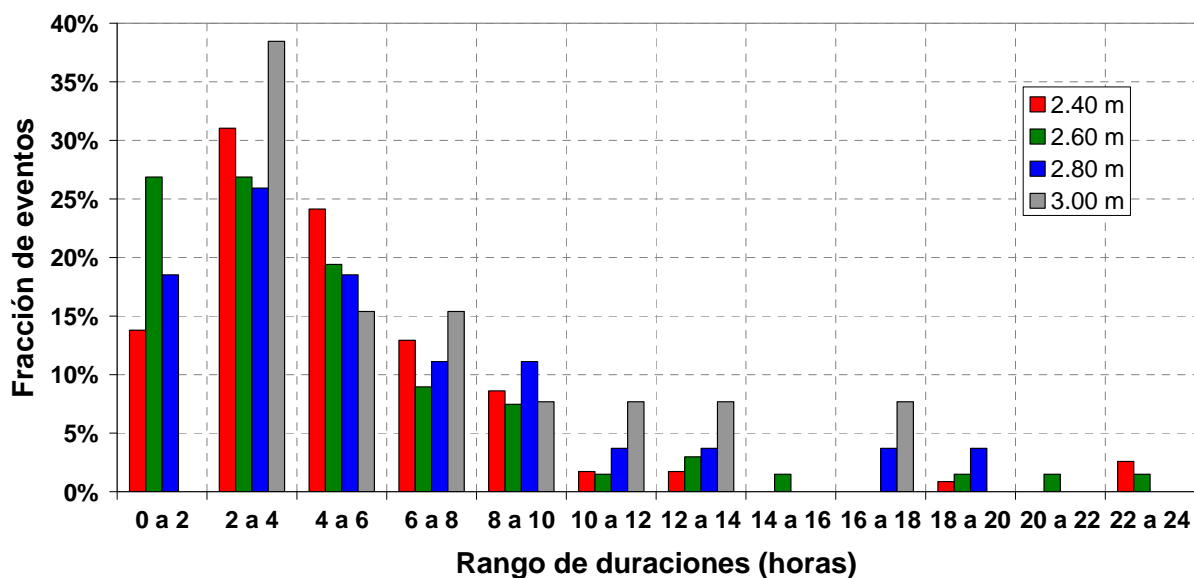


b) Umbrales de 2.40, 2.60, 2.80 y 3.00 m

Figura 2.10. Frecuencia absoluta de duración de eventos



a) Umbrales de 1.60, 1.80, 2.00 y 2.20 m



b) Umbrales de 2.40, 2.60, 2.80 y 3.00 m

Figura 2.11. Frecuencia relativa de duración de eventos

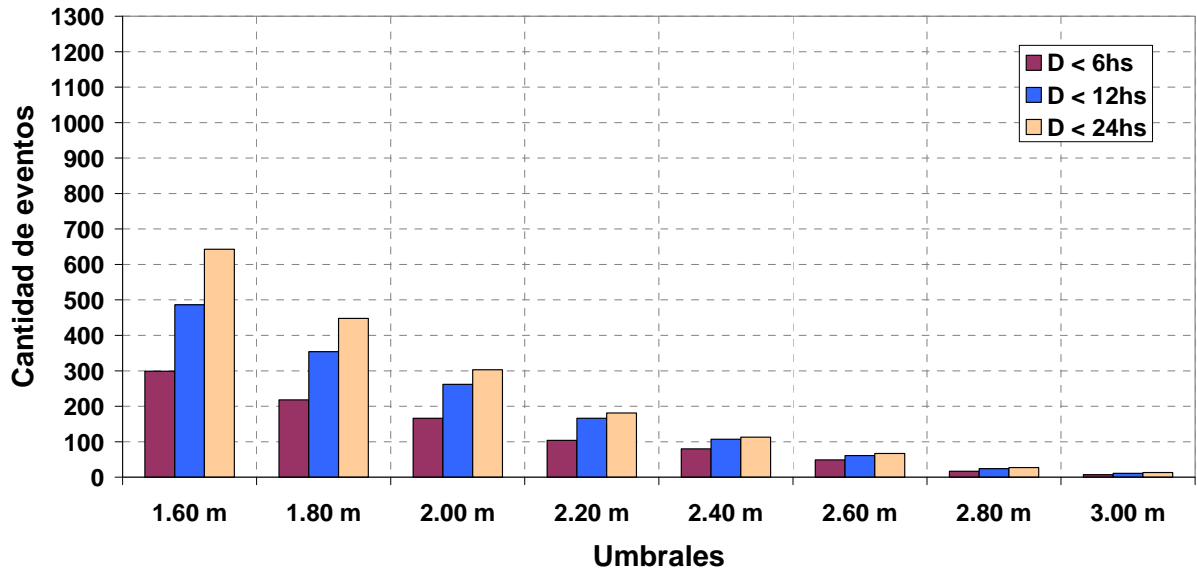


Figura 2.12. Frecuencia absoluta de duración de eventos menor a 6,12 y 24 horas

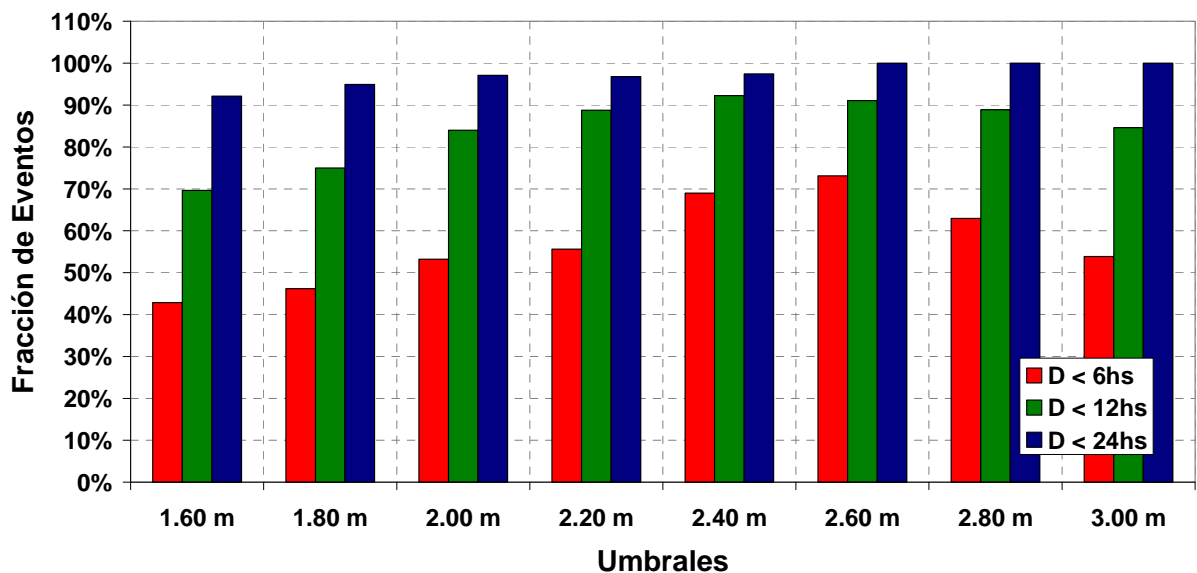


Figura 2.13. Frecuencia relativa de duración de eventos menor a 6, 12 y 24 horas

2.2. Recurrencia de eventos extremos

La metodología presentada en la sección anterior no permite estimar con precisión la frecuencia de ocurrencia de eventos extremos, ya que su ocurrencia es marginal. Se utilizan, entonces, funciones de distribución para eventos extremos.

La mayoría de los análisis estadísticos de eventos extremos se llevan a cabo en términos de una sola variable (precipitación, caudal, etc.). En el presente estudio se utiliza una distribución que tiene en cuenta dos variables; específicamente, una distribución bivariada para el nivel máximo (pico) y la duración de la inundación. Se utiliza el modelo logístico de Gumbel, en base a una metodología presentada por Yue (2001) para un

problema en el que las variables son la cantidad de lluvia y los picos de precipitación para una ciudad del Japón.

El modelo logístico de Gumbel representa una distribución conjunta de dos variables, que se construye a partir de las distribuciones marginales de las variables pico y duración. De aquí en adelante,

X : Pico máximo del evento (Variable aleatoria)

Y : Duración del evento (Variable aleatoria)

La distribución bivariada acumulada es la siguiente (Gumbel, 1960):

$$F(x, y) = \exp(-((- \ln F(x))^m + (- \ln F(y))^m)^{1/m}) \quad (m \geq 1) \quad (2.1)$$

que representa la probabilidad (Pr) de que $X \leq x$ e $Y \leq y$, siendo $F(x)$ y $F(y)$ las distribuciones marginales acumuladas de X e Y respectivamente, es decir, la probabilidad de que $X \leq x$ e $Y \leq y$. Estas se expresan como:

$$F(x) = \Pr[X \leq x] = \exp(-\exp(-\frac{x - u_x}{\alpha_x})) \quad (2.2)$$

$$F(y) = \Pr[Y \leq y] = \exp(-\exp(-\frac{y - u_y}{\alpha_y})) \quad (2.3)$$

El parámetro m , que representa la asociación entre las dos variables aleatorias X e Y , se estima de acuerdo a (Gumbel y Mustafi, 1967):

$$m = \frac{1}{\sqrt{(1 - \rho)}} \quad (2.4)$$

donde ρ ($0 \leq \rho \leq 1$) es el coeficiente de correlación (cuanto más cercano a la unidad es ρ , más fuerte es la correlación entre las dos variables), que se define como:

$$\rho = \frac{E((X - \mu_x)(Y - \mu_y))}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2.5)$$

siendo $E()$ el valor esperado, μ_x y μ_y los valores medios y σ_x y σ_y los desvíos estándar de X e Y , respectivamente. Por su parte u_x y u_y son los parámetros de ubicación, y α_x y α_y los de escala, de las distribuciones de Gumbel asociadas a X e Y , respectivamente.

Nótese que si $\rho = 0$ ($m = 1$), la distribución bivariada se compone por el producto de las dos distribuciones marginales:

$$F(x, y) = F(x)F(y) \quad (2.6)$$

Esto representa el caso en que ambas variables son independientes.

La probabilidad condicional de la función de distribución acumulada de X dado $Y \leq y$, es decir la probabilidad de que $X \leq x$ sabiendo que $Y \leq y$, se determina como:

$$F_{x|y}(x|y) = \Pr[X \leq x | Y \leq y] = \frac{F(x, y)}{F(y)} \quad (2.7)$$

Entonces,

$$F_{x|y}(x|y) = \exp \left\{ \exp \left(-\frac{(y - u_y)}{\alpha_y} \right) - \left[\exp \left(-\frac{m(x - u_x)}{\alpha_x} \right) + \exp \left(-\frac{m(y - u_y)}{\alpha_y} \right) \right]^{\frac{1}{m}} \right\} \quad (2.8)$$

De manera análoga se puede expresar la función de distribución de probabilidad condicional de Y dado $X \leq x$.

El período de retorno o tiempo de recurrencia, que es el intervalo medio entre ocurrencias sucesivas de eventos que no superan un dado valor de X ó Y , se calcula como (Chow, 1964):

$$T_x = \frac{1}{1 - F(x)} \quad (2.9)$$

$$T_y = \frac{1}{1 - F(y)} \quad (2.10)$$

De la misma manera el período de retorno condicional de X e Y asociado con los eventos ($X > x$ ó $Y > y$, por lo menos un valor de x e y es superado) es calculado como:

$$T(x, y) = \frac{1}{1 - F(x, y)} \quad F(x, y) = \Pr[X \leq x, Y \leq y] \quad (2.11)$$

Los períodos de retorno condicionales de X dado $Y \leq y$, y de Y dado $X \leq x$, son:

$$T_{x|y} = \frac{1}{1 - F(x|y)} \quad (2.12)$$

$$T_{y|x} = \frac{1}{1 - F(y|x)} \quad (2.13)$$

2.2.1. Distribuciones Marginales

2.2.1.1. Identificación de eventos

Para identificar los eventos de tormenta, se filtró la marea astronómica a través de la utilización de las tablas de marea astronómica, tal como se explicó anteriormente.

Se analizaron los valores máximos tanto de niveles como de duración de los eventos utilizando la distribución de Gumbel. El mínimo período entre eventos que se utilizó para el análisis es mensual. Esto se justifica por la relativamente alta frecuencia anual de los eventos extremos (asociados a Sudestadas) y su relativamente corta duración (del orden del día), que hace que puedan considerarse independientes unos de otros. En la tabla 2.2 se muestra la cantidad de eventos por umbral y el correspondiente paso temporal expresado en meses, que surge de dividir la cantidad total máxima de eventos (120) por la cantidad de eventos registrados. Nótese que en el umbral 1.60 m se tiene un total de 120 datos, correspondiendo un valor extremo por cada mes. El incremento en el paso temporal está en concordancia con el incremento del umbral, ya que en algunos meses el nivel no logra superar el umbral, y por ende baja la cantidad de eventos.

<i>Umbral</i>	<i>Cantidad de eventos</i>	<i>Paso Temporal (meses)</i>
1.60 m	120	1.00
2.00 m	108	1.11
2.40 m	69	1.74
2.80 m	21	5.71
3.20 m	6	20

Tabla 2.2. Cantidad de datos y paso temporal entre eventos

La distribución conjunta se construyó a partir de las series de picos máximos y las duraciones asociadas a esos picos, tal como se muestra en la figura 2.14, donde n indica el umbral considerado, i el número de evento, $N_{i,n}$ el pico máximo y $D_{i,n}$ la duración del evento asociada a ese pico.

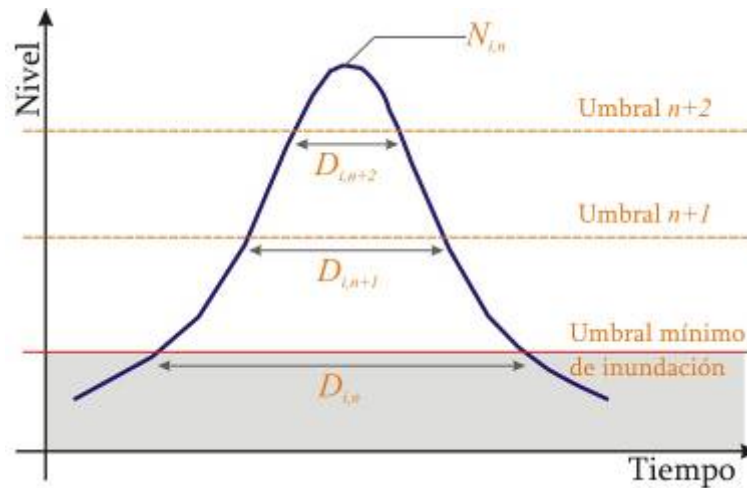


Figura 2.14. Valores característicos de una onda de tormenta

2.2.1.2. Estimación de parámetros

Para el análisis de frecuencia de una sola variable, los parámetros de ajuste de la distribución de Gumbel, posición y escala, pueden ser estimados por el método de máxima verosimilitud ó por el método de los momentos. Ahora bien, para el análisis de una distribución conjunta de dos variables correlacionadas, resulta incierto que el método de máxima verosimilitud proponga una buena estimación de las variables (Gumbel & Mustafi, 1968). Gumbel y Mustafi (1968) proponen el método de los momentos para la estimación de parámetros asociados, utilizando las ecuaciones 2.4 y 2.5 para el coeficiente de correlación y el parámetro m . Para mantener la consistencia de la metodología, los parámetros de las distribuciones marginales fueron entonces calculados utilizando el mismo método de ajuste. Los parámetros de ajuste de Gumbel (posición y escala) para los niveles son:

$$\alpha_x = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S_x \quad (2.14)$$

$$u_x = M_x - 0.577\alpha_x \quad (2.15)$$

dónde S_x es el desvío estándar y M_x el valor medio de la serie de niveles. De manera análoga se expresan los parámetros de ajuste para la duración.

En la tabla 2.2 se muestran los valores de media y desvío de pico y duración para diferentes umbrales:

Umbral	Pico		Duración	
	M_x	S_x	M_y	S_y
1.60 m	2.51	0.40	20.49	13.12
2.00 m	2.58	0.36	11.89	9.92
2.40 m	2.77	0.31	7.40	7.30
2.80 m	3.13	0.30	6.48	5.35
3.20 m	3.55	0.21	7.24	3.44

Tabla 2.3. Parámetros estadísticos del nivel y duración

Por su parte, la tabla 2.3 presenta los parámetros de ajuste de Gumbel para diferentes umbrales:

Umbral	Pico		Duración	
	α_x	u_x	α_y	u_y
1.60 m	0.31	2.33	10.23	14.57
2.00 m	0.28	2.41	7.74	7.42
2.40 m	0.24	2.63	5.69	4.11
2.80 m	0.24	3.00	4.17	4.07
3.20 m	0.17	3.45	2.69	5.69

Tabla 2.4. Parámetros de ajuste de Gumbel

2.2.1.3. Probabilidad Empírica

Para verificar si la distribución de probabilidad de Gumbel se ajusta adecuadamente al conjunto de datos observados de picos y duraciones se le ha asignado una probabilidad empírica a cada uno de estos datos. Se utilizaron posiciones de graficación, en dónde se ha asignado un valor de probabilidad a cada uno de los datos. La mayor parte de las fórmulas de graficación están representadas en función de lo siguiente. Si N es la cantidad de eventos, k el número de orden del evento (ordenados de mayor a menor intensidad), la probabilidad de excedencia del k -ésimo valor mayor, x_k es:

$$\Pr(X \geq x_k) = \frac{k - b}{N + 1 - 2b} \quad (2.16)$$

donde b es un parámetro. Cunnane (1973) estudió diferentes métodos para las posiciones de graficación y concluyó que para datos distribuidos de acuerdo con la distribución de Valor Extremo Tipo I (Gumbel), la fórmula de Gringorten ($b = 0.44$) (1963) es la más adecuada, quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$\Pr(X \geq x_k) = \frac{k - 0.44}{N + 0.12} \quad (2.17)$$

2.2.1.4. Distribuciones Marginales de Picos y Duraciones

En las figuras 2.15 y 2.16 se muestran la probabilidad de no excedencia de picos y de duraciones (observado), respectivamente, así obtenidas para el umbral de 1.60 m. Allí también se indica el ajuste de la distribución de Gumbel (teórico). Estas constituyen las distribuciones marginales $F(x)$ y $F(y)$.

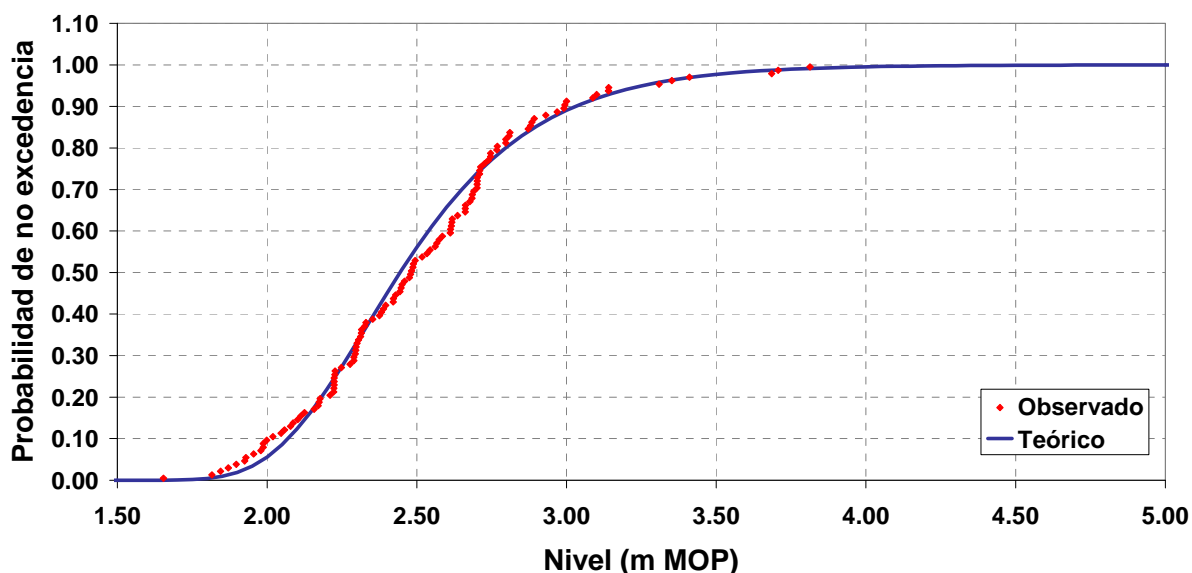


Figura 2.15. Probabilidad de no excedencia para picos – Umbral 1.60 m

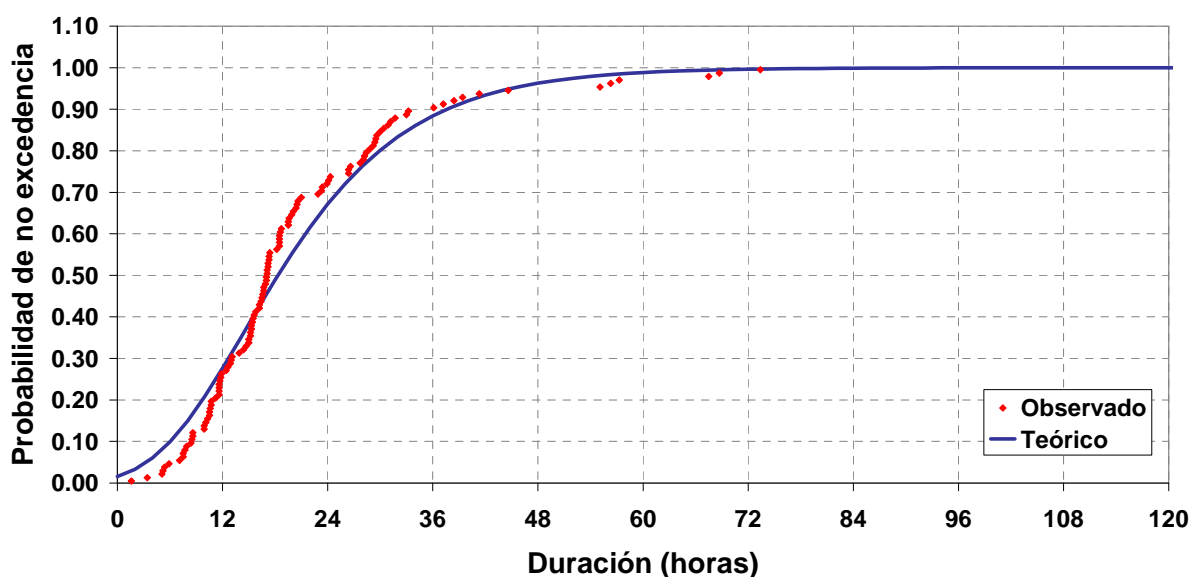


Figura 2.16. Probabilidad de no excedencia para duraciones – Umbral 1.60 m

Las figuras 2.17 y 2.18 presentan los niveles y duraciones en función del tiempo de recurrencia $T(x)$ y $T(y)$ para el umbral de 1.60 m.

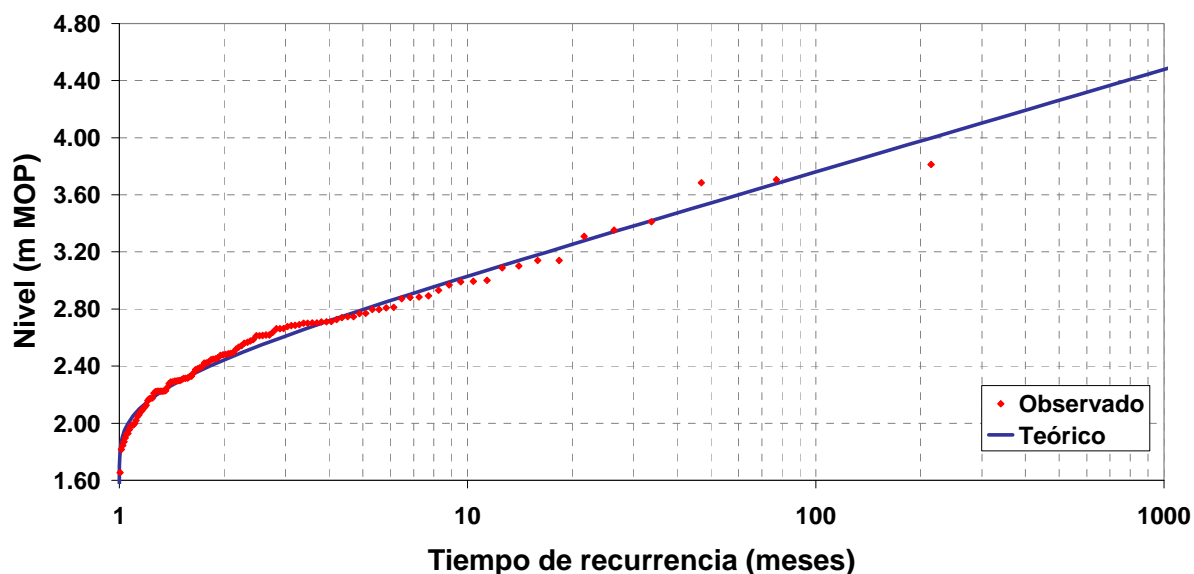


Figura 2.17. Tiempo de recurrencia para picos – Umbral 1.60 m

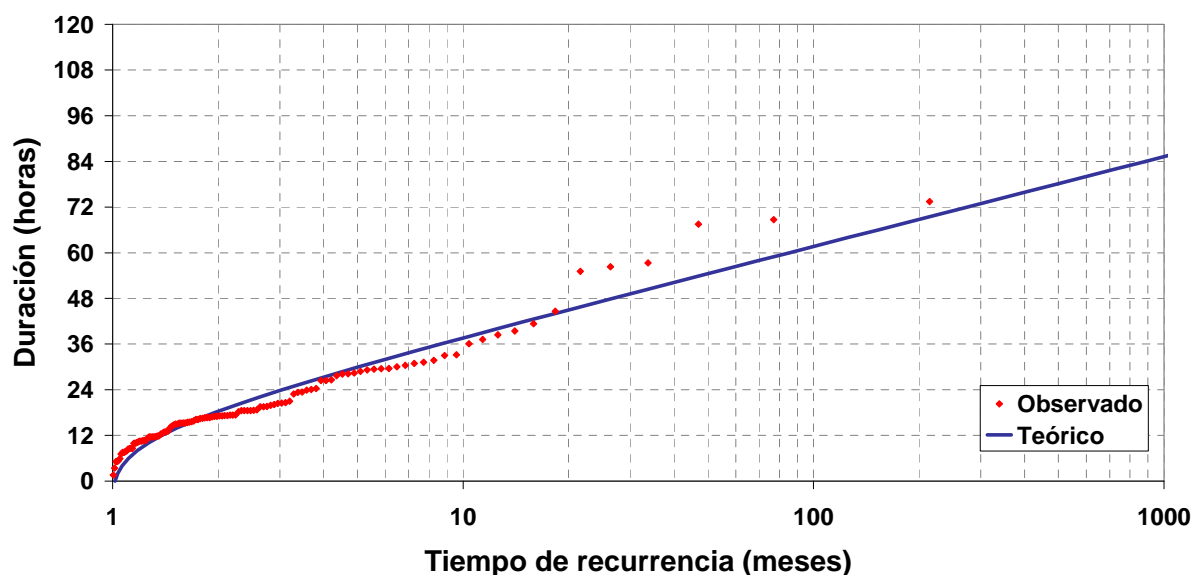


Figura 2.18. Tiempo de recurrencia para duraciones - Umbral 1.60 m

De análoga manera se determinaron distribuciones marginales para distintos umbrales. Las duraciones son diferentes para cada umbral analizado (decrecen a medida que aumenta el umbral); sin embargo, los niveles máximos alcanzados son prácticamente los mismos, más allá de una diferencia debido a la cantidad de datos utilizados para la estimación de Gumbel en cada umbral, ya que se cuenta con mayor cantidad de datos para los umbrales más bajos y menor cantidad para los umbrales altos, lo que produce una diferencia en la estimación. En las figuras 2.19 y 2.20, se presentan las distribuciones marginales para las alturas de inundación (diferencia entre el nivel máximo o pico y el umbral respectivo) y las duraciones para diferentes umbrales; se han remarcado los períodos de recurrencia de 2, 5 y 10 años, que son los utilizados posteriormente para la construcción de los mapas de riesgo de inundación. Como se señaló anteriormente, el paso

temporal para el umbral 1.60 m es mensual, de allí que el origen en abscisas arranque para un tiempo de recurrencia igual a la unidad, a medida que los umbrales son mayores la recurrencia también aumenta hasta llegar al umbral de 3.20 m, en donde se parte de una recurrencia equivalente a 20 meses.

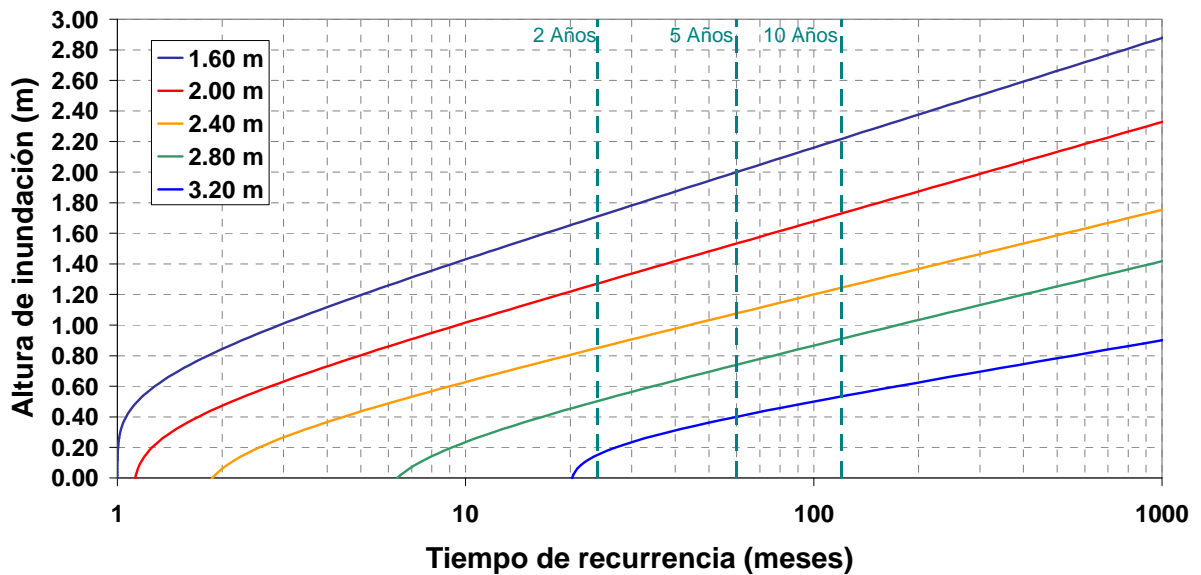


Figura 2.19. Tiempo de recurrencia para la altura de inundación

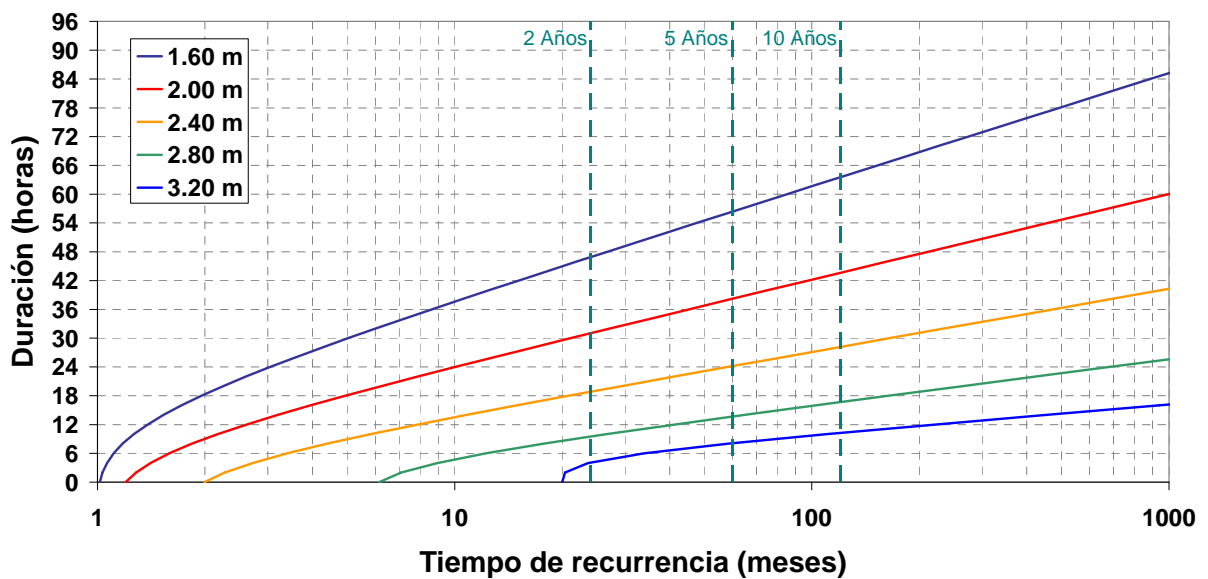


Figura 2.20. Tiempo de recurrencia para la duración

Se observa que la altura de inundación disminuye para umbrales más altos. En la distribución marginal de duraciones se puede observar la mayor pendiente para los umbrales más altos; esto hace que la diferencia entre diferentes períodos de retorno se vaya incrementando.

En la tabla 2.4 y 2.5 se muestran los valores de altura y duración de la inundación, para las recurrencias de 2, 5 y 10 años.

<i>Umbral (m MOP)</i>	<i>Período de Retorno</i>		
	<i>2 Años</i>	<i>5 Años</i>	<i>10 Años</i>
1.60	1.71	2.00	2.22
2.00	1.27	1.53	1.73
2.40	0.85	1.08	1.24
2.80	0.50	0.74	0.91
3.20	0.15	0.40	0.53

Tabla 2.5. Alturas (m) para distintos períodos de retorno

<i>Umbral (m MOP)</i>	<i>Período de Retorno</i>		
	<i>2 Años</i>	<i>5 Años</i>	<i>10 Años</i>
1.60	47	56	64
2.00	31	38	44
2.40	19	24	28
2.80	10	14	17
3.20	4	8	10

Tabla 2.6. Duraciones (hs) para distintos períodos de retorno

Para medir el grado de ajuste que existe entre la distribución teórica y la obtenida a partir de los datos muestrales se utiliza el coeficiente de determinación (R^2), consistente en evaluar la diferencia a través de:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - f_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.18)$$

Dónde y_i y f_i son los valores observados y modelados respectivamente e \bar{y} es el promedio de los datos observados. Los valores del coeficiente de determinación para los diferentes umbrales se encuentran en la tabla 2.6.

<i>Umbral (m MOP)</i>	<i>C. de Determinación (R^2)</i>	
	<i>Pico</i>	<i>Duración</i>
1.60	0.985	0.942
2.00	0.986	0.875
2.40	0.951	0.814
2.80	0.931	0.944
3.20	0.841	0.896

Tabla 2.7. Coeficiente de determinación para pico y duración

Nótese que el ajuste para los picos es más adecuado, siendo mejor para el caso de los umbrales más bajos, esto también está relacionado con la cantidad de datos que se obtienen para construir la distribución, en cambio, para las duraciones la variabilidad es mayor.

2.2.2. Distribución Conjunta

Se ha construido la función de distribución de probabilidad conjunta que permite obtener, a partir de una dada una probabilidad de ocurrencia o un período de retorno de un evento de tormenta, varias combinaciones de picos de tormenta y duraciones, y viceversa.

La figura 2.21 muestra la función de distribución conjunta $F(x,y)$ generada para el umbral 1.60 m, construida a partir de la ecuación 2.1. Se aprecian las posibles combinaciones de duraciones y picos máximos con sus correspondientes curvas de nivel asociadas a distintos valores de probabilidad de no excedencia.

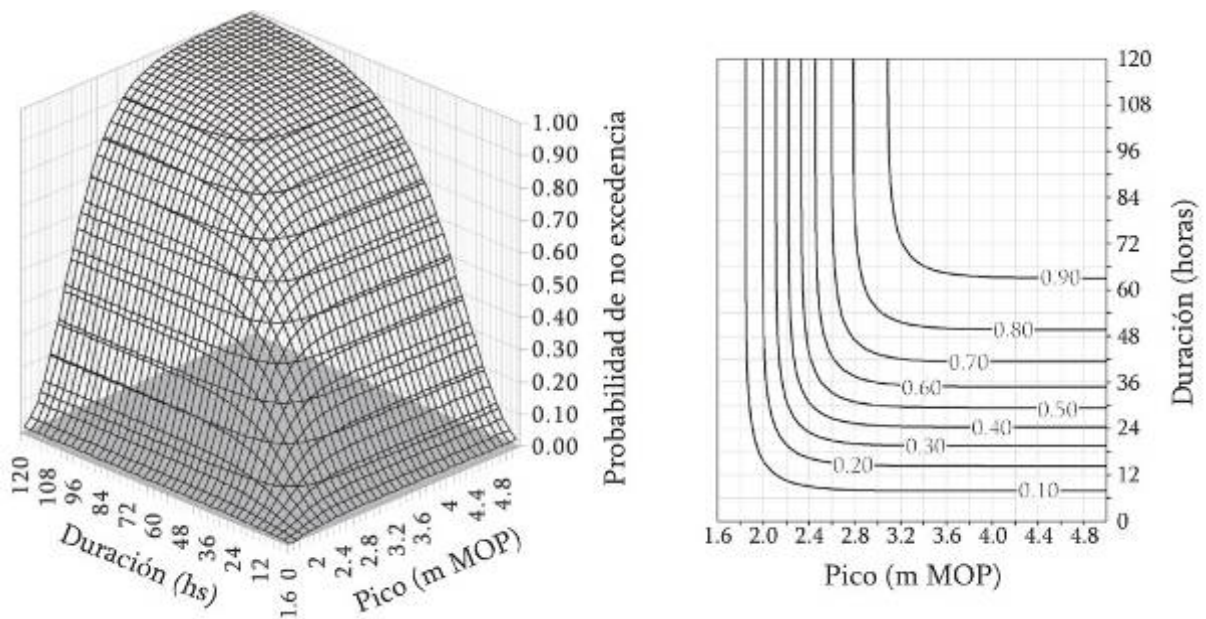


Figura 2.21. Función de distribución conjunta y curvas de nivel de picos de tormenta y duraciones - Umbral 1.60 m

La figura 2.22 muestra el período de retorno conjunto $T(x,y)$ para el mismo umbral, construido a partir de la ecuación 2.11. Los períodos de retorno están en meses y se muestran las curvas de nivel asociados a la combinación de picos y duraciones.

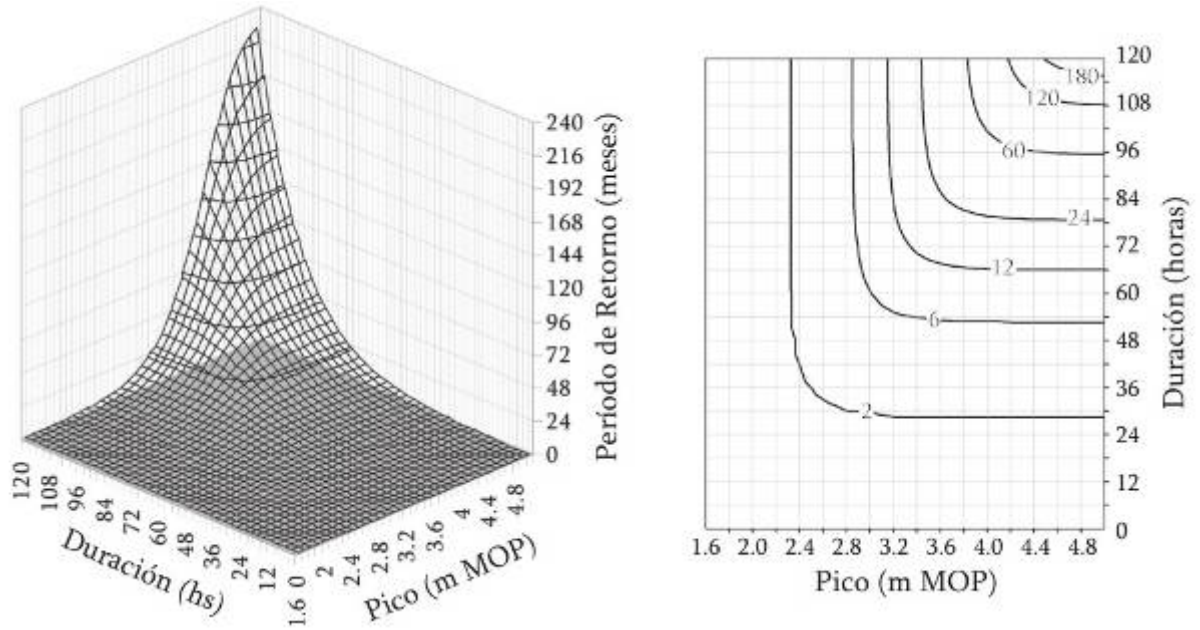


Figura 2.22. Período de retorno conjunto y curvas de nivel de picos de tormenta y duraciones - Umbral 1.60 m

Para los diferentes umbrales se ha construido la distribución conjunta y los períodos de retorno conjuntos. En la figura 2.23 se observan las curvas de nivel construidas para los diferentes umbrales y para las recurrencias de 2, 5 y 10 años, que se han marcado con líneas de diferentes trazos.

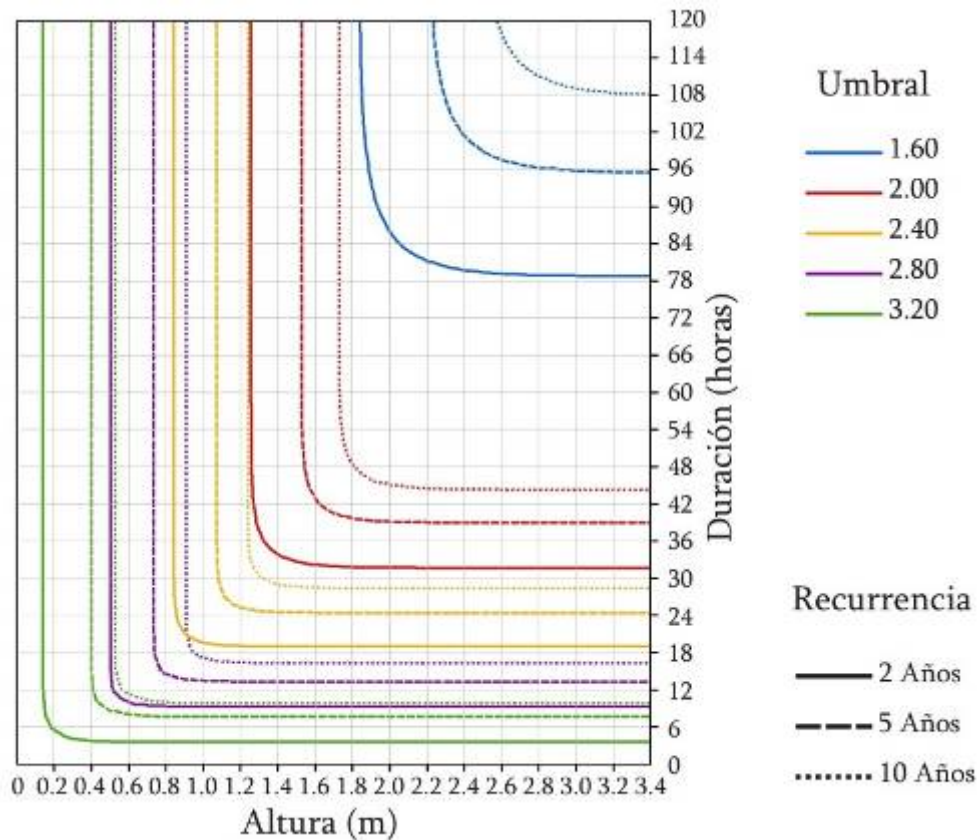


Figura 2.23. Curvas de nivel de períodos de retorno conjunto

2.2.3. Distribuciones Condicionales

Dado que existen infinitas combinaciones de pico y duración para una dada recurrencia se utilizan las distribuciones condicionales para limitarla. Estas distribuciones muestran los posibles picos o duraciones a partir de un determinado dato de pico o duración.

La figura 2.24 muestra el período de retorno condicional de los picos para dadas duraciones $T_{Y/x}$, mientras que la figura 2.25 presenta el período de retorno condicional de las duraciones para dados picos $T_{Y/x}$ para el umbral 1.60 m, siendo construidas a partir de las ecuaciones 2.12 y 2.13 respectivamente. Se puede observar para ambos casos que, a medida que aumentan los valores de pico o duración las curvas se van solapando; en el límite asintótico, para la duración ó el nivel tendiendo a infinito, se obtienen las distribuciones marginales.

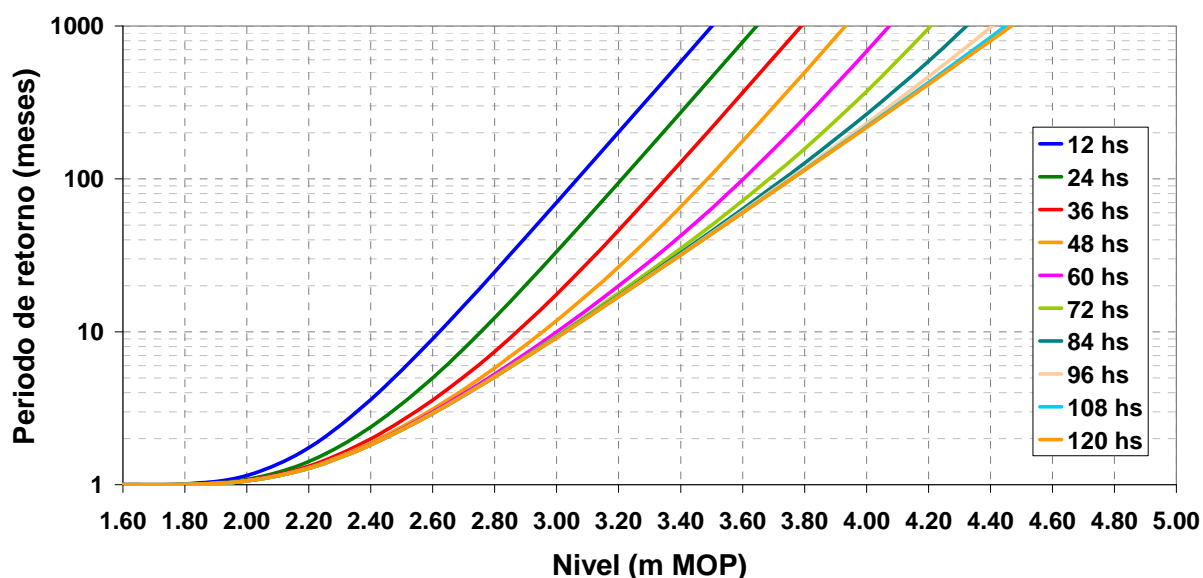


Figura 2.24. Período de retorno condicional de picos para dadas duraciones - Umbral 1.60 m

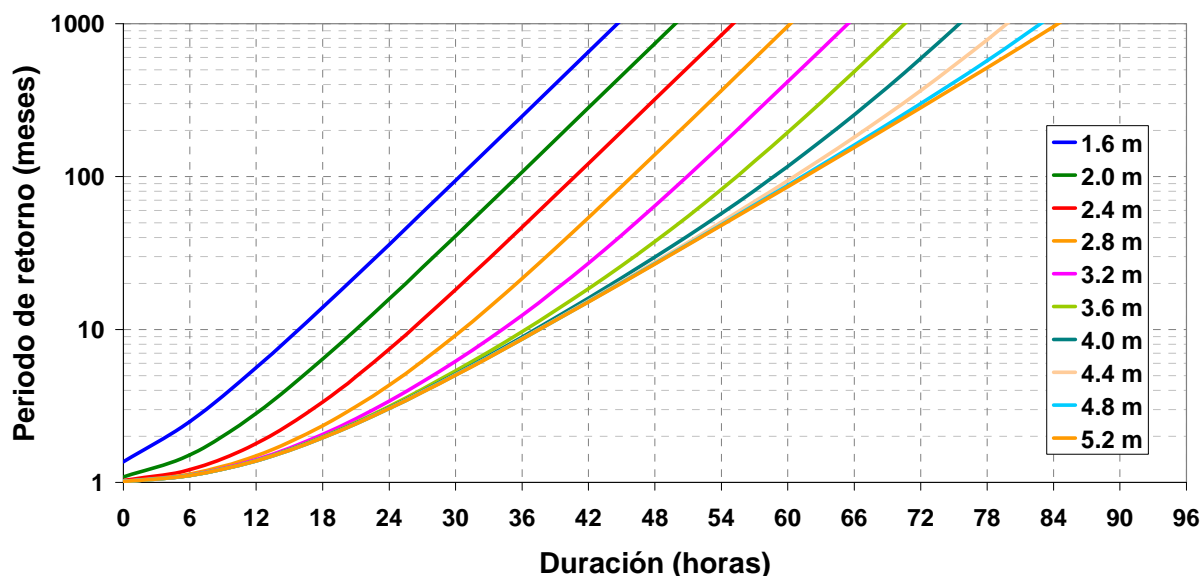


Figura 2.25. Período de retorno condicional de duraciones para dados picos - Umbral 1.60 m

Con las distribuciones condicionales se puede elaborar información estadística acerca de la altura y duración de la inundación para los diferentes períodos de retorno.

2.2.4. Aplicación de las funciones de distribución

Para facilitar la utilización de las diferentes distribuciones para eventos extremos se ha elaborado un ejemplo que cuenta con los pasos secuenciales para su aplicación. No todos los datos que se extraen a partir de las distribuciones sirven específicamente para construir los mapas de riesgo de inundación, sin embargo tienen como objetivo complementar con información estadística a los mismos.

En este ejemplo se ha considerado el análisis de las duraciones de inundación para una recurrencia de 2 años. Primeramente, a partir de las distribuciones marginales de duraciones, se obtienen las duraciones para los diferentes umbrales (figura 2.26). Se observa entonces, que 1 vez cada 2 años, para el umbral de 1.60 m, se obtiene una duración de por lo menos 47 hs, siendo la duración descendente para los umbrales mayores, obteniéndose la menor duración de 4 hs para el umbral 3.20 m.

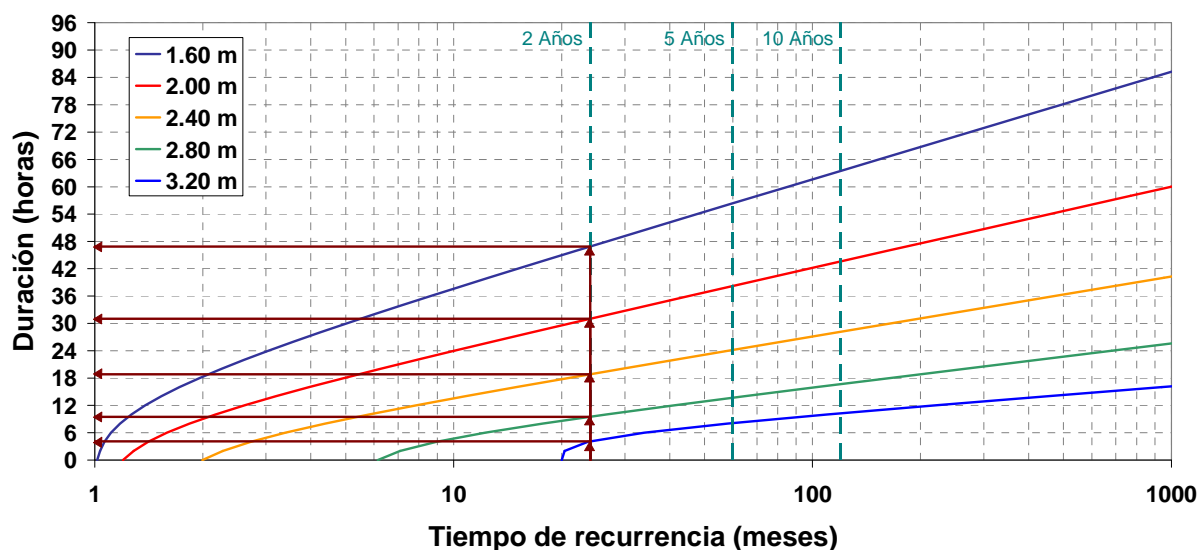


Figura 2.26. Duraciones obtenidas para un período de retorno de 2 años.

Una vez fijada la duración máxima se utiliza la distribución condicional de duraciones para dados picos en cada umbral. En este ejemplo se analiza solamente el umbral de 1.60 m (ya que el procedimiento es el mismo para todos los umbrales) cuya duración marginal es de 47 hs. Como se había dicho con anterioridad, con la distribución conjunta se obtienen infinitas combinaciones de picos y duraciones, entonces para poder asignar una recurrencia se utiliza la correspondiente distribución condicional. Con esta distribución se pueden hacer 2 posibles interpretaciones de los datos a partir de las curvas.

La primera interpretación consiste en lo siguiente, fijando una recurrencia de 2 años, la máxima duración obtenida a través de la respectiva distribución marginal será de por lo menos 47 hs. En la figura 2.27 dicho valor corresponde el límite asintótico de las curvas de picos, en cambio si se considera que el pico de inundación es menor a un determinado valor, desciende la duración. Se han remarcado las duraciones de 38 hs y 43 hs obtenidas si se producen picos menores a 2.80 m y 3.20 m, respectivamente. Esto muestra una disminución considerable de las duraciones, análisis que no se podría aplicar en el caso de una sola variable.

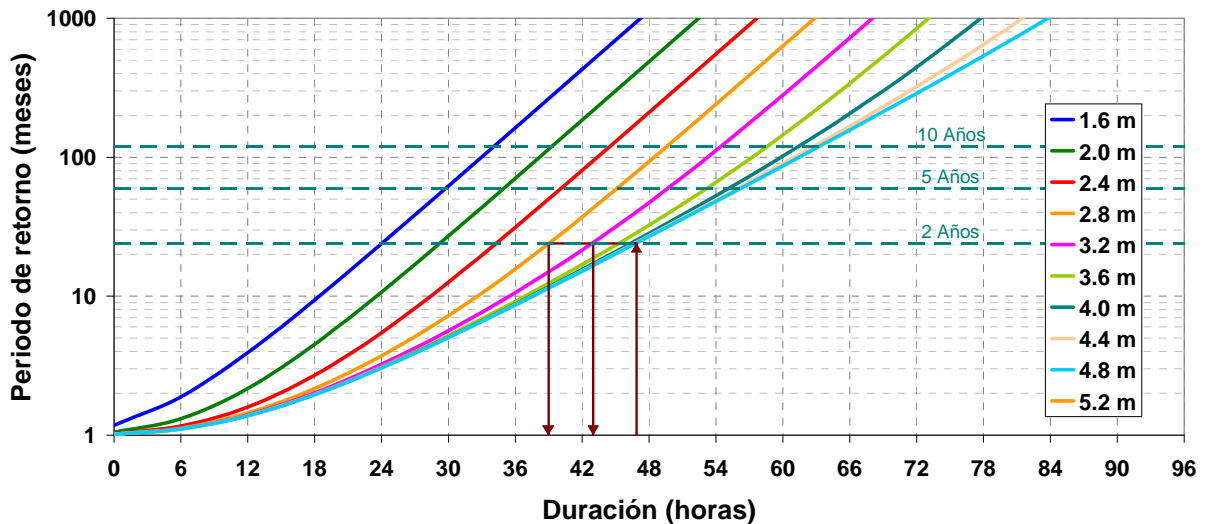


Figura 2.27. Período de retorno condicional de duraciones para dados picos fijada una recurrencia de 2 años - Umbral 1.60 m

Otra forma de interpretación consiste en fijar la duración, al igual que en el caso anterior para una recurrencia de 2 años se obtiene una duración de 47 hs. Para una recurrencia del doble de la anterior se obtiene un pico de 3.20 m. Va a ser menos probable que ocurra una duración de 47 hs para menores valores de picos de inundación. Esto se observa en la figura 2.28. De esta forma se obtiene información estadística acerca de la frecuencia de picos para una dada duración máxima.

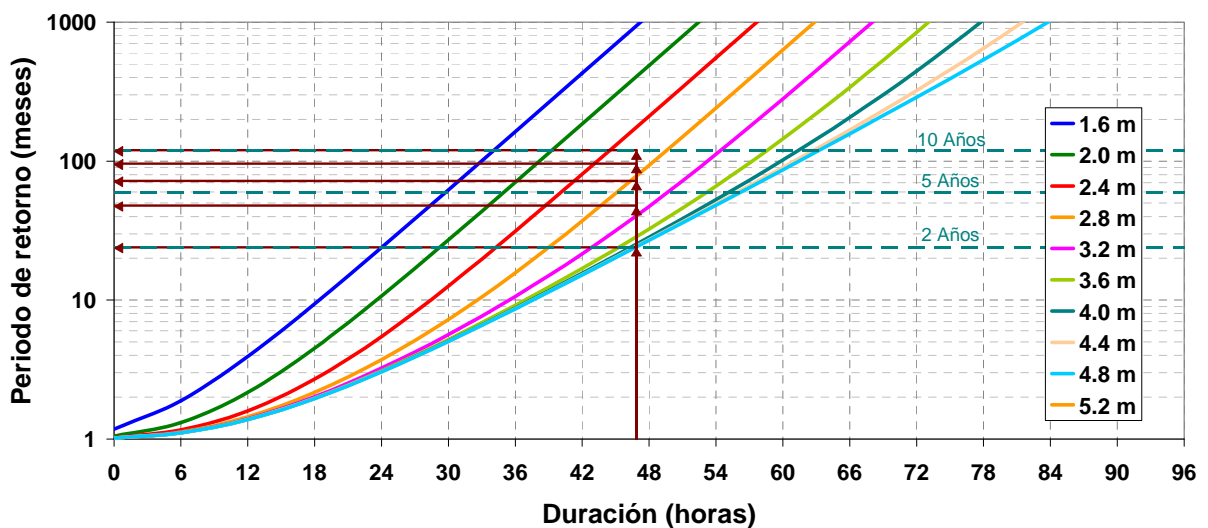


Figura 2.28. Período de retorno condicional de duraciones para dados picos fijada una duración de 47 hs - Umbral 1.60 m

Para esa duración máxima van a existir distintas alturas de inundación con distinta probabilidad de ocurrencia. Esto se ha representado en la figura 2.29 de la forma "1 de cada n crecidas con una altura menor a un determinado valor "x" tiene una duración de por lo menos "y" hs", para las recurrencias de 2, 5 y 10 años. El caso complementario se muestra en la figura 2.30.

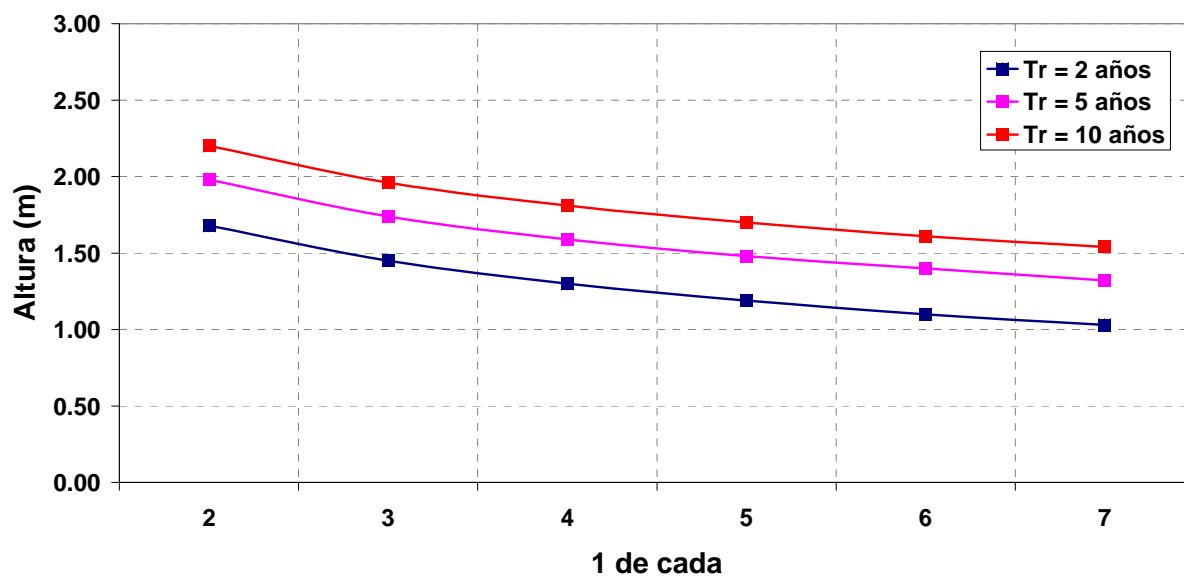


Figura 2.29. Frecuencia de altura de inundación fijada una duración máxima para distintas recurrencias - Umbral 1.60 m

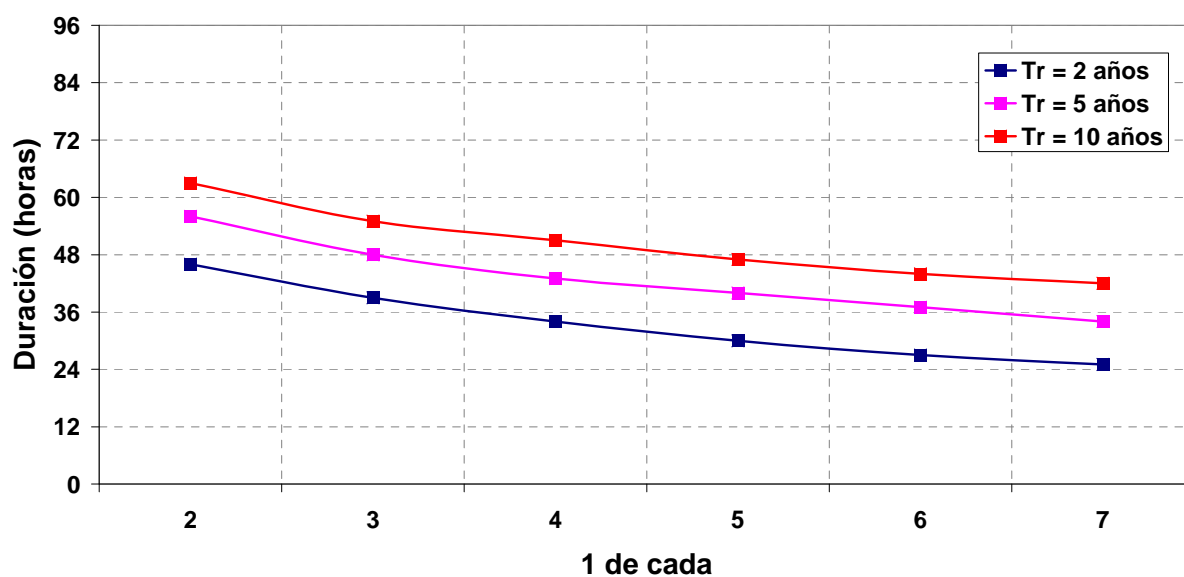


Figura 2.30. Frecuencia de duración de inundación fijada una altura máxima para distintas recurrencias - Umbral 1.60 m

De la misma manera que se efectuó para el umbral 1.60 m se procede con los umbrales mayores. Las figuras 2.31 y 2.32 respectivamente muestran estas frecuencias para los diferentes umbrales y recurrencias.

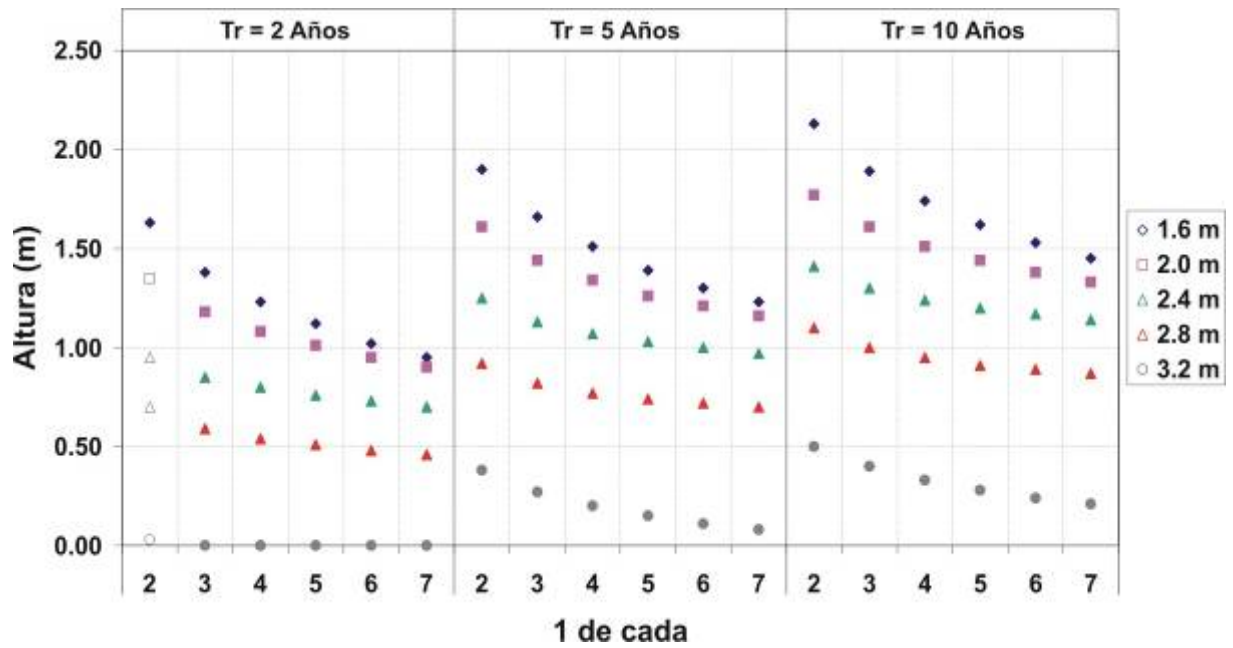


Figura 2.31. Frecuencia de altura de inundación fijada una duración máxima para distintas recurrencias

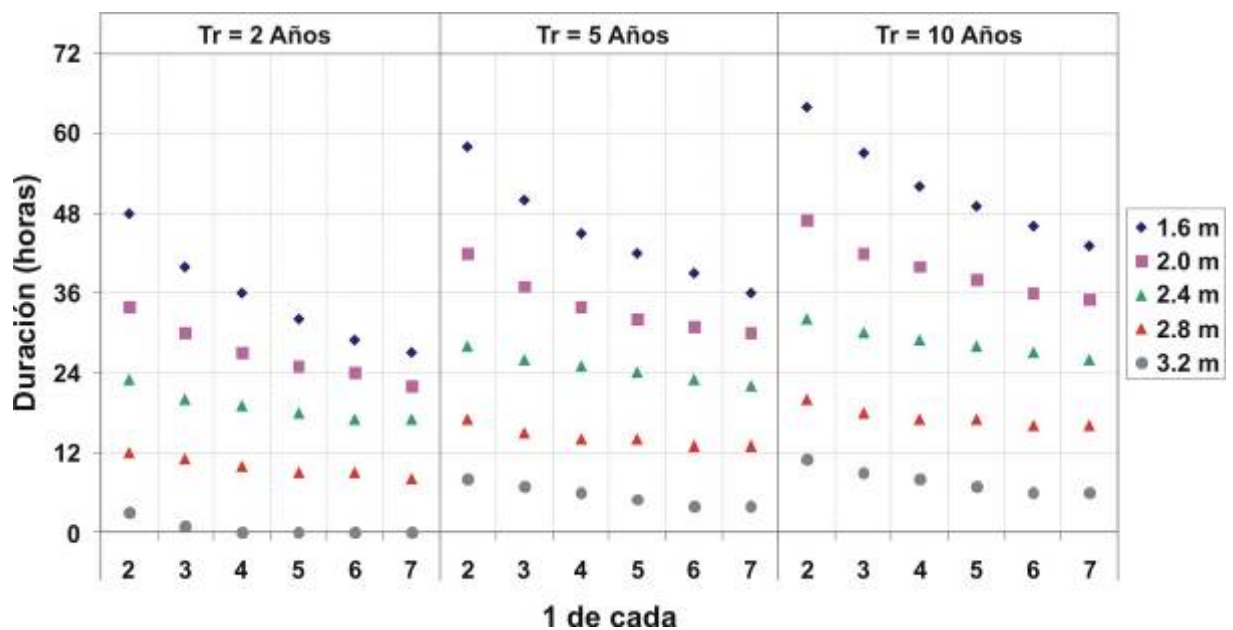


Figura 2.32. Frecuencia de duración de inundación fijada una altura máxima para distintas recurrencias

3. MODELACIÓN DE EVENTOS

3.1. Planteo general

Una forma eficiente de contar con una representación operativa de la hidrodinámica consiste en recurrir a la modelación numérica de los fenómenos. Se dispuso del modelo RPP-2D (Re y Menéndez, 2003), cuyo dominio incluye gran parte del Frente Marítimo de modo de poder simular, además de las ondas de marea, la generación de ondas de tormenta. Se trata de un modelo bidimensional (2D) en el plano horizontal, es decir, integrado en la dirección vertical.

A los fines de simular la propagación de ondas superficiales, el análisis bidimensional horizontal resulta suficiente, ya que la longitud de onda (ó la extensión) es muy superior a la profundidad (Whitham, 1974; Menéndez y Norscini, 1982). Las ondas superficiales se propagan con una celeridad de

$$c = \sqrt{gh}, \quad (3.1)$$

donde g es la aceleración de la gravedad y h la profundidad. Utilizando la profundidad media del río, estimada en 7 m, se obtiene una celeridad de onda de 30 km/h. La longitud de onda (ó la extensión) resulta de multiplicar el período (ó la duración) de la onda por la celeridad. En el caso de las ondas de marea, con período de alrededor de 12 horas, resulta una longitud de onda del orden de los 360 km, muy superior a la profundidad. Esto sigue siendo válido para ondas de duraciones horarias.

3.1.1. Software HIDROBID

El modelo RPP-2D está implementado utilizando el software HIDROBID II (Menéndez, 1990). Este software está basado en la resolución numérica de las ecuaciones para aguas poco profundas. 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 de corte 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):

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f_g v + g \frac{\partial(h+z_0)}{\partial x} + \frac{\tau_{fx}}{\rho h} - \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) &= 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - f_g u + g \frac{\partial(h+z_0)}{\partial y} + \frac{\tau_{fy}}{\rho h} - \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) &= 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

donde

x, y : Coordenadas espaciales

u, v : Velocidades medias verticales en esas direcciones

f_g : Factor geotrófico

t_{fx}, t_{fy} : Componentes de la tensión de corte sobre el fondo

t_{sx}, t_{sy} : Componentes de la tensión de corte sobre la superficie del agua debida al viento

T : Tensor de las tensiones efectivas (incluye los efectos de la viscosidad, la turbulencia y la advección diferencial).

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 centrados en nodos diferentes) y el método es del tipo implícito de direcciones alternadas (Menéndez, 1990).

3.1.2. Modelo RPP-2D

3.1.2.1. Dominio de Cálculo

El dominio de cálculo del modelo RPP-2D (figura 3.1) 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 35.8° S al norte y 40.5° S al sur y el meridiano 51.5° 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. El área del dominio de cálculo resultante es de 1018 x 953 Km.



Figura 3.1. Dominio de cálculo

3.1.2.2. Batimetría

La información batimétrica del modelo RPP-2D se obtuvo a partir de la combinación de dos bases de datos: una del del Río de la Plata y su Frente Marítimo, provista por el SHN de la Argentina (Dragani, 2002) y otra consistente en datos de profundidades digitalizados del plano batimétrico del Río de la Plata (CARP, 1989) y de las cartas náuticas H-113 y H-116 del SHN. Los datos de la segunda reemplazaron a los de la primera en el dominio coincidente. Con ellos se construyó por interpolación el modelo numérico del terreno (figura 3.2), adoptándose 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.

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. En consecuencia, se adopta para toda el área de extensión del modelo RPP-2D un valor uniforme del coeficiente de rugosidad de Manning de 0.015, que es el obtenido en la calibración del modelo RP2000 del INA (Jaime y Menéndez 1999).

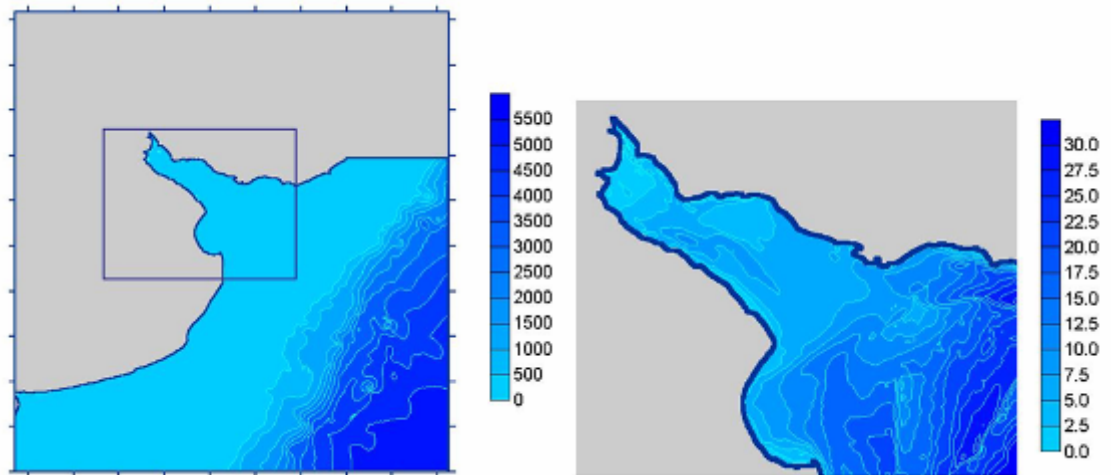


Figura 3.2. Batimetría

3.1.2.3. Condiciones de Borde

El modelo tiene tres bordes oceánicos (Este, Norte y Sur), que constituyen contornos matemáticos (figura 3.3). El borde Este es 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 (Re & Menéndez, 2005). El borde norte es tratado como un contorno no reflejante, permitiendo la salida de las ondas que inciden sobre él sin reflejar información. La onda de marea astronómica es impuesta como condición de contorno en el borde sur del modelo, en base al conocimiento existente de que en esta región la onda efectivamente se propaga de sur a norte. Esa onda se construye combinando los datos registrados en la estación Mar del Plata (por tratarse de la estación más cercana con registros históricos más confiables), convenientemente corregidos en amplitud y fase, para representar la oscilación en la costa, y los obtenidos del modelo global de mareas RSC94 (Cartwright y Ray, 1990), para representar la oscilación mar afuera. Esta última herramienta proviene de un modelo de respuesta generalizada y de la utilización de los pesos de sus respuestas (“orthoweights”), derivados de las funciones de Proudman, computadas para una grilla de 1° de paso que cubre el área ubicada entre las latitudes -68° y 68°; la obtención de la solución de la marea se basa en la contribución de las mediciones de los altímetros TOPEX-POSEIDON e información de alrededor de veinte estaciones de observación de marea. La combinación entre la oscilación costera y la onda mar afuera se efectuó ajustando una onda ingresante

con un cierto ángulo respecto de la normal al contorno y con un decaimiento exponencial de su amplitud hacia el Este, compatible con su carácter de onda de Kelvin.

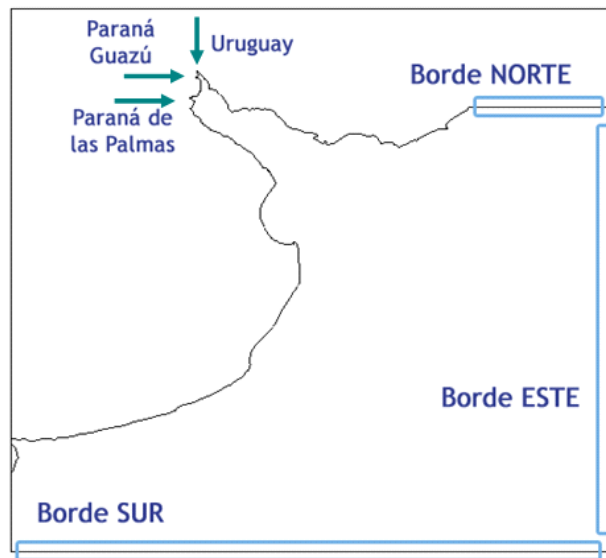


Figura 3.3. Condiciones de borde

3.1.2.4. Vientos

Los campos de vientos actuantes sobre la superficie del agua son generados a partir de los reanálisis de NCEP/NCAR (Kalnay y otros, 1996). Estos tienen una resolución espacial de 1.9048° de latitud y 1.875° de longitud y temporal de 6 horas. La base de datos se corresponde con una grilla T62 Gaussiana con 192×94 puntos ubicados dentro de las latitudes $88.54 \text{ N} - 88.54 \text{ S}$ y $0\text{E} - 358.125 \text{ E}$. Dado que los campos de vientos de NCEP/NCAR subestiman las intensidades de los vientos observados, siguiendo la experiencia del modelo HANSOM - CIMA (Simionatto y otros, 2002) estas intensidades se incrementan en un factor de la forma

$$f = 1 + e^{\left[-\left(\frac{W}{X}\right)^m \right]}, \quad (3.3)$$

donde W es el módulo de la velocidad del viento, X un valor de velocidad (del orden de las intensidades mayores de la base de datos) y m un exponente. La utilización de este factor busca duplicar los valores informados para las intensidades muy bajas de vientos y mantener inalteradas las intensidades mayores. El modelo RPP-2D cuenta con rutinas que toman la información de los campos de NCEP/NCAR y realizan una interpolación bilineal en todo el dominio.

3.1.2.5. Paso de cálculo

Dado que el software HIDROBID II está basado en un esquema implícito de diferencias finitas, no tiene en principio limitaciones 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. Como 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 (ecuación 3.1), el paso temporal de cálculo Δt 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:

$$\Delta t \approx \frac{\Delta x}{c_{\max}}, \quad (3.4)$$

donde Δx es el paso espacial en la dirección x y c_{\max} es la máxima celeridad que se pretende resolver adecuadamente.

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 es de alrededor de 30 m/s, con lo que resulta $\Delta t = 80$ s. Se utilizó un paso de 60 segundos.

3.1.3. Forzantes

3.1.3.1. Caudal de los 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.

Más del 97% del ingreso de agua al Río de la Plata es aportado por los ríos Paraná y Uruguay. 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). La descarga de estos tres tributarios se impone como una condición de borde en la cara de la celda respectiva que representa su punto de entrada. Se ha utilizado la serie temporal de caudales medios mensuales en base a los registros hidrológicos de los ríos (figura 3.4). En la tabla 3.1 se indican los caudales medios anuales.

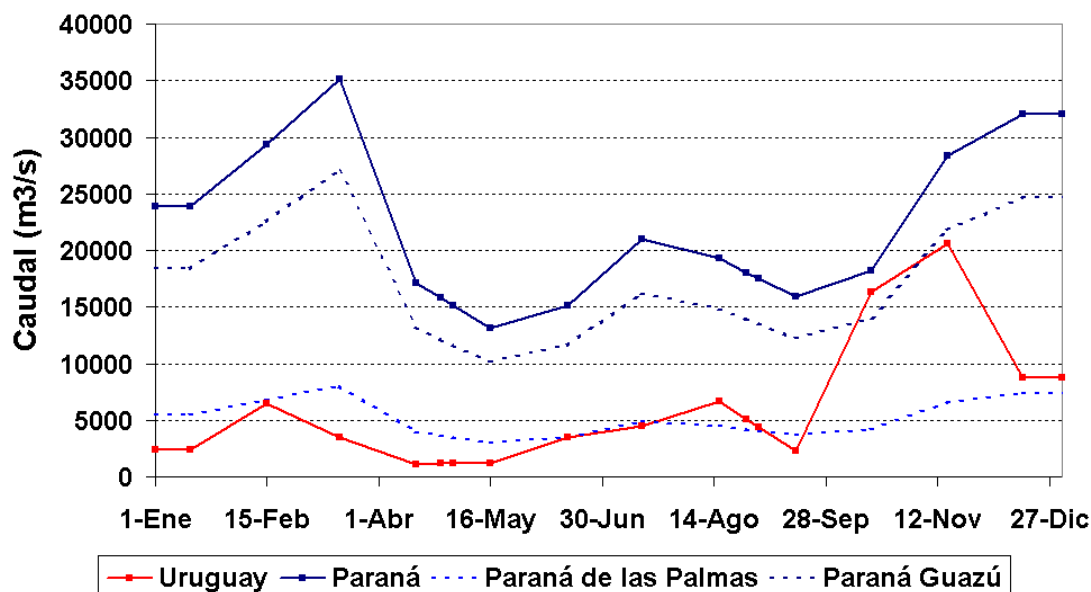


Figura 3.4. Caudales medios mensuales de los tributarios para el año 1997

Río	Caudal medio anual (m³/s)
Paraná de las Palmas	4500
Paraná Guazú-Bravo	13500
Uruguay	5200

Tabla 3.1. Caudales medios anuales

No es necesario incluir en la especificación de la descarga de los tributarios el efecto de modulación causado por la onda de marea, ya que ello sólo afecta una zona de relativamente corta extensión adyacente al contorno (Jaime y Menéndez, 1999).

3.1.3.2. Marea Astronómica

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.

Si bien para su generación se dispone 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 (Re, 2005).

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 se expresa 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 especifica que la dirección de propagación de la onda es de 45° 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 (Re, 2005).

3.1.3.3. Vientos

Los campos de vientos actuantes sobre la superficie del agua abarcan una región aproximadamente 240 km por 180 km (figura 3.5). 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). Los datos son de libre disponibilidad y se toman del sitio web: <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.html>.

En consecuencia, los datos de intensidades son interpolados bilinealmente en el espacio para obtener el campo de viento instantáneo asociado a cada celda del modelo. Esta interpolación requiere 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.



Figura 3.5. Estaciones de viento para el escenario de línea de base

3.2. Calibración del modelo hidrodinámico

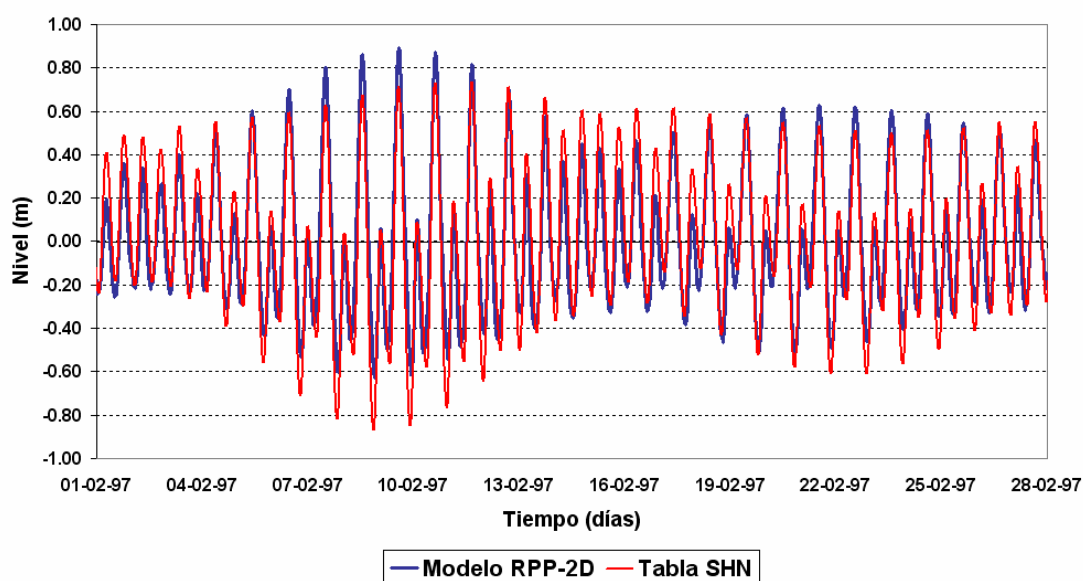
3.2.1. Introducción

El modelo hidrodinámico RPP-2D ya había sido calibrado y verificado en etapas, que incluyeron escenarios de marea astronómica predicha, nivel medio para condiciones actuales, curvas de frecuencia de niveles en Buenos Aires y simulación de grandes ondas de tormenta (Re & Menéndez, 2005). En el presente estudio se repitieron, a modo de verificación, los ensayos de calibración, evaluándose además la utilización de campos de vientos con intervalos temporales de 6 horas (4 valores diarios), en lugar de las 24 horas (valor diario) originales.

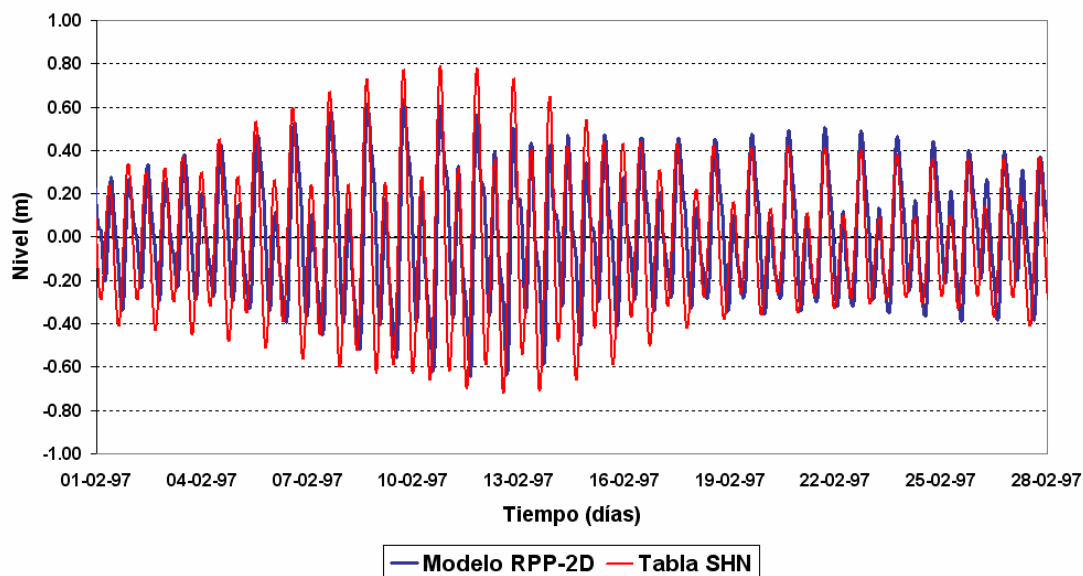
A continuación se presentan algunos de los resultados obtenidos. En el primer caso (marea astronómica predicha) no hay vientos; para los demás casos se hace la comparación entre los dos pasos temporales para la representación del viento.

3.2.1.1. Escenario de Marea Astronómica Predicha

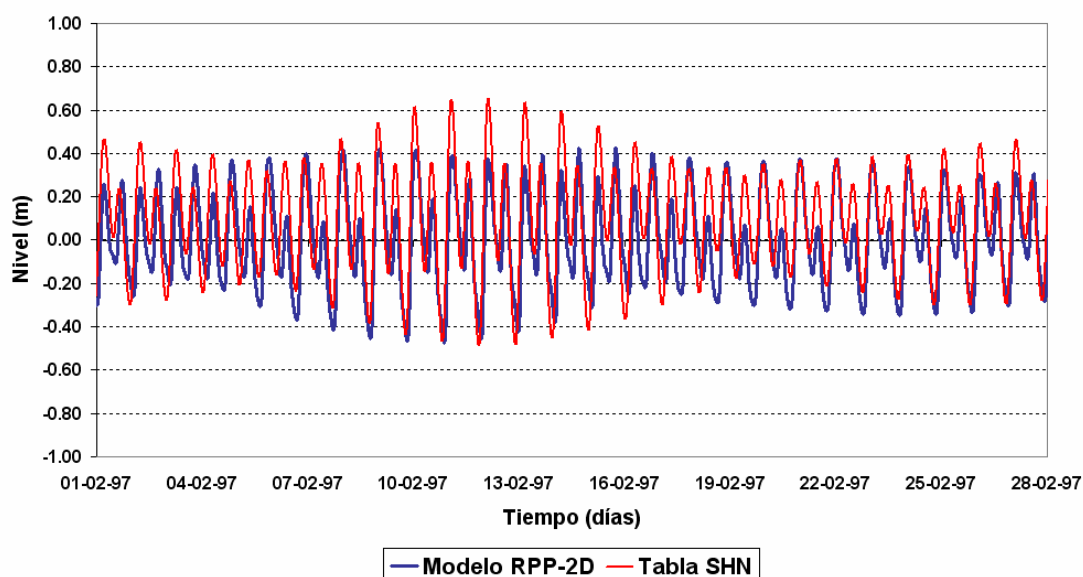
Con el objetivo de reproducir la marea astronómica se utilizaron las tablas de Mareas del SHN y del SOHMA (Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada, República Oriental del Uruguay). Con la Tabla de Mareas del SHN se construyó la onda de marea astronómica en el vértice Sudoeste del dominio del modelo, para el período que se extiende entre el 27 de enero y el 28 de febrero de 1997. Como descarga desde los tributarios, se utilizaron valores constantes e iguales a la media anual de cada uno de ellos. A título ilustrativo se presentan en la figura 3.6, algunas estaciones de la costa argentina, en dónde se observa un acuerdo satisfactorio entre las tablas de marea del SHN y la simulación del modelo.



a) Mar del Plata



b) San Clemente



c) Buenos Aires

Figura 3.6. Escenario de marea astronómica predicha

3.2.1.2. Nivel medio para condiciones actuales

En la figura 3.7 se presentan los niveles medios anuales para la década del 90. Se observa un buen acuerdo entre los niveles medidos y simulados. A su vez, se puede evidenciar una diferencia poco significativa en los niveles simulados para los diferentes pasos temporales de vientos (la máxima diferencia es del orden de 2 cm).

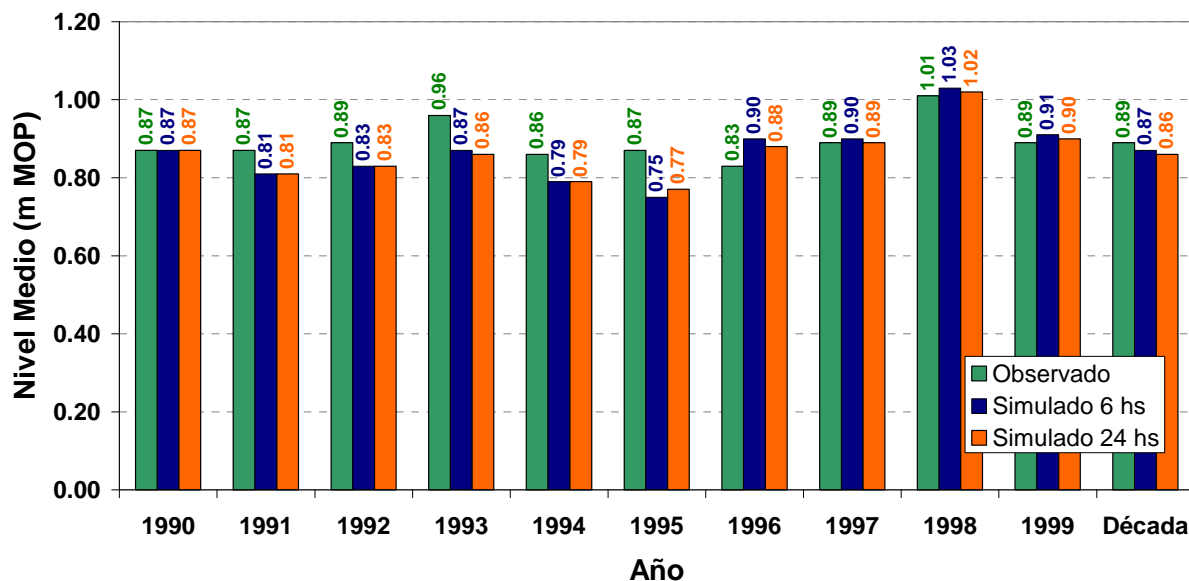


Figura 3.7. Comparación entre niveles medios anuales en Buenos Aires

3.2.1.3. Curva de frecuencia de niveles en Buenos Aires

Se han agrupado los niveles en clases de 10 cm (figura 3.8). Se observa un buen acuerdo general. El acuerdo es cuantitativamente mejor en los niveles que se encuentran por encima del mínimo umbral de inundación (1.60 m MOP).

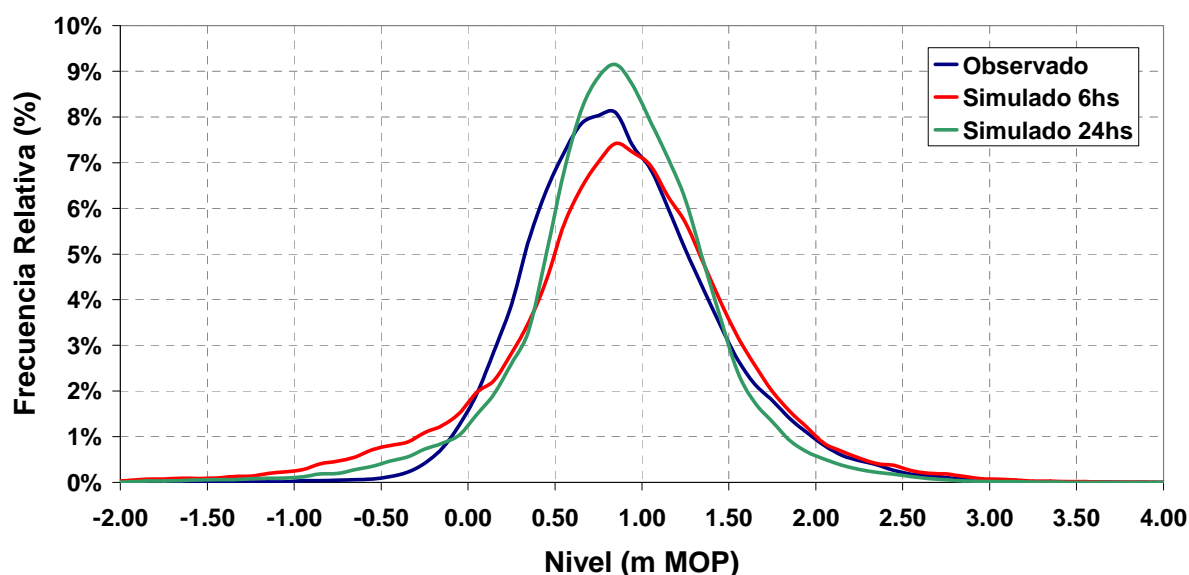


Figura 3.8. Comparación entre curvas de frecuencia relativa

3.2.1.4. Simulación de grandes ondas de tormenta

Se identificaron algunos eventos de tormenta dentro del período de la simulación, con tormentas de variados niveles de significación y diferentes características. La figura 3.9

muestra los niveles máximos alcanzados para una tormenta ocurrida en abril de 1994. Las diferencias de niveles no son muy significativas, alcanzando valores levemente mayores para el caso de la simulación de vientos cada 6 hs. Este tipo de comportamiento se ha presentado en la mayoría de los eventos analizados, siendo en algunos casos más marcada la diferencia en los niveles.

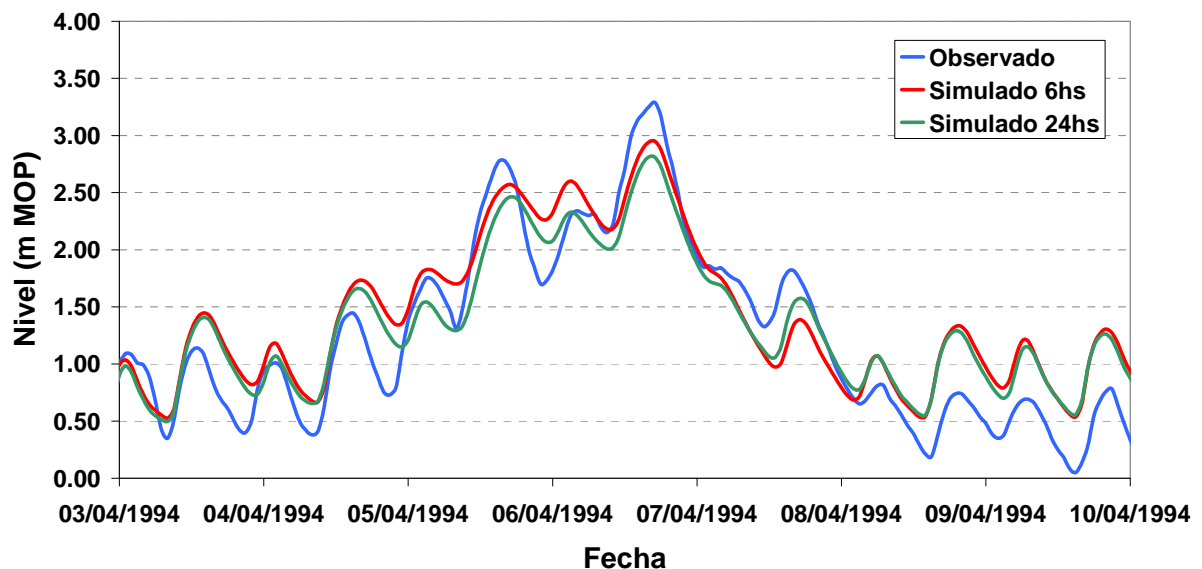


Figura 3.9. Comparación de niveles para una tormenta ocurrida en abril de 1994

3.3. Utilización del modelo hidrodinámico

3.3.1. Simulación de frecuencia

3.3.1.1. Frecuencia de Niveles

La figura 3.10 muestra la frecuencia acumulada de ocurrencia de niveles, donde prácticamente no se observan diferencias entre las simulaciones con los pasos de tiempo de viento de 6 y 24 hs. Aquí también queda reflejado el buen acuerdo con las mediciones a partir del umbral de 1.60 m.

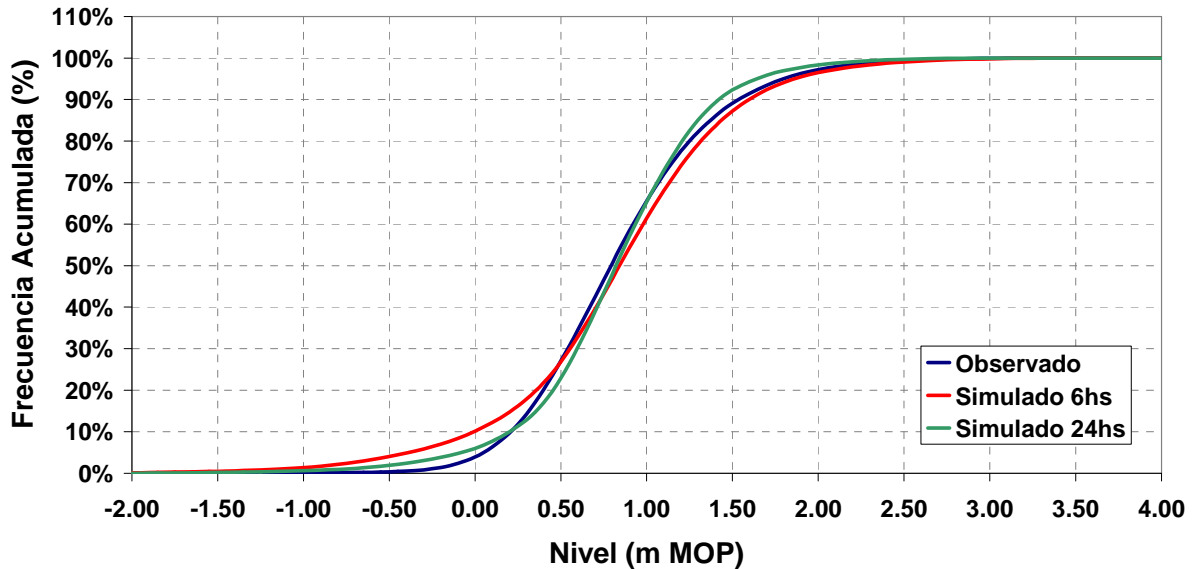


Figura 3.10. Comparación entre curvas de frecuencia acumulada

A partir de las curvas de frecuencia acumulada se induce la cantidad promedio de semanas de inundación por año (figura 3.11). Para la simulación de vientos cada 24 hs se produce una subestimación del tiempo de inundación respecto del observado, y, por el contrario, una sobrestimación, aunque más leve, para la simulación de 6 hs. Se considera aceptable el acuerdo de esta última simulación con el observado.

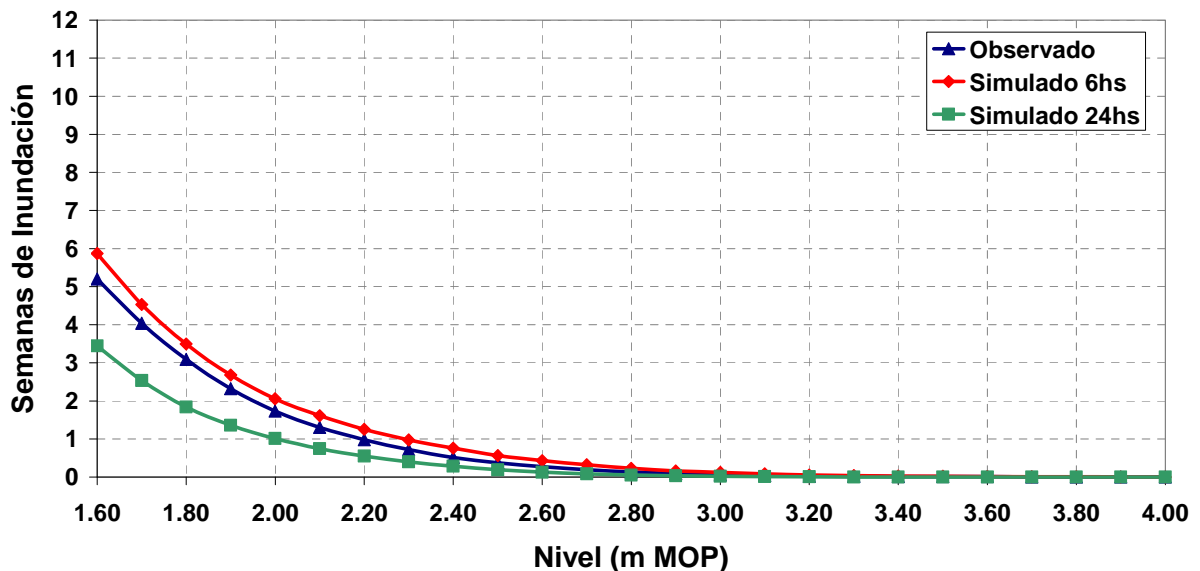


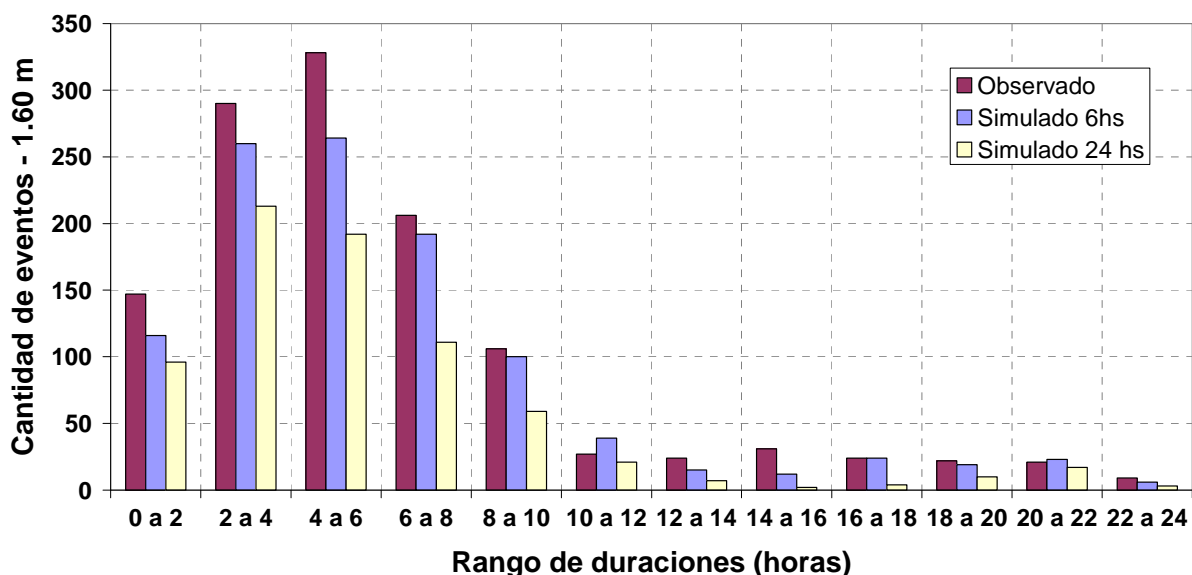
Figura 3.11. Comparación de semanas de inundación

3.3.1.2. Frecuencia de Duraciones

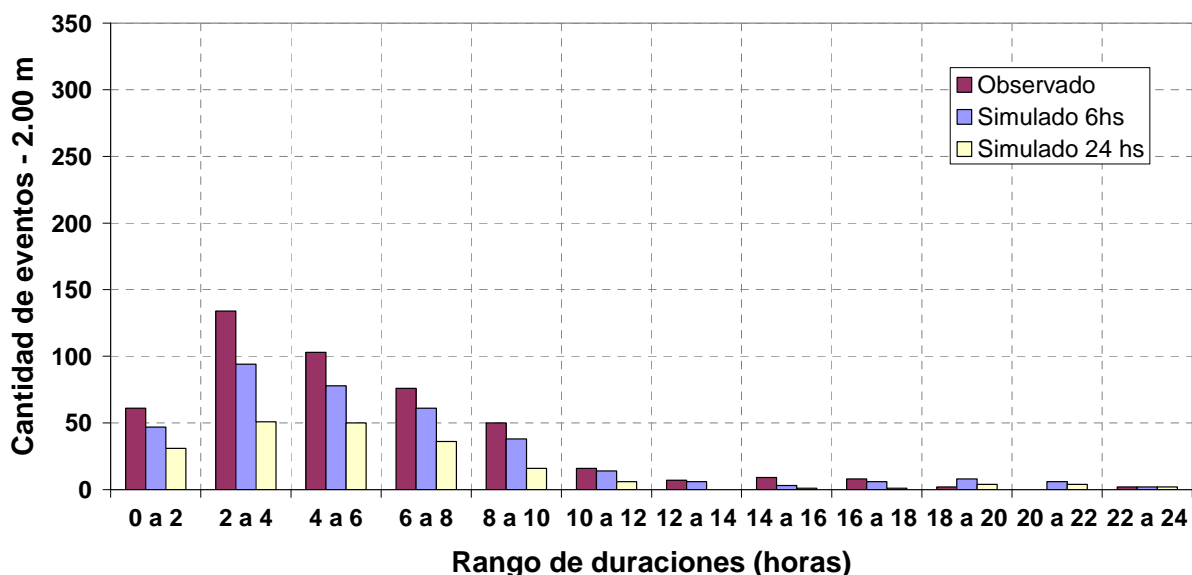
Al evaluar la duración de la inundación resulta de fundamental importancia el paso temporal de representación los vientos. Se efectuó la simulación para los dos pasos temporales de 6 y 24 hs. Se han agrupado los eventos en intervalos discretos de 2 horas, y

se calcularon las frecuencias absoluta y relativa, para diferentes valores umbrales (tal como se hizo con los datos de mediciones en el capítulo 2.1.2).

Tanto para la frecuencia absoluta como para la relativa se muestran sólo las figuras correspondientes a dos umbrales a título ilustrativo, que corresponden a 1.60 y 2.00 m (figura 3.12), ya que para el resto de los umbrales se observa el mismo patrón de comportamiento.



a) Umbral de 1.60m



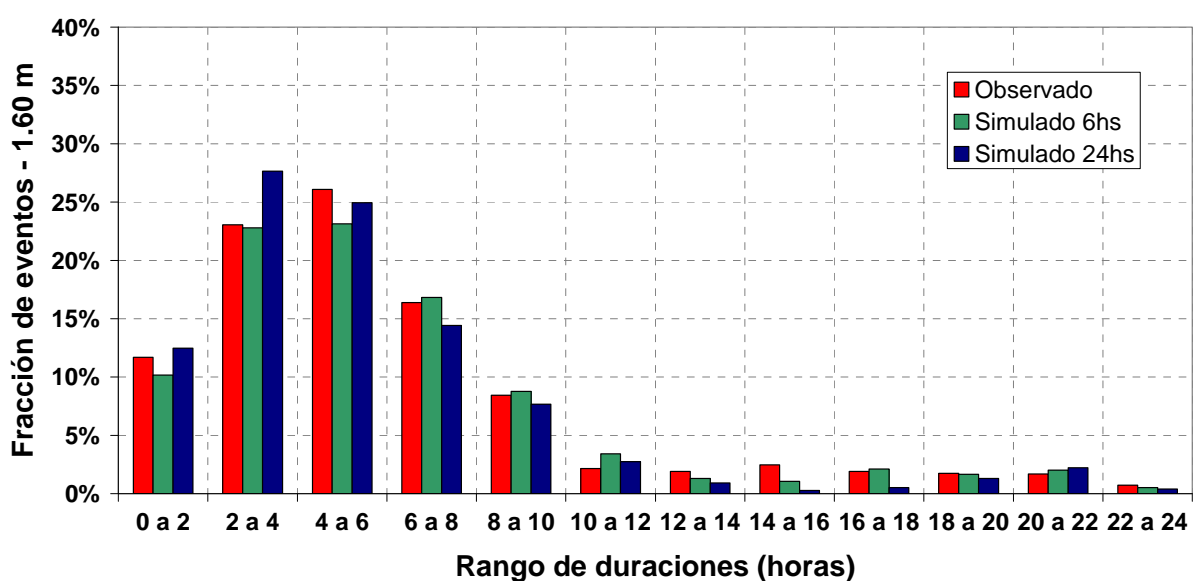
a) Umbral de 2.00m

Figura 3.12. Frecuencia absoluta de duración de inundación

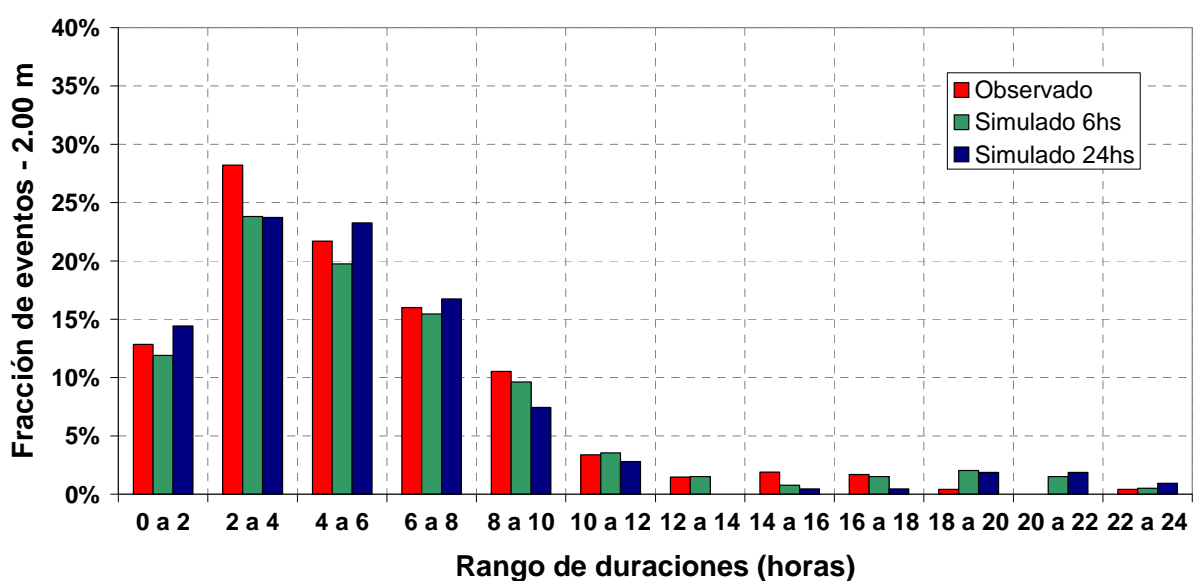
Se observa la misma tendencia entre el comportamiento de los eventos simulados y los observados, obteniéndose un mejor acuerdo cuantitativo para el caso de las

simulaciones con un paso temporal de vientos cada 6 horas. En general, la cantidad de eventos observados es siempre mayor que los simulados con paso de 6 horas, y estos a su vez dan cantidades mayores a los simulados con paso de 24 horas. Es decir, los resultados del modelo subestiman la frecuencia absoluta de los eventos, mejorando con la reducción del paso temporal de representación de los vientos. Aún con el paso de 6 horas, este resulta insuficiente como para capturar correctamente la frecuencia absoluta.

La situación es mucho más favorable en términos de la frecuencia relativa, tal como se muestra en la figura 3.13. De hecho, el acuerdo entre observaciones y simulaciones se considera satisfactorio en términos generales, quizás con una leve ventaja para el caso de paso temporal de 6 horas, que son los resultados que se utilizarán.



a) Umbral de 1.60m



a) Umbral de 2.00m

Figura 3.13. Frecuencia relativa de duración de inundación

3.3.2. Simulación de extremos

Se desarrolla el análisis estadístico de extremos a partir de los valores de niveles simulados con el modelo hidrodinámico en la estación de Buenos Aires, de la misma manera en que se ha efectuado en el capítulo 2.2 con los niveles observados. Se han obtenido los valores de alturas y duraciones para las recurrencias de 2, 5 y 10 años. Para este análisis se ha considerado la separación entre umbrales cada 20 cm, en vez de los 40 cm que se utilizan para construir las distribuciones, solamente con el objetivo de tener mayor cantidad de valores para comparar entre lo observado y lo simulado. Las alturas y duraciones de inundación para cada recurrencia se encuentran detalladas en las figuras 3.14 y 3.15 respectivamente. En línea continua aparecen los valores observados y los puntos corresponden a valores simulados. Se observa una sobrestimación considerable de las duraciones y en menor medida de las alturas de inundación.

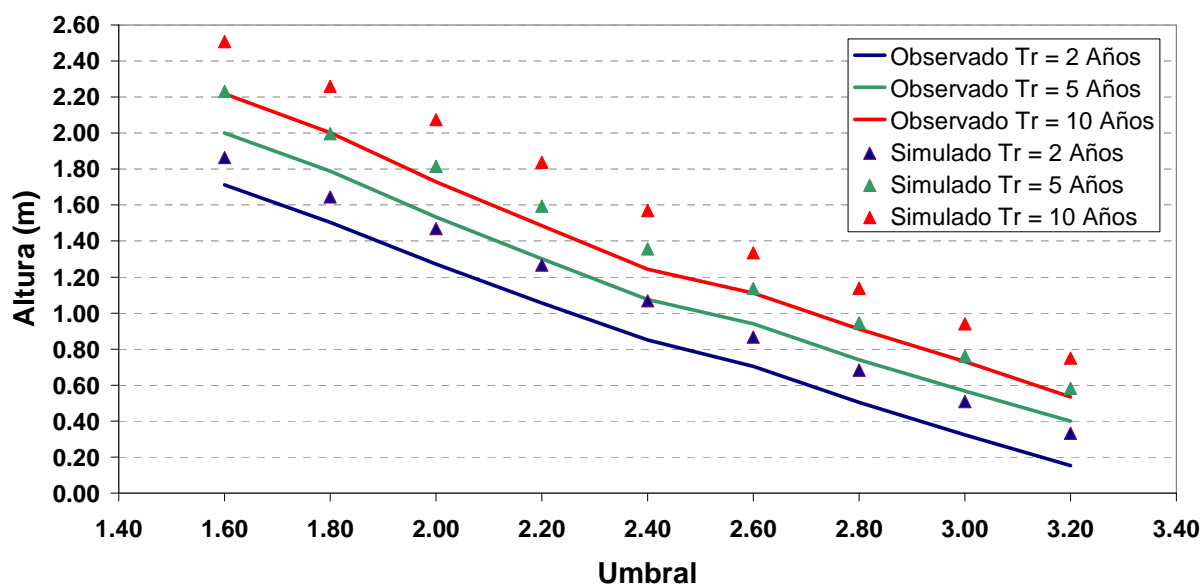


Figura 3.14. Altura de inundación - Observado y simulado para diferentes recurrencias

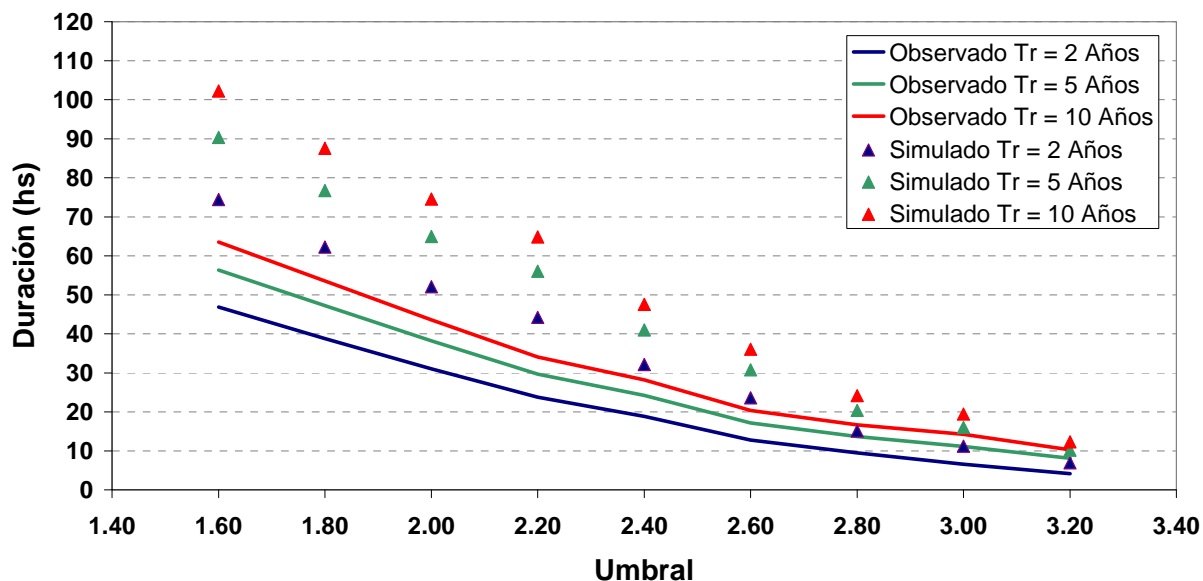


Figura 3.15. Duración de inundación - Observado y simulado para diferentes recurrencias

3.3.2.1. Ajuste heurístico de los datos

Dado a la incapacidad del modelo de reproducir correctamente las alturas y duraciones, se efectúa un ajuste que permita corregir dicha falencia. Para cada umbral y para las distintas recurrencias, se ha calculado el factor que debe aplicarse al valor de las alturas y duraciones simuladas para que sean coincidentes con las observadas. Estos factores resultan similares independientemente de la recurrencia para cada umbral, por lo que se hace un promedio de estos valores por umbral. En las figuras 3.16 y 3.17 se ha representado la relación entre las duraciones y niveles observados y simulados, respectivamente. En el caso de las alturas de inundación se observa una tendencia decreciente, por lo que se ha hecho un ajuste lineal que sigue esta tendencia. En cambio, para el caso de las duraciones no se percibe una tendencia definida por lo que se propuso un ajuste constante.

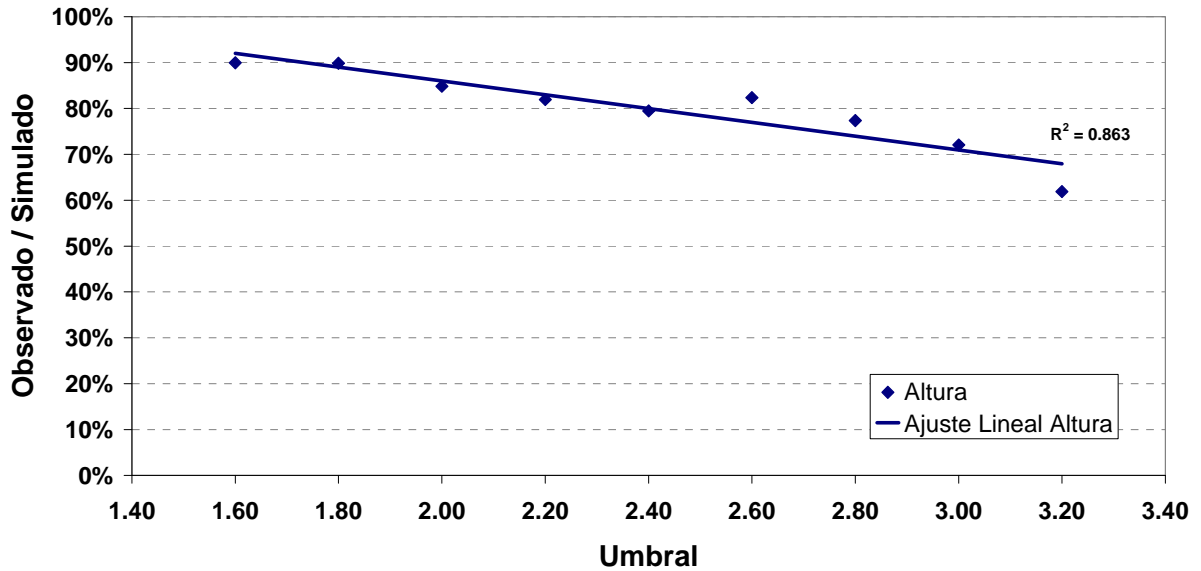


Figura 3.16. Altura de inundación - Fracción Observado / Simulado

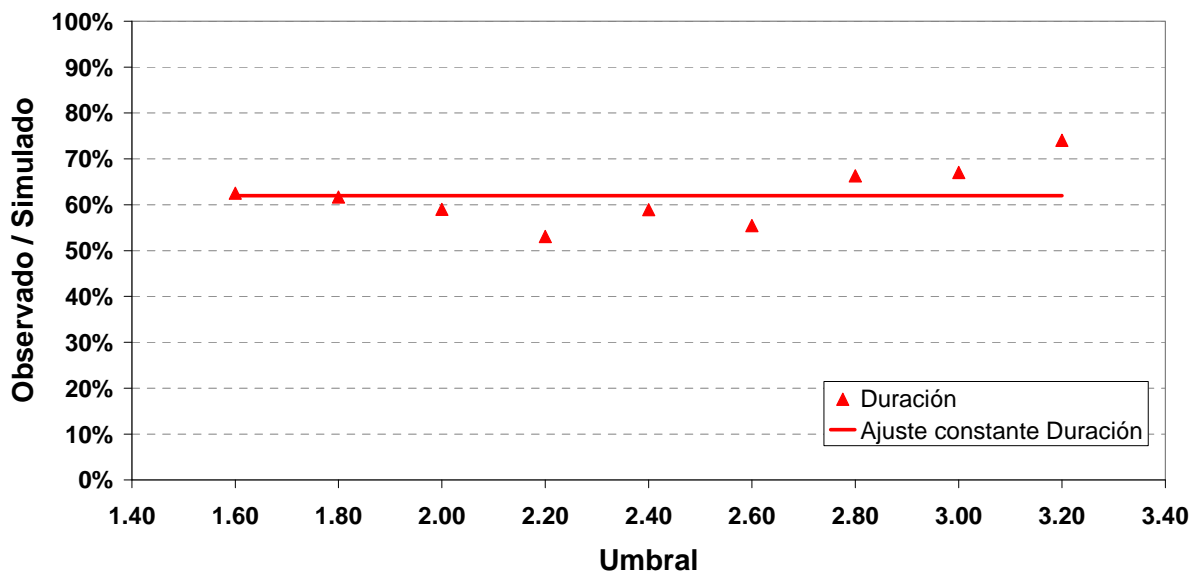


Figura 3.17. Duración de inundación - Fracción Observado / Simulado

Para las distintas recurrencias se muestra la comparación entre los valores simulados y los observados a partir del ajuste (figuras 3.18 y 3.19). El acuerdo es ahora satisfactorio. El ajuste, además de aplicarse en la estación de Buenos Aires, se utiliza en las estaciones de La Plata y Tigre y también rige para los escenarios futuros.

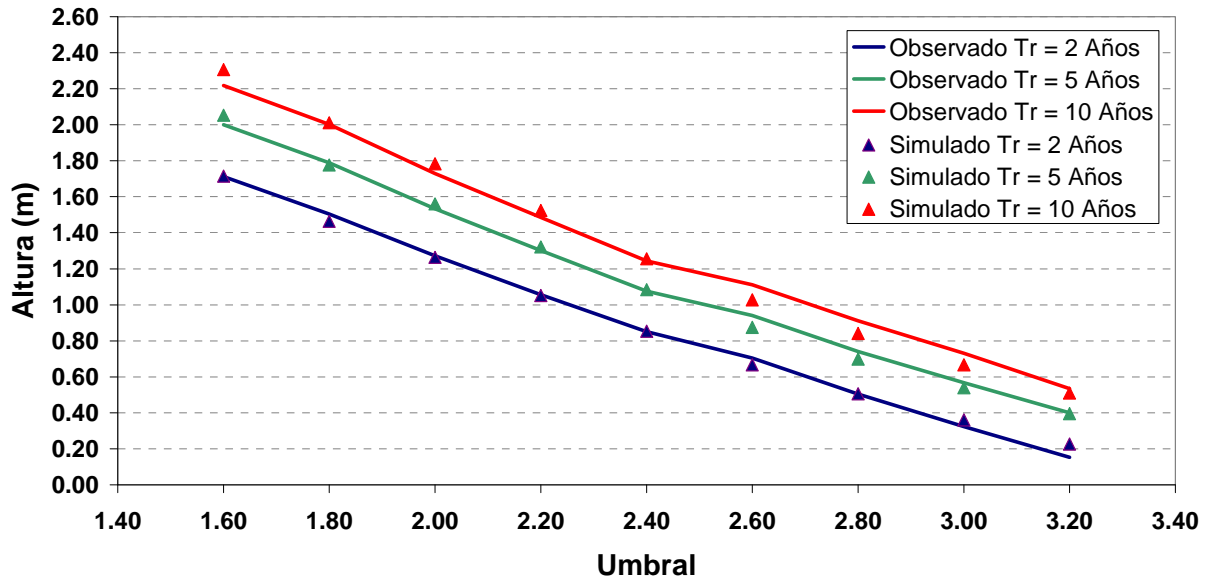


Figura 3.18. Altura de inundación observado y simulado para diferentes recurrencias aplicando el ajuste en los datos simulados

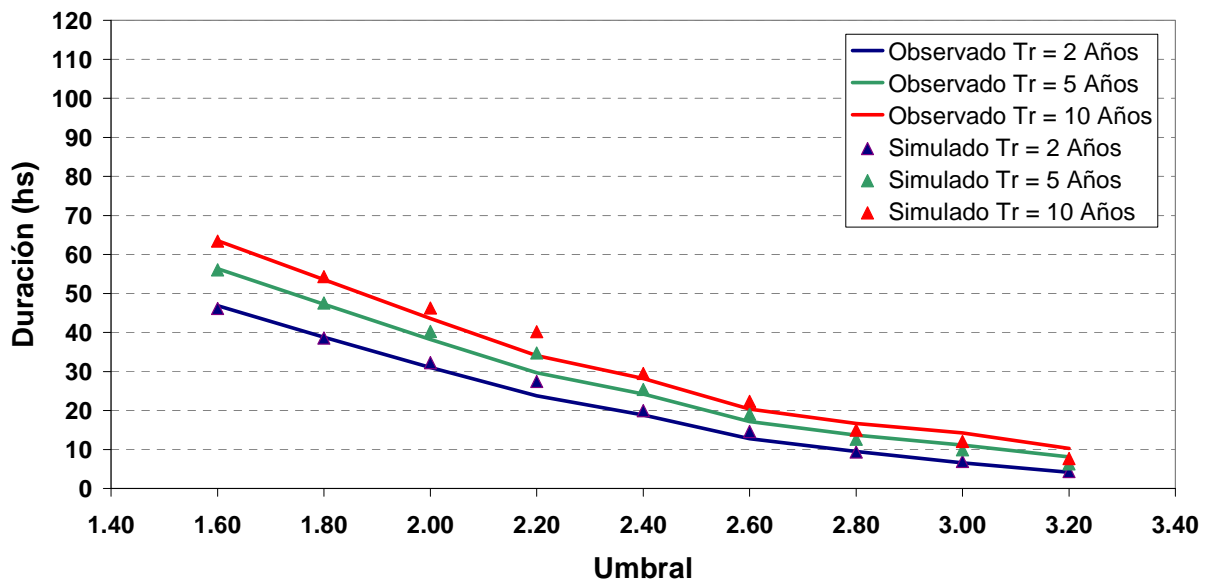


Figura 3.19. Duración de inundación observado y simulado para diferentes recurrencias aplicando el ajuste en los datos simulados

3.4. Resultados para Escenario de Línea de Base

3.4.1. Nivel Medio

Se seleccionó como escenario de Línea de Base al que se extiende durante toda la década del 90, que había sido tomado para calibrar el modelo. En esta sección se presentan los resultados para este escenario. Se muestran los resultados en las estaciones costeras de La Plata, Buenos Aires y Tigre, que son las que se utilizan para la construcción de los

mapas de inundación. En la figura 3.20 se observa el nivel medio para las 3 estaciones, donde existen similares valores medios para las estaciones de Buenos Aires y La Plata, en Tigre existe una diferencia de nivel promedio de 13 cm por encima respecto a Buenos Aires.

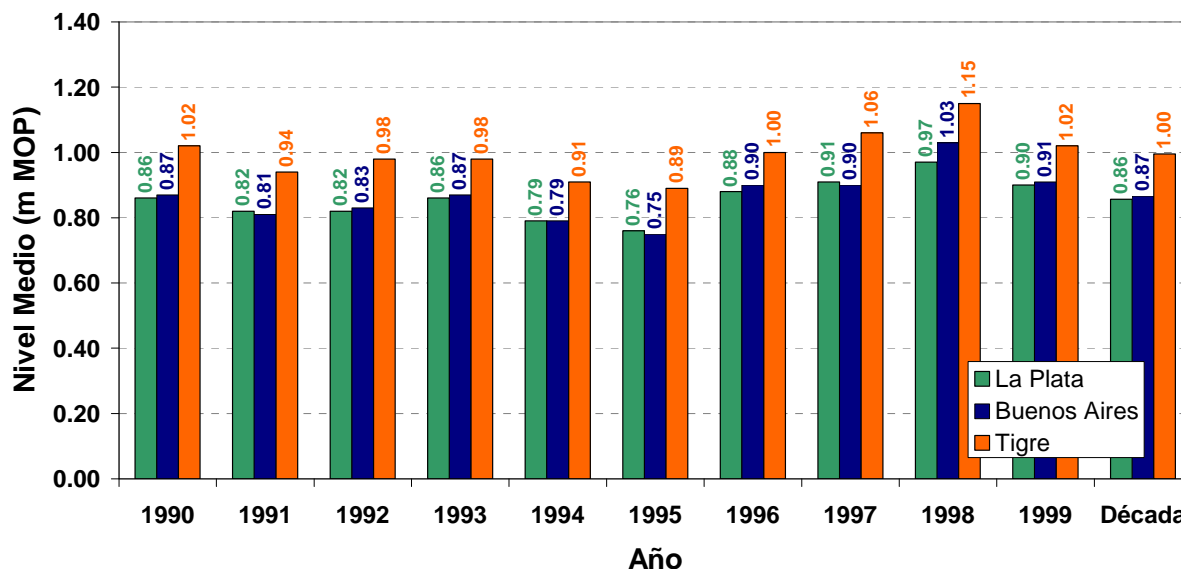


Figura 3.20. Nivel medio para las 3 estaciones

3.4.2. Frecuencia de Niveles

Se ha construido la frecuencia de niveles para las 3 estaciones y a partir de ello se ha elaborado la información acerca de las semanas de inundación promedio por año. Esto se observa en la figura 3.21, en donde se advierte un descenso considerable del tiempo de inundación a medida que se consideran umbrales mayores, siendo el umbral de 2.80 m prácticamente el que limita las inundaciones frecuentes. La diferencia entre las estaciones también desciende a medida que los umbrales son más altos.

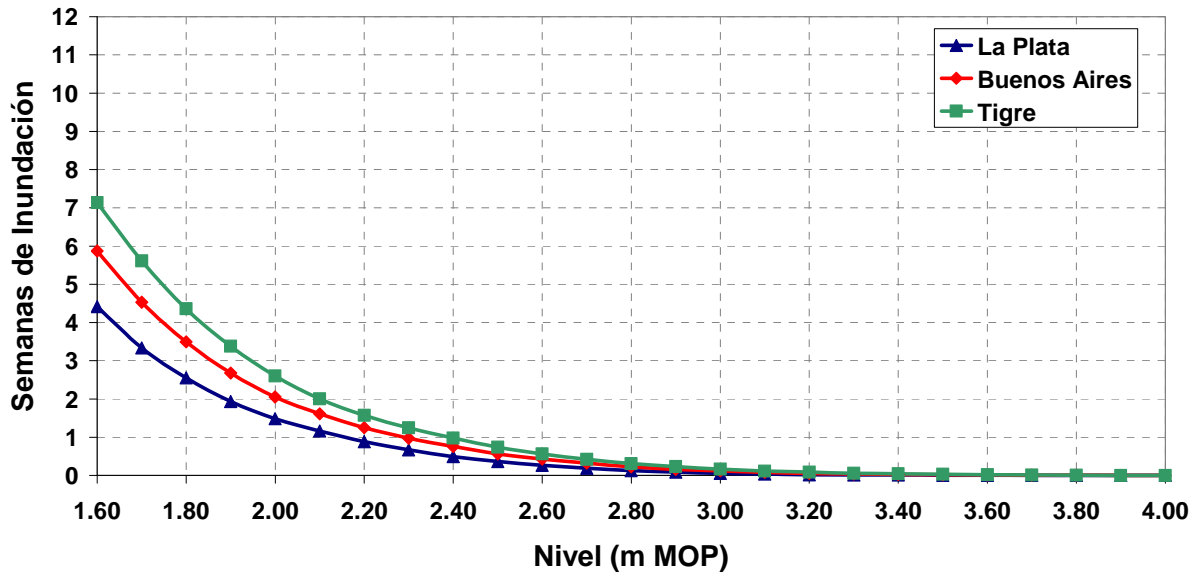
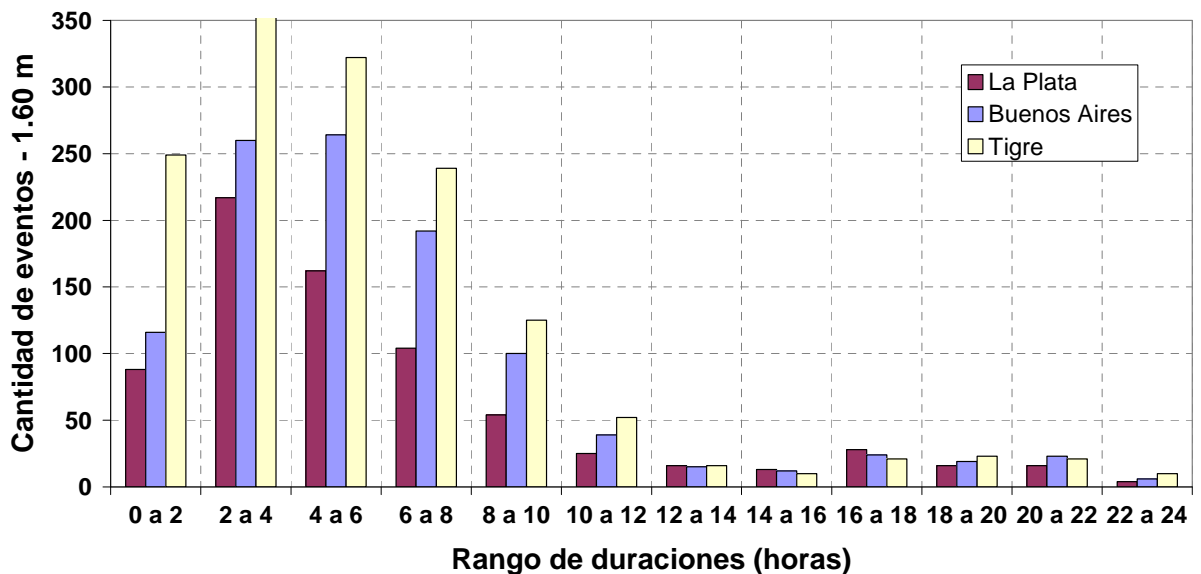


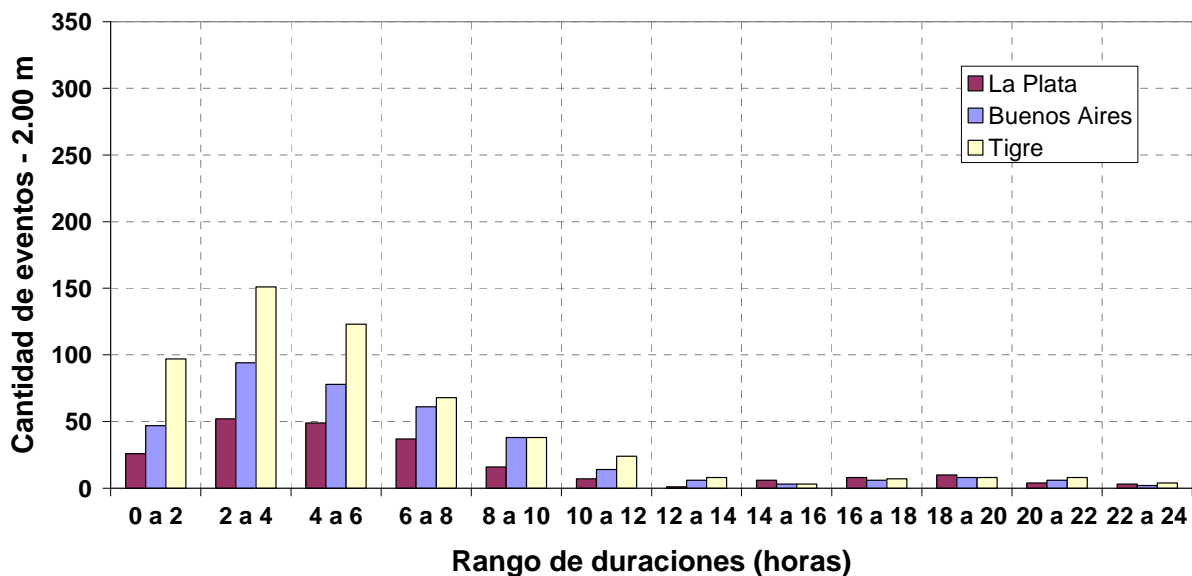
Figura 3.21. Semanas de inundación promedio por año para las 3 estaciones

3.4.3. Frecuencia de Duraciones

Se elabora la frecuencia de ocurrencia de duraciones absoluta y relativa (figuras 3.22 y 3.23). El patrón de comportamiento es similar para las 3 estaciones obteniéndose mayor cantidad de eventos desde La Plata hacia Tigre. La frecuencia relativa para las 3 estaciones no presenta cambios significativos.

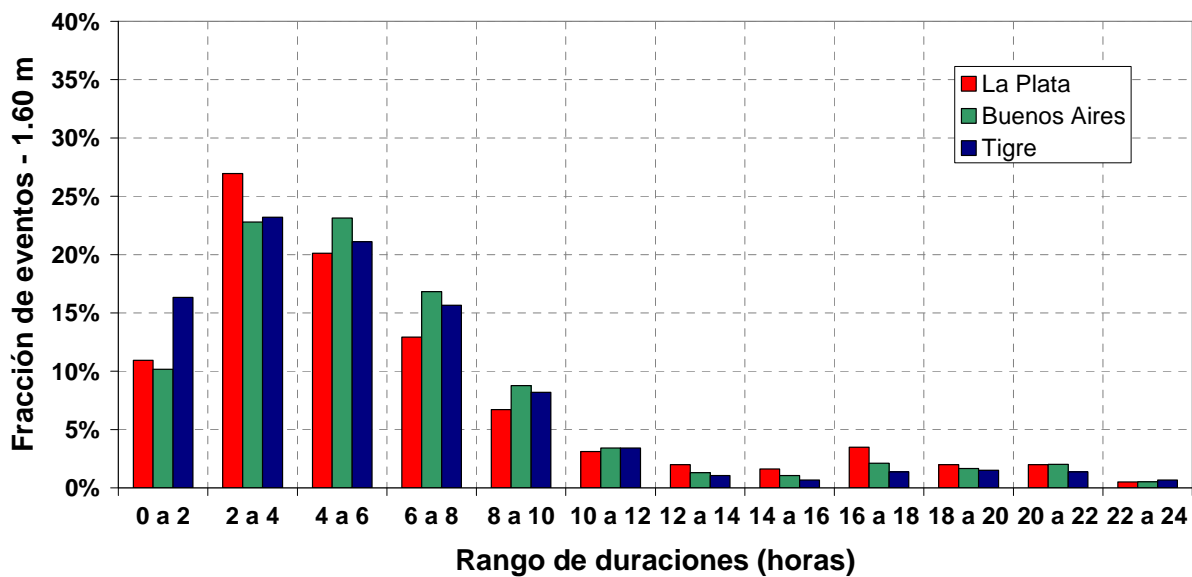


a) Umbral de 1.60m

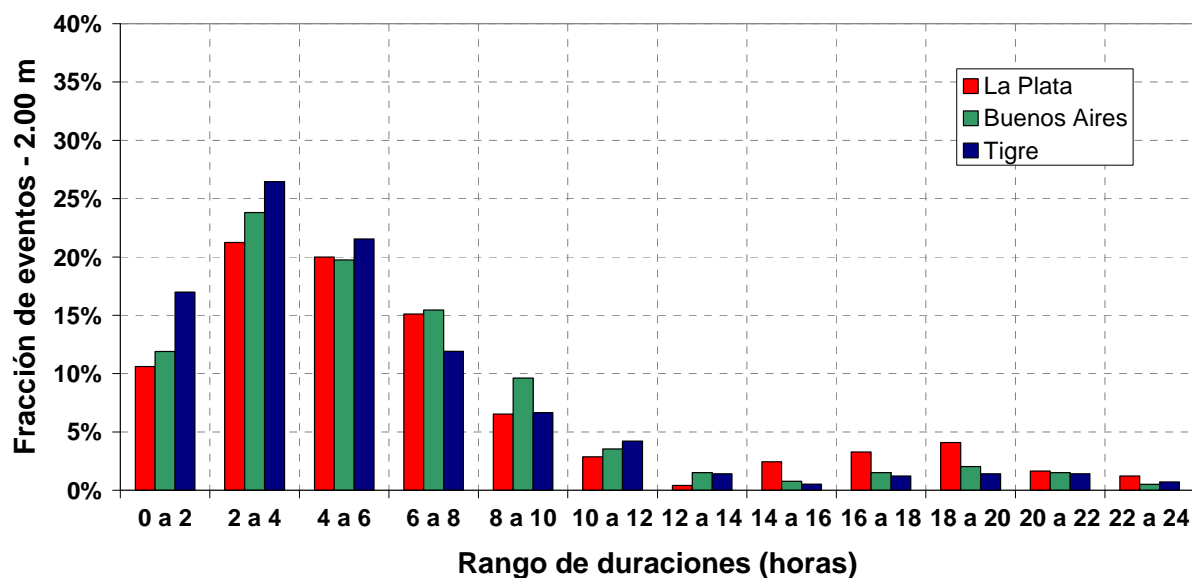


a) Umbral de 2.00m

Figura 3.22. Frecuencia absoluta de duración de inundación para las 3 estaciones



a) Umbral de 1.60m



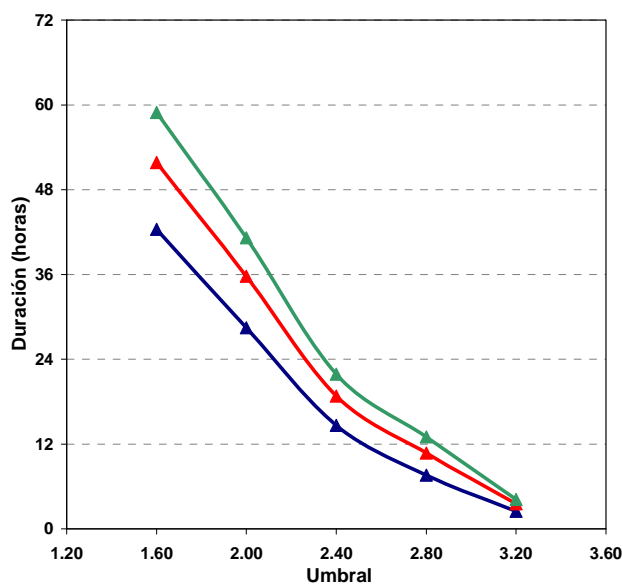
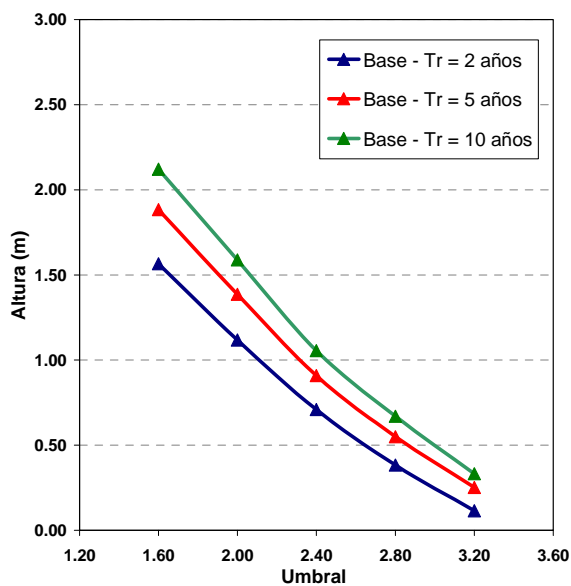
a) Umbral de 2.00m

Figura 3.23. Frecuencia relativa de duración de inundación para las 3 estaciones

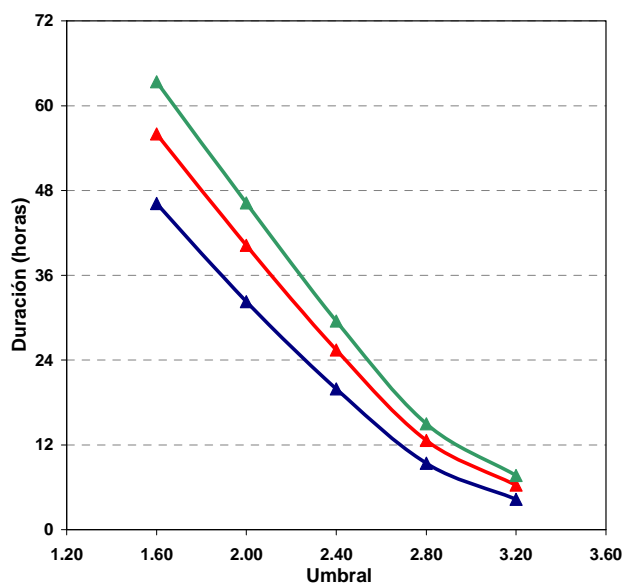
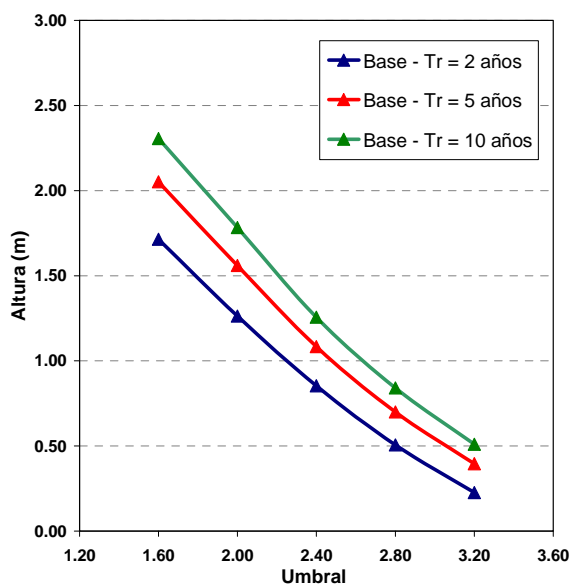
3.4.4. Eventos Extremos

Ahora se presentan los resultados de eventos extremos. En este caso se filtra la marea astronómica, en donde se ha utilizado la información de las tablas de mareas de Buenos Aires. Para las estaciones de La Plata se ha planteado un adelanto en la onda de marea de 2 horas y en Tigre un atraso de 1 hora, que aproximadamente es el orden de tiempo necesario para el traslado de la onda.

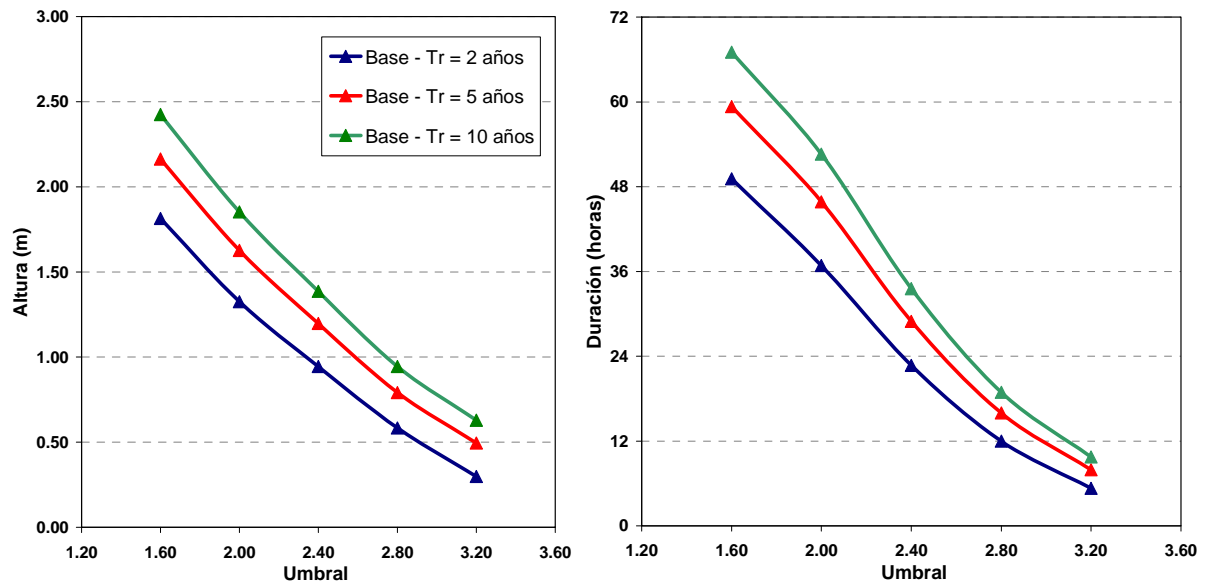
En la figura 3.24 se muestran las alturas y duraciones de inundación para las recurrencias de 2, 5 y 10 años. En ambos casos se puede notar un incremento de los valores hacia aguas arriba para las distintas recurrencias, obteniéndose los valores máximos en la estación de Tigre.



a) La Plata



b) Buenos Aires



c) Tigre

Figura 3.24. Altura y duración de inundación para distintas recurrencias en las 3 estaciones

4. MAPAS DE RIESGO DE INUNDACIÓN

4.1. Modelo Digital del Terreno (MDT)

El modelo digital del terreno (MDT) se utiliza para la construcción de los mapas de riesgo de inundación. Se dispone de un MDT base de la zona costera obtenido a través del estudio previo, que está conformado por grillas cuadradas, en donde cada una de estas posee una cota altimétrica. De esta manera, la información que brinda el MDT es discreta y no cuenta con el suficiente detalle de resolución a los fines de distinguir diferentes regiones de riesgo dentro de las áreas vulnerables por la inundación. Es por ello que se efectúa un procesamiento del MDT base, a partir de las celdas originales, con la intención de darle continuidad a los datos topográficos y poder identificar claramente zonas con diferentes duraciones o alturas de inundación.

4.1.1. MDT Base

Se utilizó como base el MDT producido durante el proyecto "Impact of Global Change on the Coastal Areas of the Río de la Plata: Sea Level Rise and Meteorological Effects". La grilla tiene un paso de 1000 metros en ambas direcciones espaciales. Los datos con los cuales se construyó dicha topografía surgieron de diferentes fuentes:

- ✦ Campañas de relevamiento planialtimétrico con un sistema de posicionamiento global del tipo GPS diferencial. Las zonas relevadas fueron: en la Ciudad de Buenos Aires, la Avenida Costanera sobre el Río de la Plata, los barrios de Belgrano, La Boca, Núñez y Barracas, y la Reserva Ecológica Costera; en la Provincia de Buenos Aires, la zona costera del Partido de Vicente López.
- ✦ Mapas topográficos publicados por el IGM (Instituto Geográfico Militar), con intervalos entre las curvas de nivel de 1.25 a 2.50 m. Estos intervalos hacen que los mapas sean de baja resolución altimétrica y no sean suficientes como para definir con precisión las áreas que son susceptibles de inundaciones. En la figura 4.1 se muestran las curvas de nivel IGM, en dónde se distingue la curva de 5.00 m (en color naranja), que representa la posición de la antigua línea de costa por la presencia de un paleoacantilado. En la figura se puede identificar claramente amplias áreas por debajo de esta curva, que incluyen parte de la cuenca de los ríos Reconquista, en la zona norte, y Matanza – Riachuelo, al sur de la Capital Federal, y zonas costeras del sur de la RMBA.

Las grillas de 250 m se generaron a través del método de interpolación 'krigging'. Antes de efectuar la interpolación se llevó a cabo un preprocesamiento de los datos. El máximo valor altimétrico del MDT base es de 6.00 m IGM. Por encima de esta cota quedan zonas sin definición de algún valor altimétrico. Para poder efectuar la interpolación de los puntos fue necesario definir estos valores, para ello se combinaron los datos del MDT base con la información de las grillas promedio de radar (ya que se cuenta con un mayor dominio de información) por encima de 6.00 m. Entonces se combinó por un lado los puntos del MDT base con los del radar mayores a 6.00 m. En la figura 4.2 se muestra la comparación del MDT original con el generado.

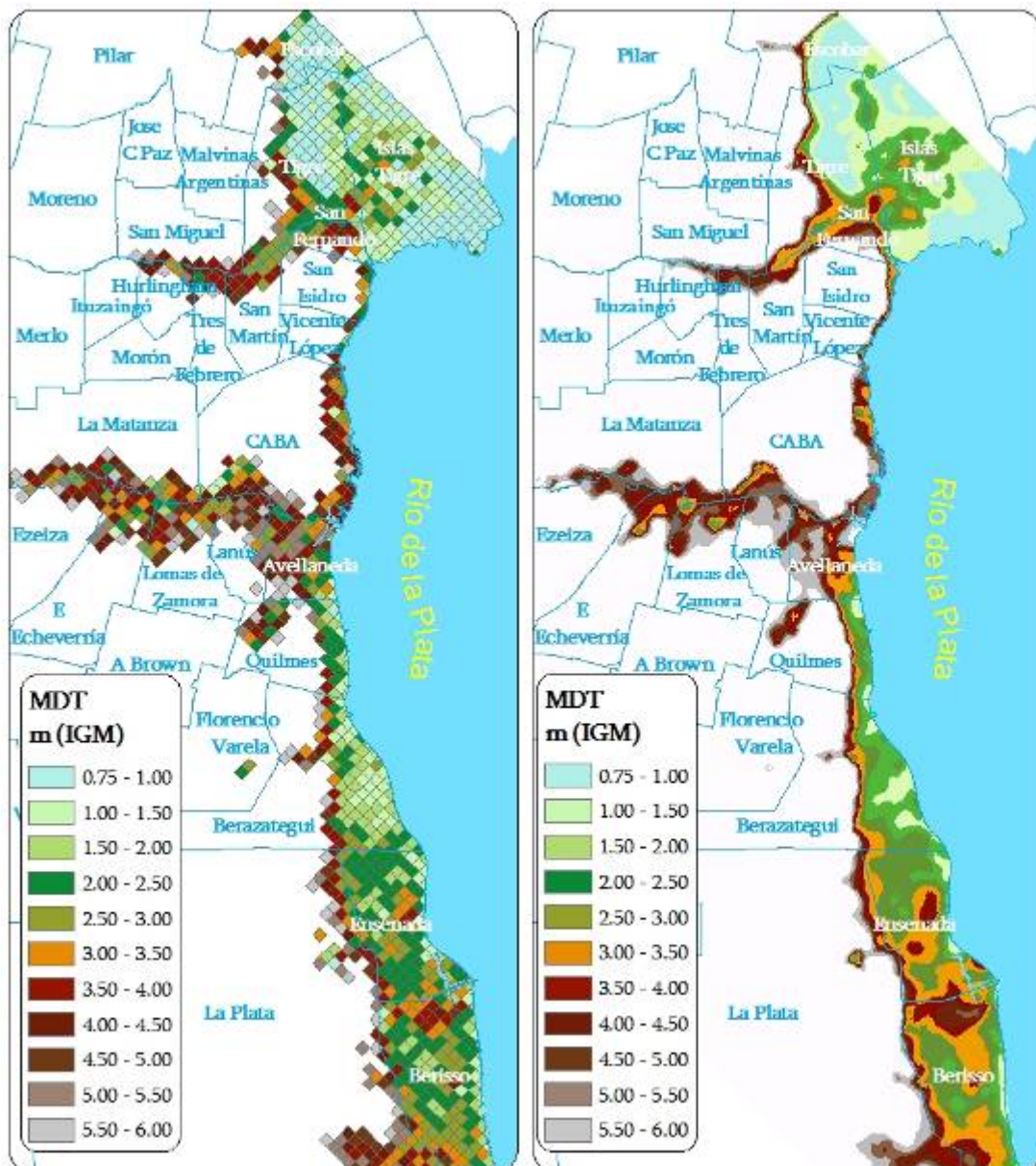


Figura 4.2. Comparación entre MDT de celdas de 1000 m vs 250 m

El MDT resultante se muestra con mayor detalle (espaciamiento cada 25 cm) en la figura 4.3.

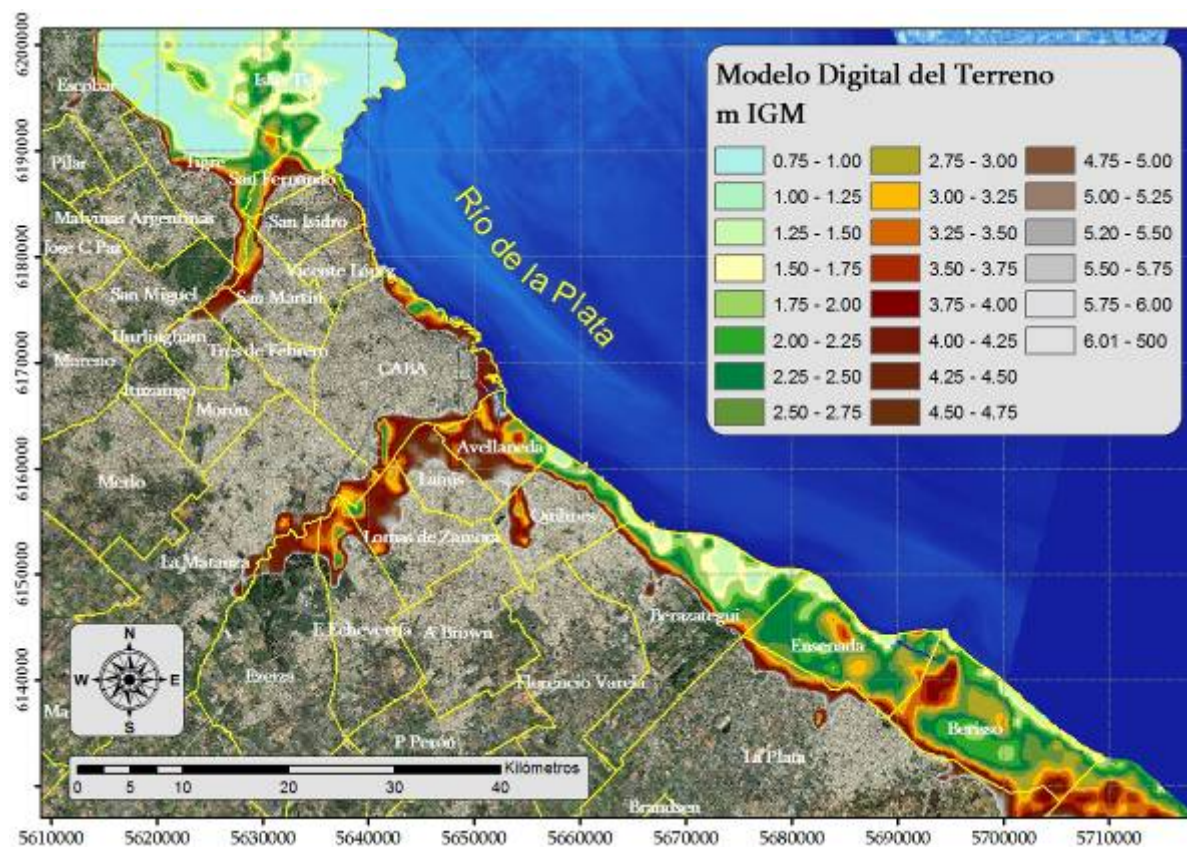


Figura 4.3. Modelo Digital del Terreno

4.2. Construcción de Mapas de Riesgo de inundación

Los mapas de riesgo de inundación se construyen en base a la información estadística de frecuencia de ocurrencia de eventos y recurrencia de eventos extremos. Los mapas que surgen a partir de la frecuencia de ocurrencia de niveles indican las áreas inundadas con una frecuencia al menos anual, mientras que los que se producen en base a períodos de retorno de eventos extremos muestran las áreas que se inundan con una periodicidad multianual.

Se utilizan tres estaciones de control: Tigre, Buenos Aires y La Plata, abarcando una extensión de línea de costa de alrededor de 120 km. Estas estaciones corresponden a nodos del modelo hidrodinámico en donde se obtienen los niveles a partir de las correspondientes simulaciones. Cada estación tiene asignada un área de influencia, limitada por la línea de costa y la cota 6.00 m IGM del MDT, sobre las cuales se considera que los niveles son uniformes y corresponden a los niveles de cada estación. Los límites de las áreas de influencia se han seleccionado aproximadamente en los puntos intermedios entre las estaciones: la frontera entre los partidos de San Isidro y Vicente López es la división entre Tigre y Buenos Aires y la frontera entre los partidos de Quilmes y Berazategui es la división entre Buenos Aires y La Plata (figura 4.4).

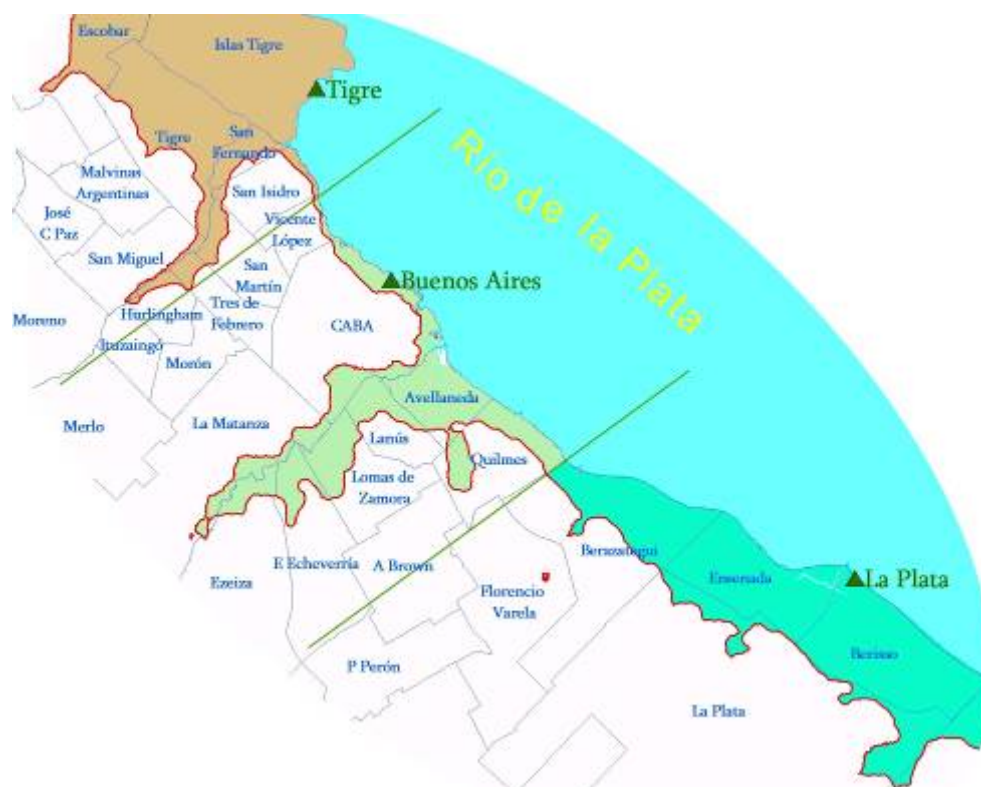


Figura 4.4. Estaciones de control y áreas de influencia

Estos mapas se construyen para los diferentes escenarios de simulación, incluyendo al escenario de línea de base y dos escenarios futuros (décadas del 2030 y 2070).

Los mapas se elaboran en base al sistema de coordenadas Gauss – Krüger en faja 5. Los datos de niveles de agua se refieren al cero MOP, como es usual, pero los mapas de riesgo de inundación se referencian al cero IGM, que se encuentra a 0.556 metros por encima del anterior. Para la visualización e interpretación de los mapas se construyó un sistema de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) que contiene toda la información.

4.2.1. Mapas de Frecuencia de inundaciones

Los mapas de frecuencia tienen como objetivo representar aquellas zonas que son susceptibles de inundaciones con una frecuencia al menos anual. Se elaboran en función de la frecuencia de ocurrencia de niveles a partir del tiempo de superación por año. Las áreas inundadas quedan definidas a partir del mayor umbral de inundación, que está en correspondencia con el mínimo tiempo de inundación. Dicho tiempo mínimo se consideró de media semana, ya que para inundaciones eventuales y de menor duración la información es suministrada por los mapas de eventos extremos.

En la figura 4.5 se presenta el mapa de riesgo de inundación para el escenario de línea de base. Se observa que las zonas más vulnerables se encuentran en el norte, en los

partidos de Tigre y Escobar, incluyendo las zonas de islas, dónde las duraciones máximas de inundación son de hasta 8 semanas. Le siguen en importancia, al sur, los partidos de Quilmes y Berazategui, con duraciones de hasta 4 semanas y finalmente una franja lindante a las costas de Ensenada y Berisso.

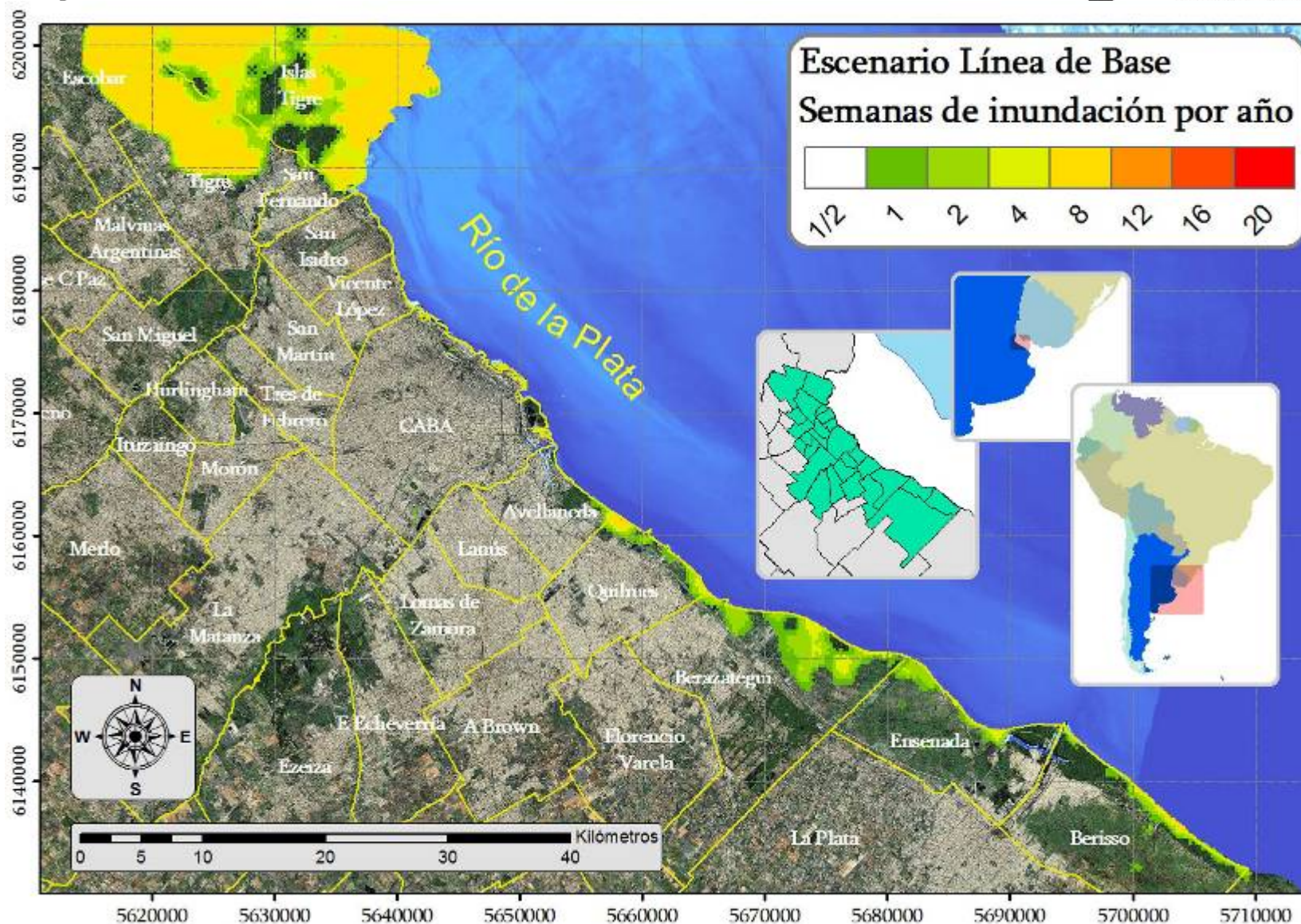


Figura 4.5. Mapas de Riesgo de Inundación – Escenario Línea de Base - Semanas de inundación por año

4.2.2. Mapas de Eventos Extremos

Para los eventos extremos se producen dos tipos de mapas de riesgo de inundación: los que muestran las alturas máximas de inundación y los que muestran las duraciones máximas de inundación. Estos mapas se construyen para las recurrencias de 2, 5 y 10 años. Teniendo en cuenta que la estadística está calculada con 10 años de datos significa que se trata de interpolaciones y no de extrapolaciones.

Se han determinado de antemano rangos de alturas y duraciones para los mapas de riesgo de inundación con el objetivo de poder comparar el escenario de línea de base con los escenarios futuros. Los rangos de las alturas son de 0.50 m y de las duraciones de entre 6 y 12 hs. Asimismo se han establecido los valores máximos de dichos rangos siendo de 4.00 m para las alturas, y de 120 hs para las duraciones, de esta manera se logra un amplio rango de valores para poder distinguir los diversos escenarios y recurrencias.

Las áreas máximas de inundación se delimitan a partir del nivel pico, que es diferente para cada estación y su correspondiente área de influencia. Luego a partir de las distribuciones marginales, dependiendo de la cota topográfica dentro de la zona inundada (representada por el MDT), se determina una duración y altura de inundación interpretando esa cota como valor umbral.

En la figura 4.6 se muestra el proceso de construcción de un mapa de riesgo de duración de inundación para el escenario de línea de base, con una recurrencia de 10 años. A partir de las distribuciones marginales se obtienen las máximas duraciones por umbral. Dado que los mapas se construyen para intervalos discretos se hace una interpolación lineal entre los umbrales. Por ejemplo, el nivel máximo alcanzado que surge de las distribuciones marginales es 3.73 m. La zona comprendida entre los 1.91 y 2.20 m tendrá una duración de entre 36 y 48 hs. De la misma forma en que se ha hecho con las duraciones, se procede con las alturas de inundación, quedando así los dos mapas.



Figura 4.6. Esquema de construcción de mapas de duraciones de inundación

También se construye la función de distribución conjunta para cada una de las tres estaciones consideradas y para distintos umbrales. A partir de ella se elaboran las funciones de distribución condicionales que permiten construir las curvas de información de recurrencia de niveles o de duraciones, por ejemplo, dada una cierta duración de inundación máxima, se puede obtener información estadística de los niveles que se dan para diferentes recurrencias, y viceversa para las duraciones (figura 4.7)

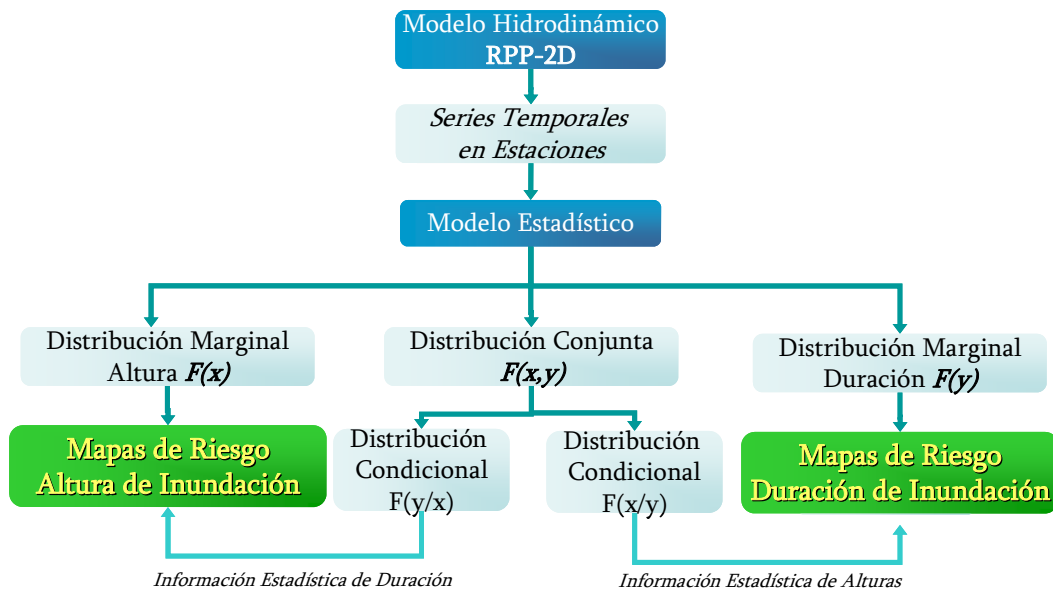


Figura 4.7. Pasos para la construcción de mapas de riesgo de inundaciones

De esta manera se presentan los mapas de riesgo de inundación, mostrando las alturas y duraciones de inundación para las recurrencias de 2, 5 y 10 años, en las figuras 4.8 y 4.9 respectivamente. En particular se analizan los resultados obtenidos para la recurrencia de 10 años, que es en la que se producen las mayores áreas de inundación, análogos razonamientos corresponden para las recurrencias de 2 y 5 años.

En los mapas de riesgo de inundación se distinguen claramente áreas altamente vulnerables que comprenden la zona oeste de Escobar y zona norte de Tigre (incluyendo islas) y zonas costeras desde el sur del partido de Avellaneda hasta Berisso.

Los máximos valores de inundación se registran en las áreas correspondientes a la estación Tigre, en dónde las duraciones máximas son del orden de los 3 días (72 hs), con alturas de inundación de hasta 2.50 m. En zonas adyacentes al río Reconquista las duraciones máximas son del orden diario (24 hs), y las alturas de hasta 1.00 m, análoga situación se registra en la costa norte de San Isidro.

En las áreas correspondientes a la estación Buenos Aires se identifican áreas inundadas en Belgrano, áreas lindantes al Matanza – Riachuelo y zona sur de Avellaneda, con duraciones máximas de 12 hs y alturas de hasta 1.00 m. En el partido de Quilmes las duraciones máximas son de 24 hs y alturas de 1.50 m.

En las áreas costeras de la estación La Plata, se distinguen por un lado el partido de Berazategui, en dónde se registran alturas máximas de 1.50 m y duraciones de 36 hs. En Ensenada y Berisso predominan las duraciones máximas de 24 hs y las alturas son del orden de 1.00 m.

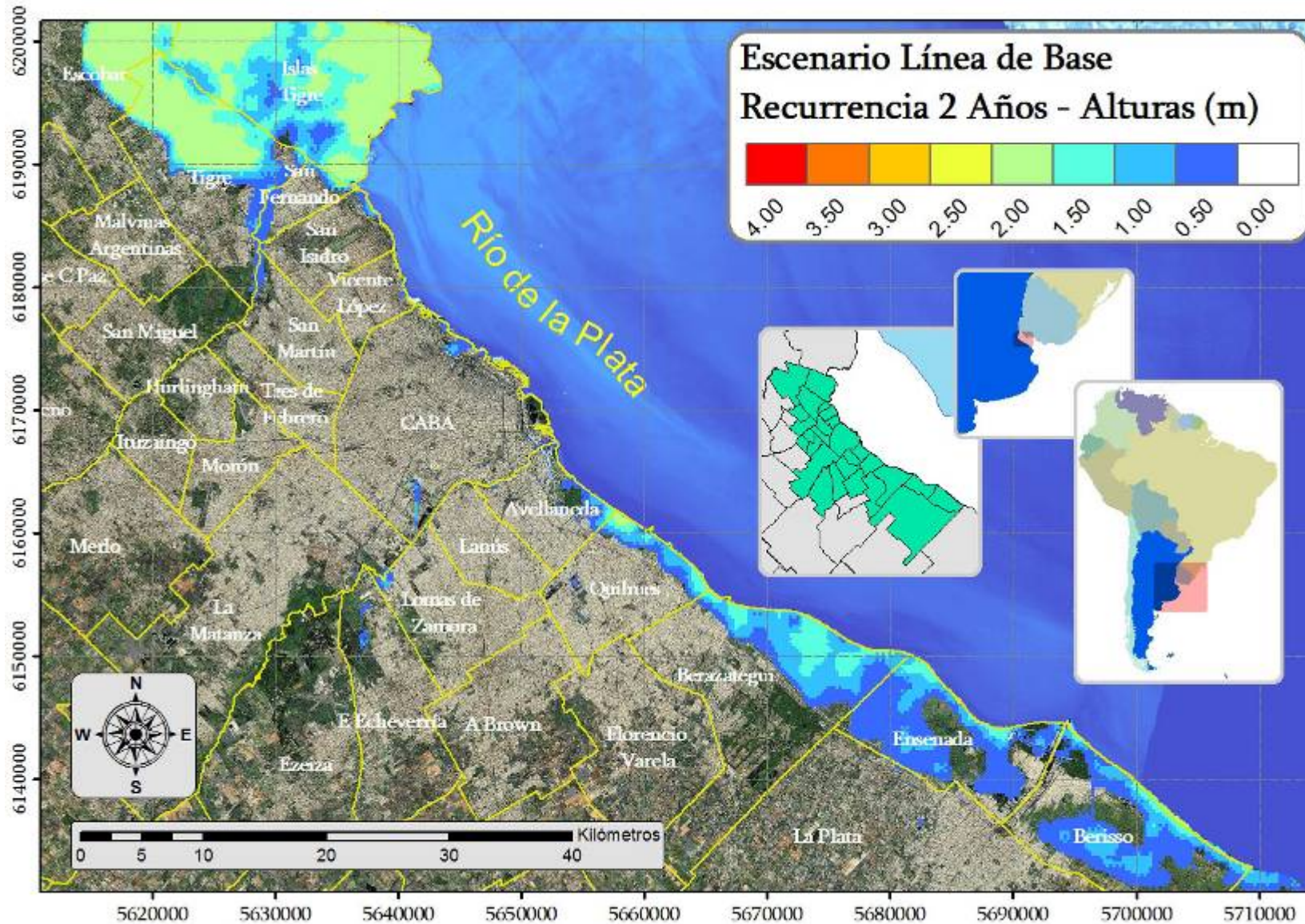
En las tablas 4.1 y 4.2 se detalla por cada estación el porcentaje de área inundada según rangos de altura y duración respectivamente para las recurrencias de 2, 5 y 10 años.

Período de Retorno	Estación	Altura (m)							
		0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00
2 Años	La Plata	54%	33%	13%	-	-	-	-	-
	Buenos Aires	52%	31%	12%	4%	-	-	-	-
	Tigre	9%	14%	21%	55%	-	-	-	-
5 Años	La Plata	46%	35%	16%	3%	-	-	-	-
	Buenos Aires	49%	29%	15%	5%	2%	-	-	-
	Tigre	6%	13%	15%	20%	46%	-	-	-
10 Años	La Plata	39%	38%	15%	8%	-	-	-	-
	Buenos Aires	50%	28%	14%	6%	3%	-	-	-
	Tigre	6%	12%	11%	17%	55%	-	-	-

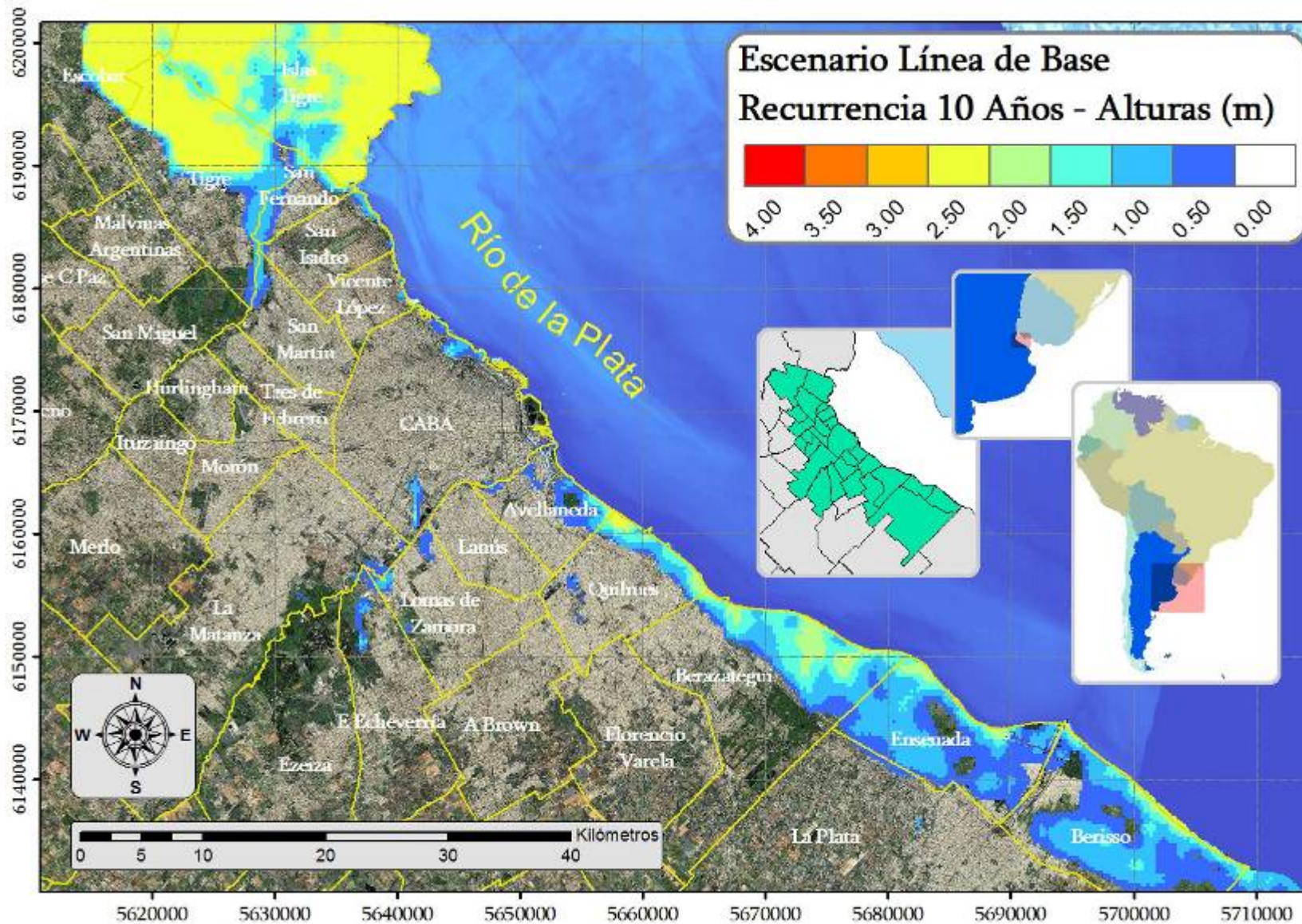
Tabla 4.1. Porcentaje de área total inundada por estación para distintos períodos de retorno según rangos de altura

Período de Retorno	Estación	Duración (hs)										
		6	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
2 Años	La Plata	29%	34%	23%	13%	1%	-	-	-	-	-	-
	Buenos Aires	31%	27%	24%	12%	5%	-	-	-	-	-	-
	Tigre	4%	8%	11%	14%	21%	42%	-	-	-	-	-
5 Años	La Plata	25%	30%	27%	11%	6%	-	-	-	-	-	-
	Buenos Aires	37%	27%	17%	11%	5%	3%	-	-	-	-	-
	Tigre	4%	6%	9%	10%	12%	58%	-	-	-	-	-
10 Años	La Plata	29%	24%	28%	9%	8%	2%	-	-	-	-	-
	Buenos Aires	41%	24%	17%	10%	5%	2%	2%	-	-	-	-
	Tigre	4%	6%	9%	8%	9%	16%	48%	-	-	-	-

Tabla 4.2. Porcentaje de área total inundada por estación para distintos períodos de retorno según rangos de duración

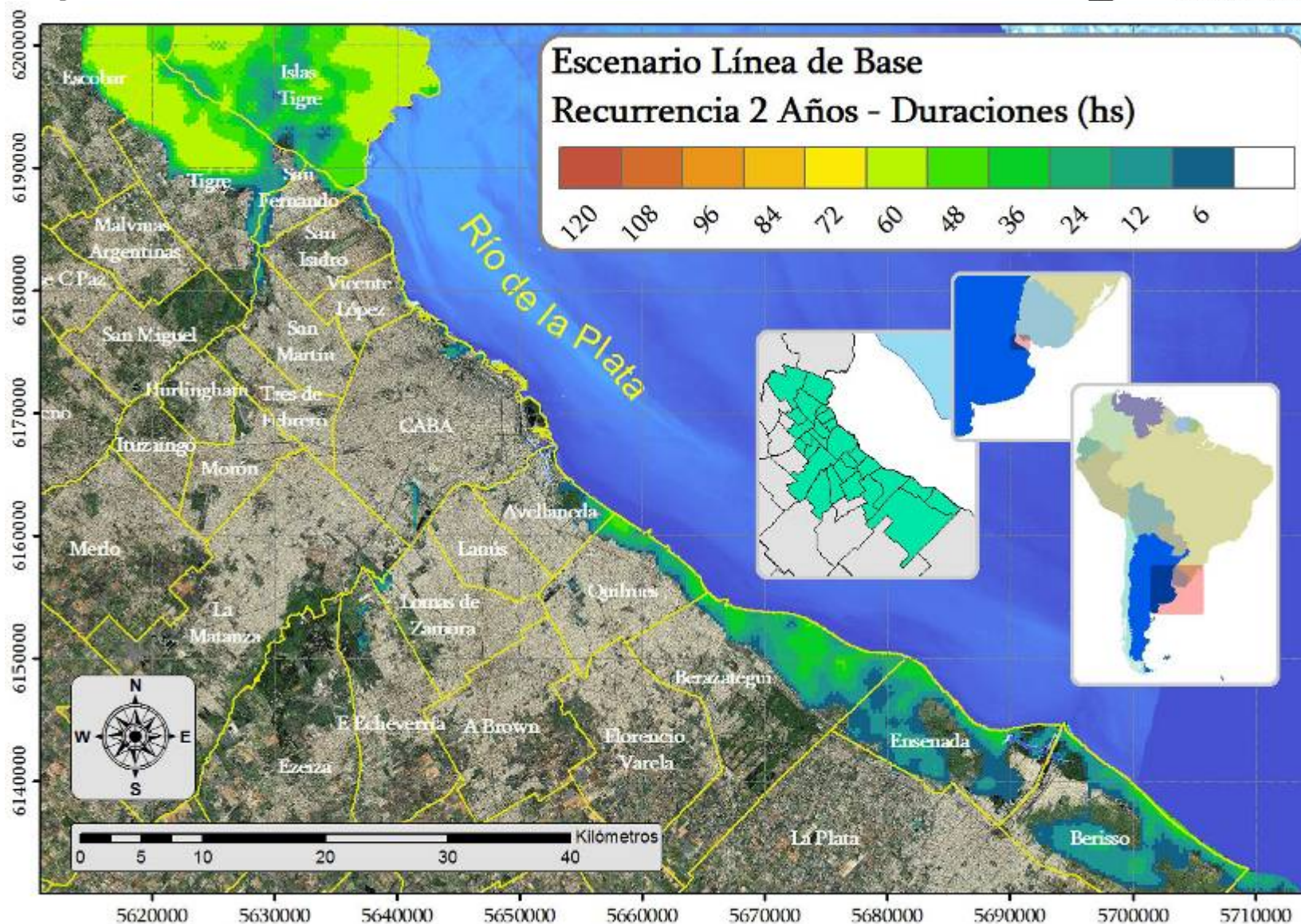


a) Tiempo de Recurrencia: 2 Años

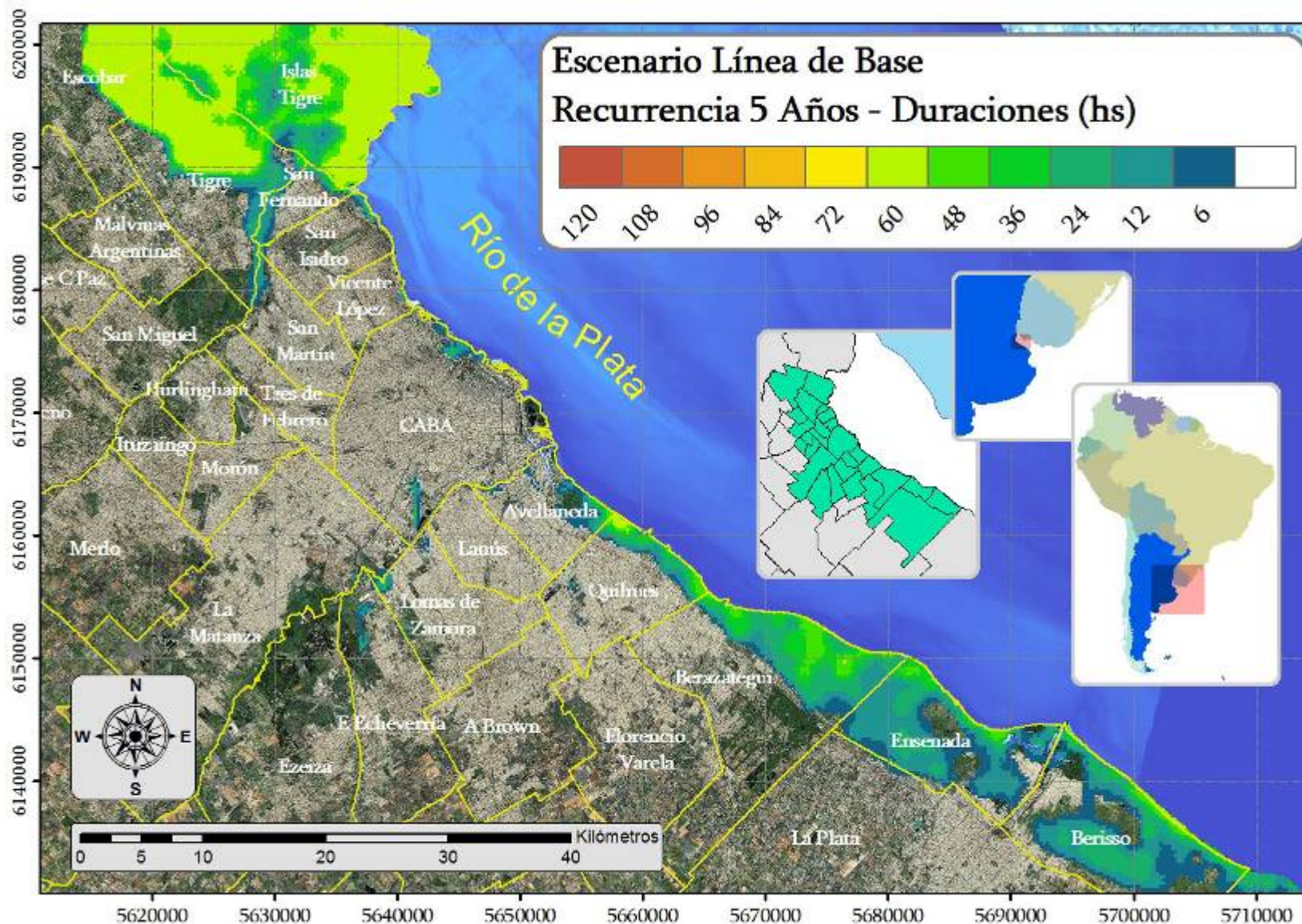


c) Tiempo de Recurrencia: 10 Años

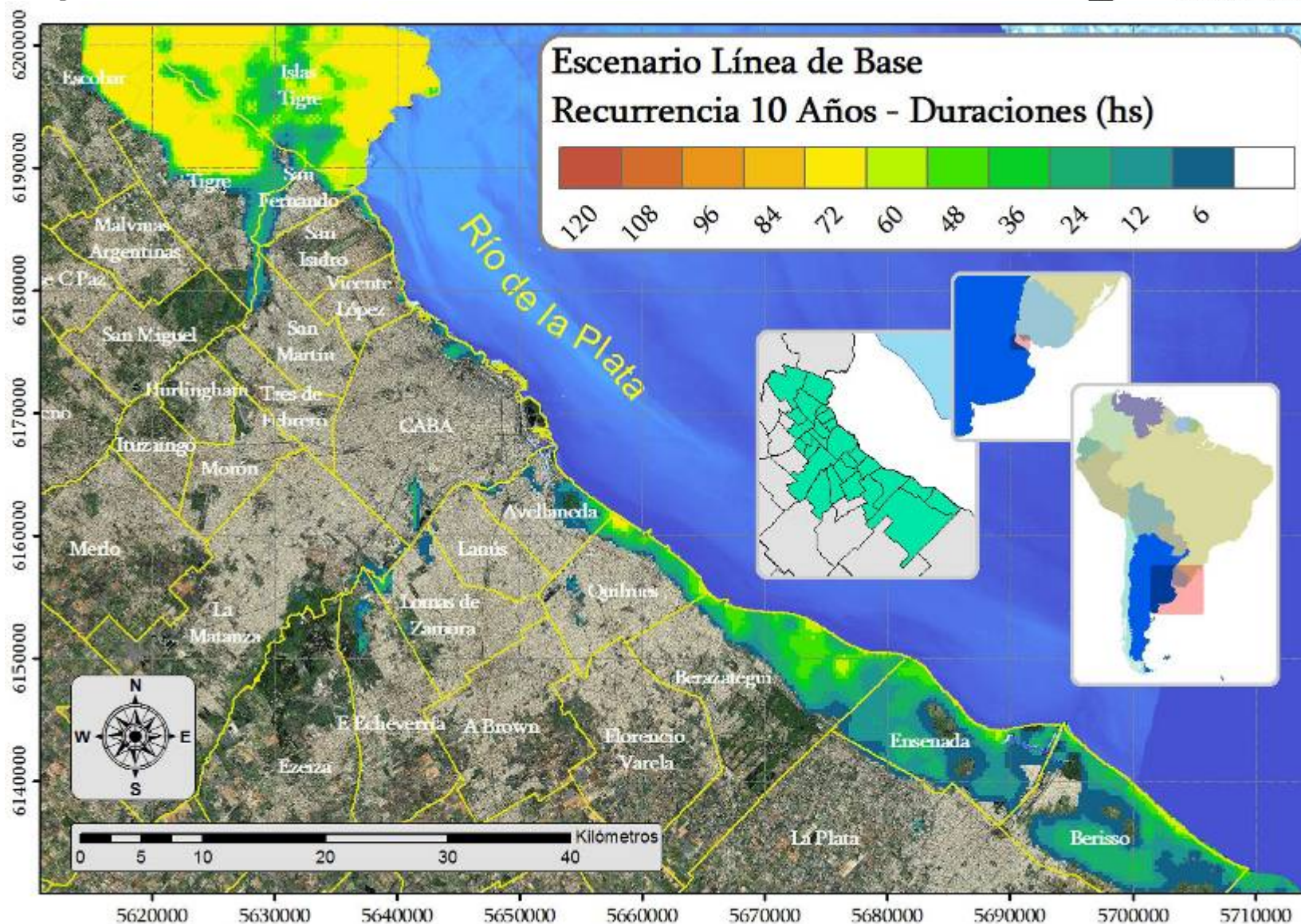
Figura 4.8. Mapas de Riesgo de Inundación – Escenario Línea de Base - Altura (m)



a) Tiempo de Recurrencia: 2 Años



b) Tiempo de Recurrencia: 5 Años



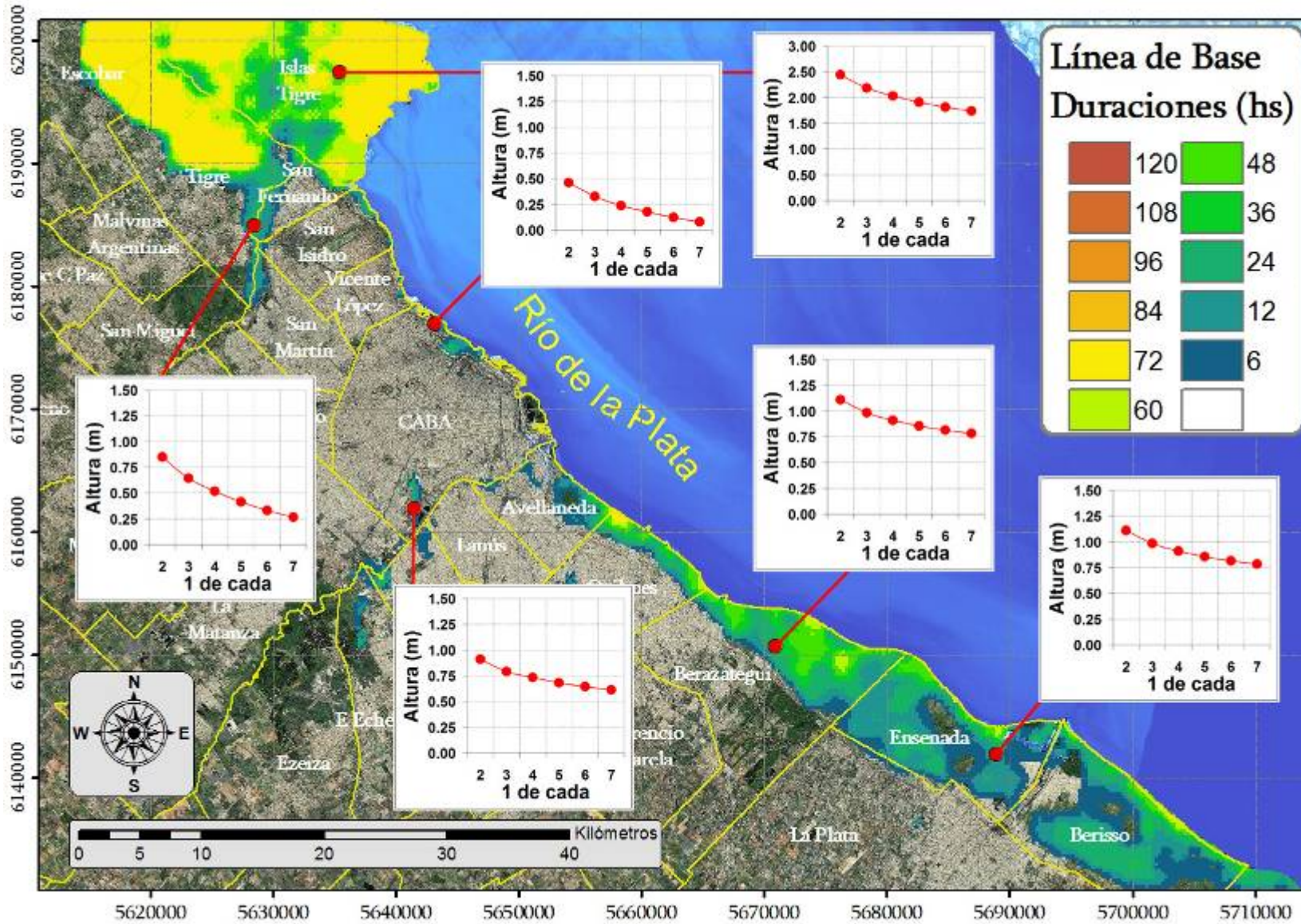
c) Tiempo de Recurrencia: 10 Años

Figura 4.9. Mapas de Riesgo de Inundación – Escenario Línea de Base - Duraciones (hs)

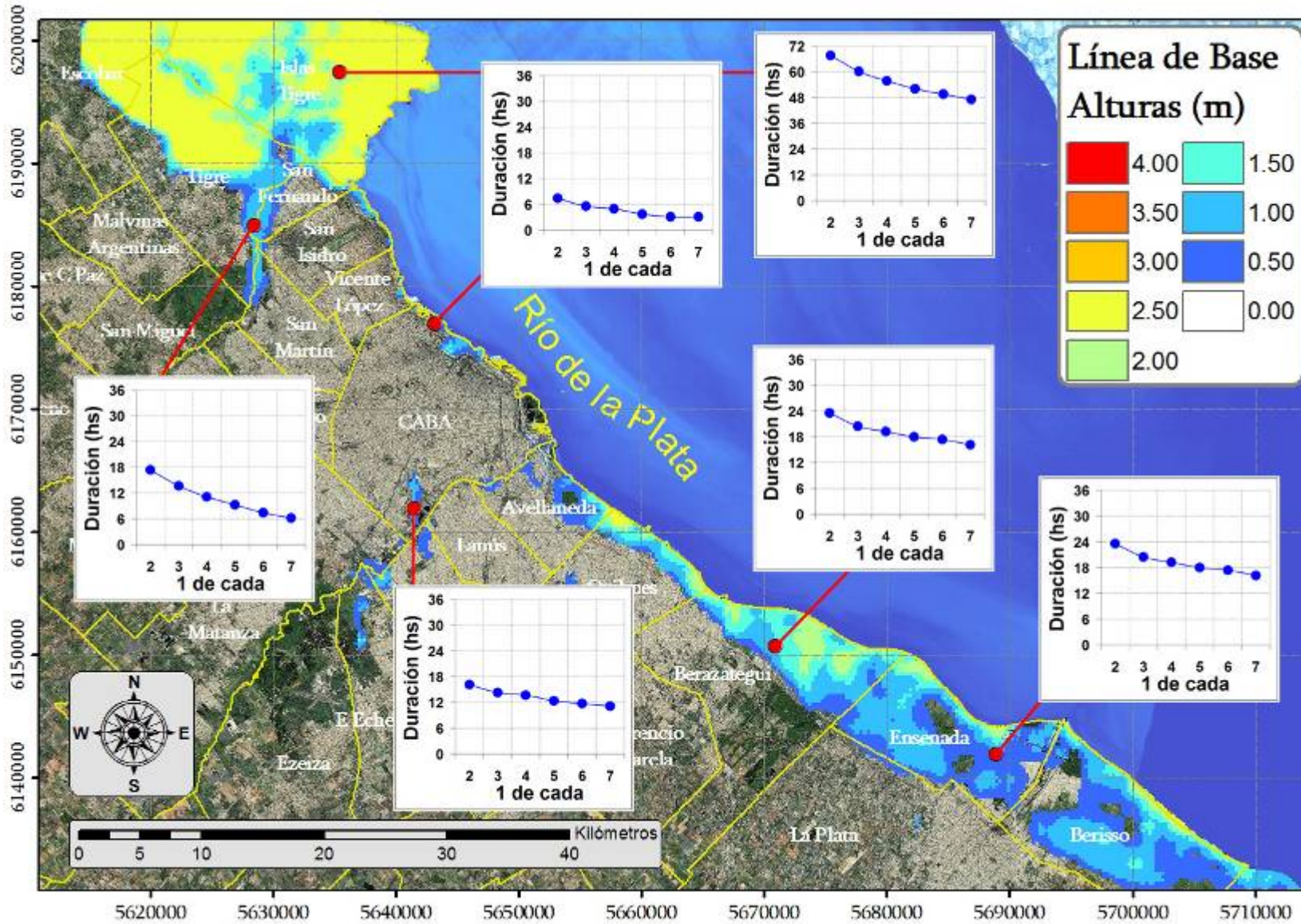
En los siguientes mapas (figura 4.10) se ha agregado información estadística a los mapas de riesgo de inundación para la recurrencia de 10 años (correspondientes a las figuras 4.8.c y 4.9.c). Los mapas de duraciones ofrecen información complementaria acerca de las alturas de inundación, de acuerdo a la metodología explicada en el capítulo anterior, y viceversa para los mapas de alturas.

Se han definido algunos puntos, a modo de ejemplificar el tipo de información brindada, para visualizar los resultados. Se han seleccionado dos lugares por área de influencia de cada estación, aunque se cuenta con la información de todas las celdas. Para la estación de Tigre se ha representado una ubicación en la zona de islas y otra sobre el Reconquista; en la de Buenos Aires, la zona de Belgrano y zona sur de Capital sobre el Riachuelo; y en la zona de La Plata, en Ensenada y Berazategui.

Por un lado los mapas muestran las alturas y duraciones máximas de las inundaciones y por el otro las curvas muestran la frecuencia decreciente de las alturas para el caso de las duraciones y de las duraciones para el caso de las alturas. La información es complementaria, ya que las duraciones máximas se obtienen inmediatamente de la lectura de los mapas y la curva de frecuencia muestra información de eventos de crecidas que no son los máximos. La probabilidad de tener un evento con menor altura o duración de inundación cada vez tiene menor probabilidad de ocurrencia.



a) Mapas de duraciones de inundación con información estadística de alturas



b) Mapas de alturas de inundación con información estadística de duraciones

Figura 4.10. Mapas de Riesgo de Inundación - Escenario Línea de Base - Información estadística

5. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

5.1. Introducción

Los escenarios climáticos son representaciones alternativas de lo que podría acontecer en el clima futuro, y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras. La evolución futura de las emisiones de gases de efecto invernadero es muy incierta ya que es el producto de sistemas dinámicos muy complejos, determinado por fuerzas tales como el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico o el cambio tecnológico.

Los escenarios son de utilidad para el análisis del cambio climático, y en particular para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación. La posibilidad de que en la realidad las emisiones evolucionen tal como se describe en alguno de estos escenarios es muy remota.

5.1.1. Escenarios SRES

Para describir de manera coherente las relaciones entre las fuerzas determinantes de las emisiones y su evolución, y para añadir un contexto a la cuantificación de los escenarios, se desarrollaron cuatro líneas evolutivas diferentes. Cada una de ellas representa un cambio (o tendencia) demográfico, social, económico, tecnológico y medioambiental, que algunos pueden valorar positivamente, y otros, negativamente.

Hay seis grupos de escenarios que abarcan cuatro combinaciones de cambios demográficos y de evoluciones sociales y económicas, así como de grandes corrientes tecnológicas, en correspondencia con las cuatro familias (A1, A2, B1, B2). (figura 5.1)

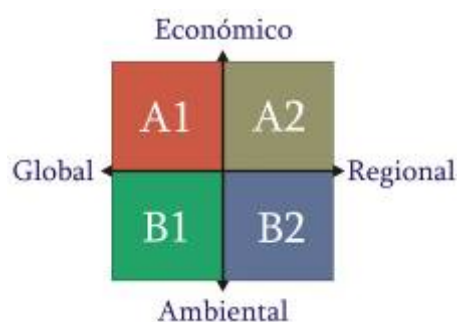


Figura 5.1. Escenarios definidos por el IPCC

La línea evolutiva y familia de escenarios A1 describe:

- rápido crecimiento económico;
- una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente;
- una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes;
- convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante.

La familia de líneas evolutivas y escenarios A2 describe:

- un mundo muy heterogéneo;
- autosuficiencia y conservación de identidades locales;
- una población mundial en continuo crecimiento;
- un desarrollo económico 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.

La familia de líneas evolutivas y escenarios B1 describe:

- un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza un máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1;
- rápidos cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos;
- preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.

La familia de líneas evolutivas y escenarios B2 describe:

- predominancia de las soluciones locales frente a la sostenibilidad económica, social y medioambiental;
- un mundo cuya 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 B1 y A1;

- aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.

5.1.2. Escenarios de modelación futuros

Los escenarios futuros elaborados a partir del IPCC, basados en suposiciones acerca de las posibles evoluciones a nivel demográfico, político - social, económico y tecnológico mundial, constituyen la base sobre la que se elaboran la mayoría de los escenarios de clima futuro. Para poder modelar estos escenarios se han utilizado salidas de modelos climáticos globales, en particular el aumento del nivel medio del mar y la intensidad y dirección de los campos de vientos. Se ha seleccionado la línea evolutiva de escenarios A2, en donde no se espera grandes cambios en el comportamiento general de la sociedad y su desarrollo tecnológico y económico.

En el estudio anterior, los escenarios de cambio climático estaban asociados a eventos de tormenta sintéticos, en donde se variaba 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. En el presente estudio los escenarios de cambio climático son planteados a través de una simulación continua de una década. Los escenarios de modelación planteados incluyen al escenario de línea de base, cuyos resultados fueron presentados en el capítulo 3, y dos escenarios futuros como muestra la siguiente tabla:

<i>Escenario</i>	<i>I – Línea de Base</i>	<i>II – Futuro</i>	<i>III - Futuro</i>
<i>Período</i>	<i>1990 – 1999</i>	<i>2030 – 2039</i>	<i>2070 - 2079</i>

Tabla 5.1. Escenarios de modelación

5.1.2.1. Caudal de los tributarios

Se han considerado las mismas series de caudales de los tributarios que en el escenario línea de base. Se ha estudiado la sensibilidad de aumentar el caudal ingresante en un 30% a 30.000 m³/s, este efecto solamente genera aumentos de unos pocos centímetros hasta la altura de Martín García y es casi imperceptible en Buenos Aires (Re & Menéndez, 2005)

5.1.2.2. Marea Astronómica

Se ha conservado la marea astronómica utilizada para el escenario de línea de base.

5.1.2.3. Nivel medio del mar

Uno de los impactos proyectados en el contexto del calentamiento global es el aumento del nivel medio del mar, debido principalmente a la expansión del agua del mar y en menor proporción al derretimiento de coberturas de hielo y glaciares. El aumento del nivel medio del mar fue obtenido en función de las previsiones del IPCC (2001), para el escenario socio - económico A2. Estos niveles fueron obtenidos de diferentes proyecciones de distintos Modelos de Circulación General.

Para la década del 2030 se plantea un aumento del nivel medio del mar de +19 cm mientras que para la década del 2070 un aumento de +50 cm, que son valores máximos del aumento del nivel medio, correspondientes a la envolvente de diferentes modelos utilizados en el IPCC.

5.1.2.1. Vientos

Para los escenarios futuros se ha utilizado modelo de circulación global desarrollado por el Hadley Center del Reino Unido denominado HadCM3, que es el que mejor representa el clima en el sur de Sudamérica, los resultados de este modelo están disponibles a través de www.dkrz.de/ipcc/ddc/html/SRES/SRES_all.html (Centro de Distribución de Datos del IPCC).

Estos conforman una base de datos de 30 puntos ubicado entre las latitudes 32.5 S y 42.5 S y las longitudes 62.5 O - 50.0 O sobre el dominio del modelo RPP-2D como se muestra en la figura 5.2

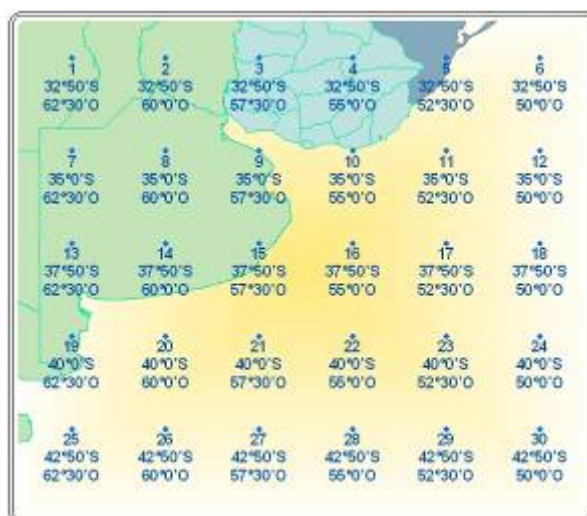


Figura 5.2. Estaciones de viento utilizadas para los escenarios futuros

5.2. Resultados de los escenarios futuros

5.2.1. Nivel Medio

En primer lugar se presentan los resultados de los niveles medios en la figura 5.3 para las estaciones de La Plata, Buenos Aires y Tigre, para el escenario línea de base y los dos escenarios futuros. Prácticamente el aumento del nivel medio en las estaciones es del orden de lo adicionado para la correspondiente línea evolutiva (un aumento de 19 cm para el escenario 2030 y 50 cm para el escenario 2070). Se evidencia también la similitud entre los niveles medios de Buenos Aires y La Plata, la diferencia es más apreciable en Tigre de entre 10 y 13 cm con respecto a Buenos Aires.

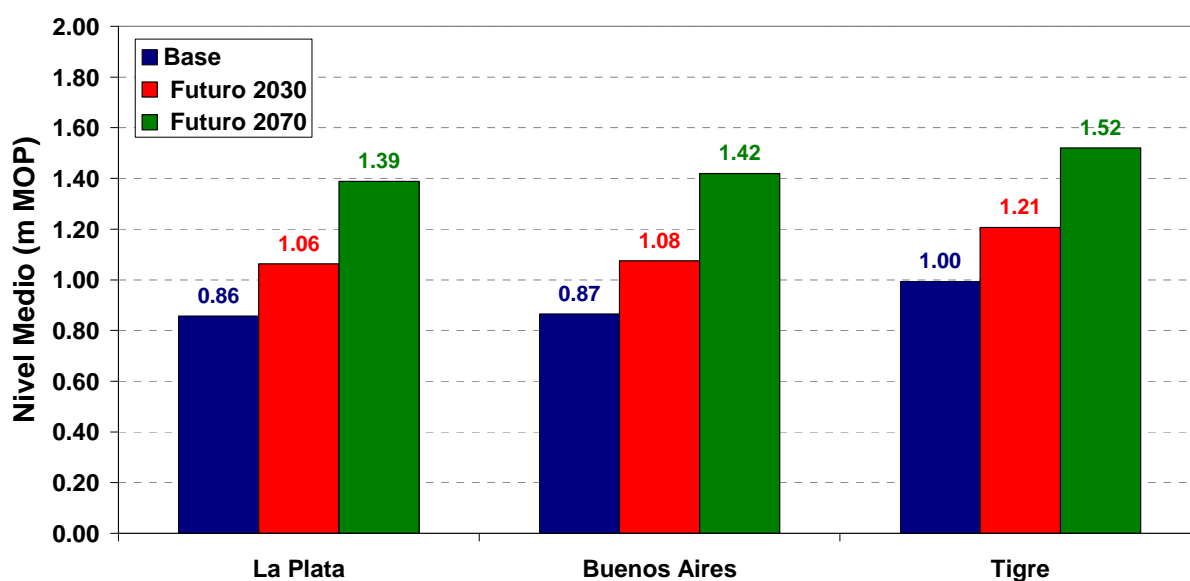


Figura 5.3. Nivel medio en las estaciones de La Plata, Buenos Aires y Tigre para los 3 escenarios

5.2.2. Frecuencia de Niveles

Asimismo, se ha realizado la comparación de la frecuencia de ocurrencia relativa y acumulada de niveles. En las figuras 5.4 y 5.5 se presentan los resultados para la estación de Buenos Aires solamente, ya que análogos comportamientos ocurren en las estaciones de Tigre y La Plata, en ellas se ve reflejado un traslado de las curvas de frecuencia para los escenarios futuros, lo que representa un aumento de la ocurrencia en los niveles más altos.

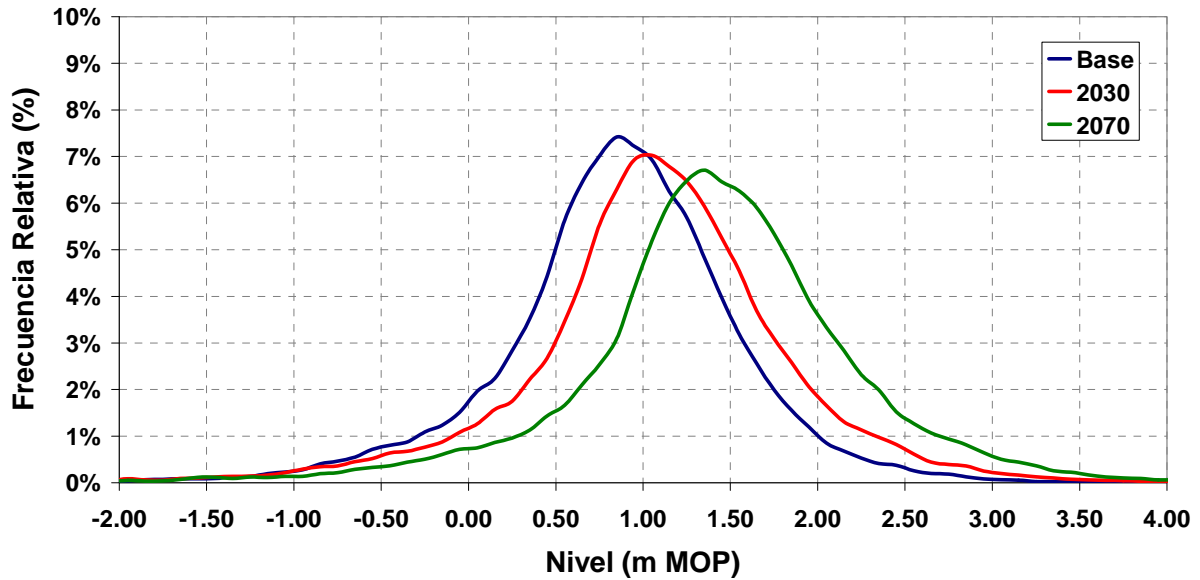


Figura 5.4. Frecuencia relativa de niveles en Buenos Aires para los 3 escenarios

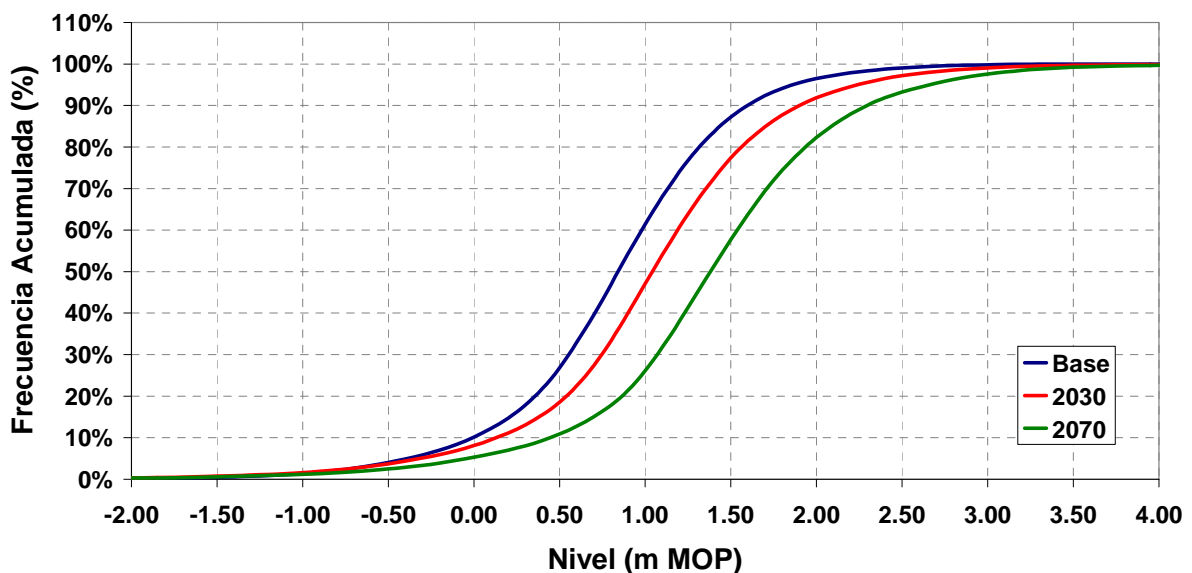
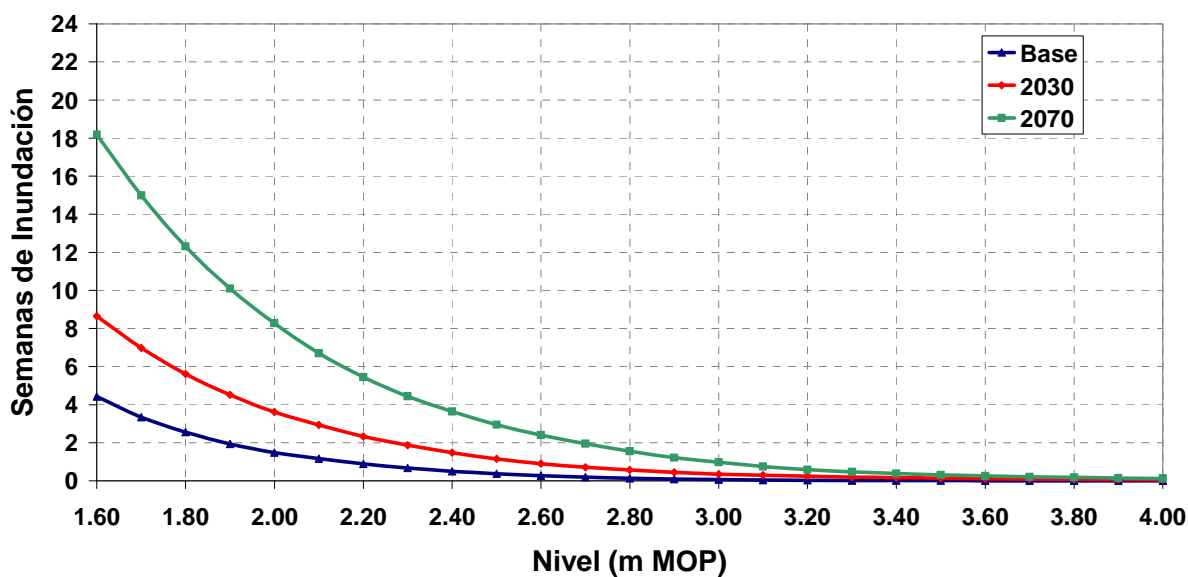


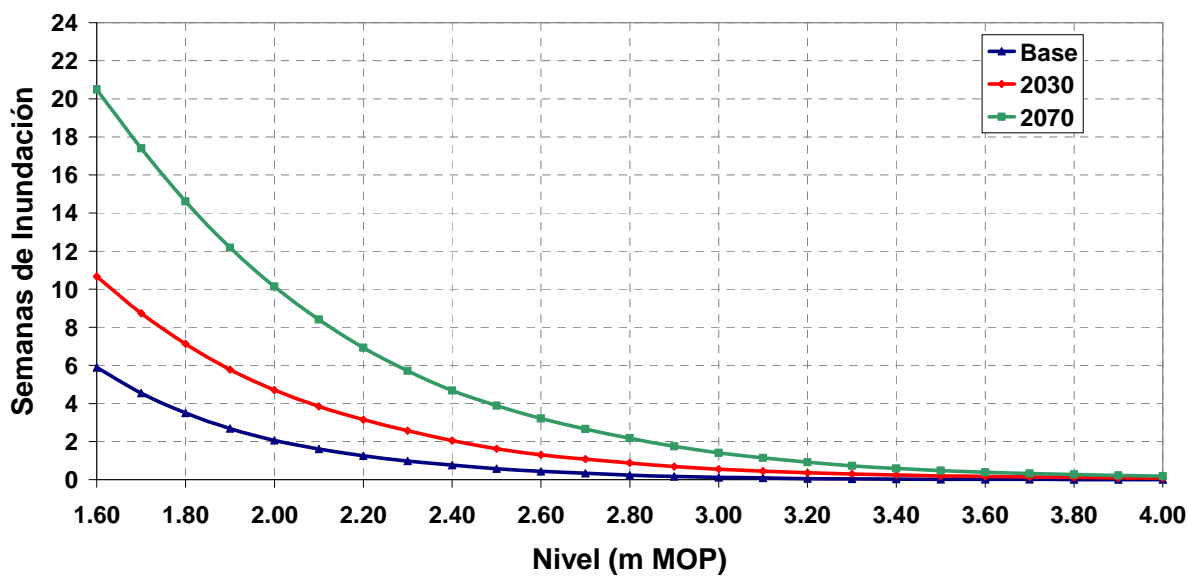
Figura 5.5. Frecuencia acumulada de niveles en Buenos Aires para los 3 escenarios

Las semanas de inundación obtenidas a partir de la frecuencia de ocurrencia de niveles aumentan notoriamente en los escenarios futuros como se puede observar en la figura 5.6 para las distintas estaciones. La incidencia es muy significativa en los umbrales más bajos, en dónde se registran numerosas semanas de inundación. Para el año 2030 el tiempo de inundación en el umbral 1.60 m es del orden de 10 semanas y es descendente para los umbrales más altos, téngase en cuenta que el orden del aumento del nivel medio del mar es de 19 cm por lo que los umbrales, prácticamente los umbrales que estén por debajo del umbral 1.80 m son los que van a estar afectados por inundaciones recurrentes. Lo mismo sucede para el caso del año 2070 en dónde se producen inundaciones del orden de 20 semanas para el umbral 1.60 m, en este caso el aumento del nivel medio del mar es de 50 cm por lo que los umbrales más afectados son los que están por debajo del 2.10 m. En

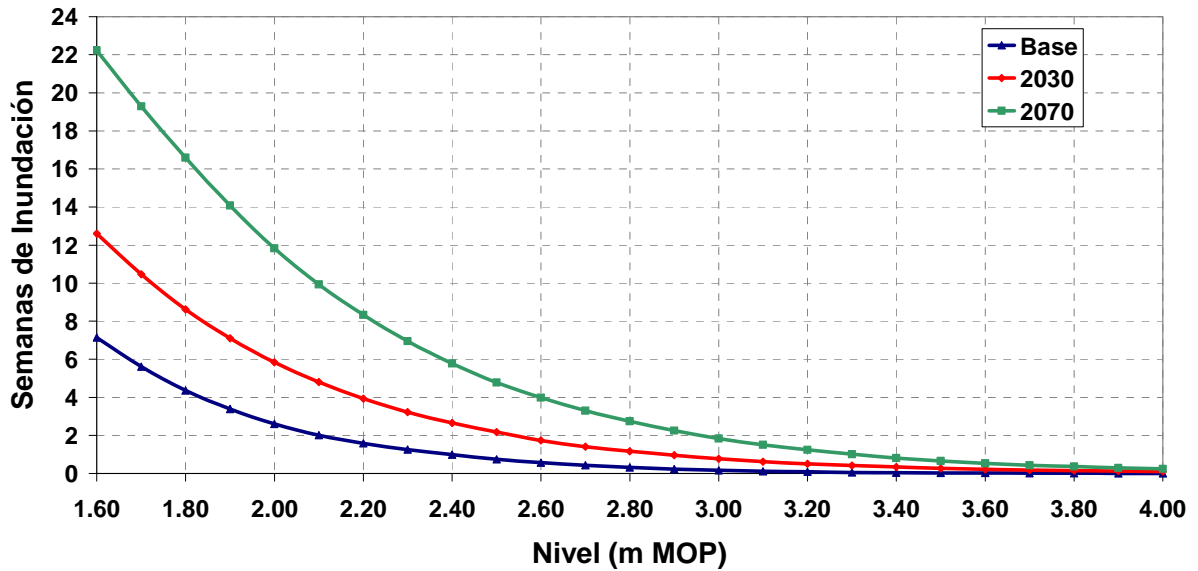
términos generales prácticamente existe una duplicación del tiempo de inundación, entre el escenario base y el 2030 y el 2030 y el 2070.



a) La Plata



b) Buenos Aires

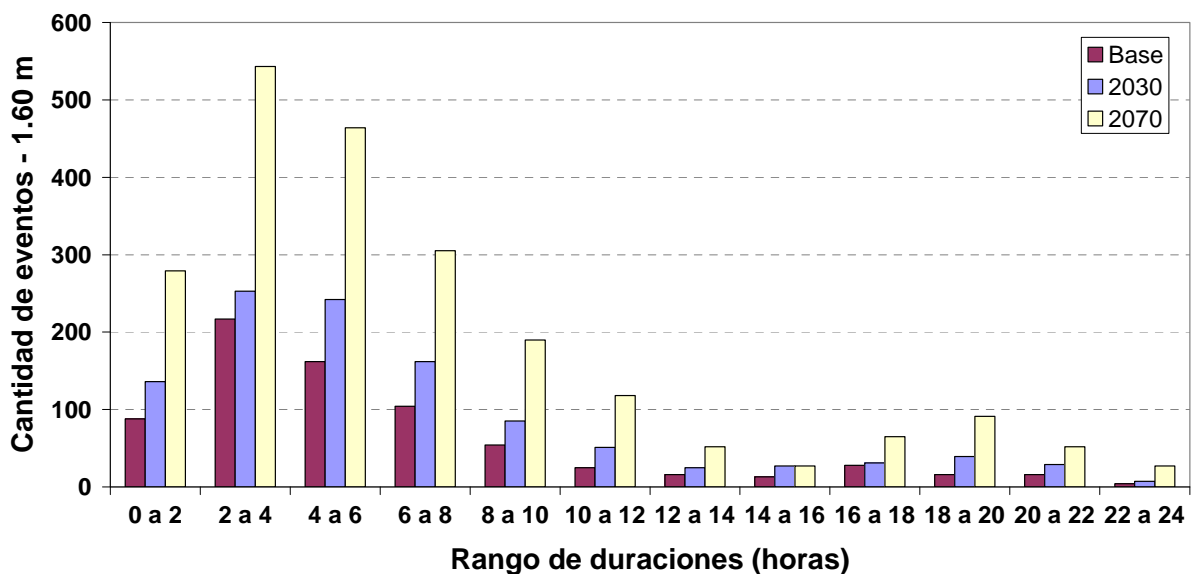


c) Tigre

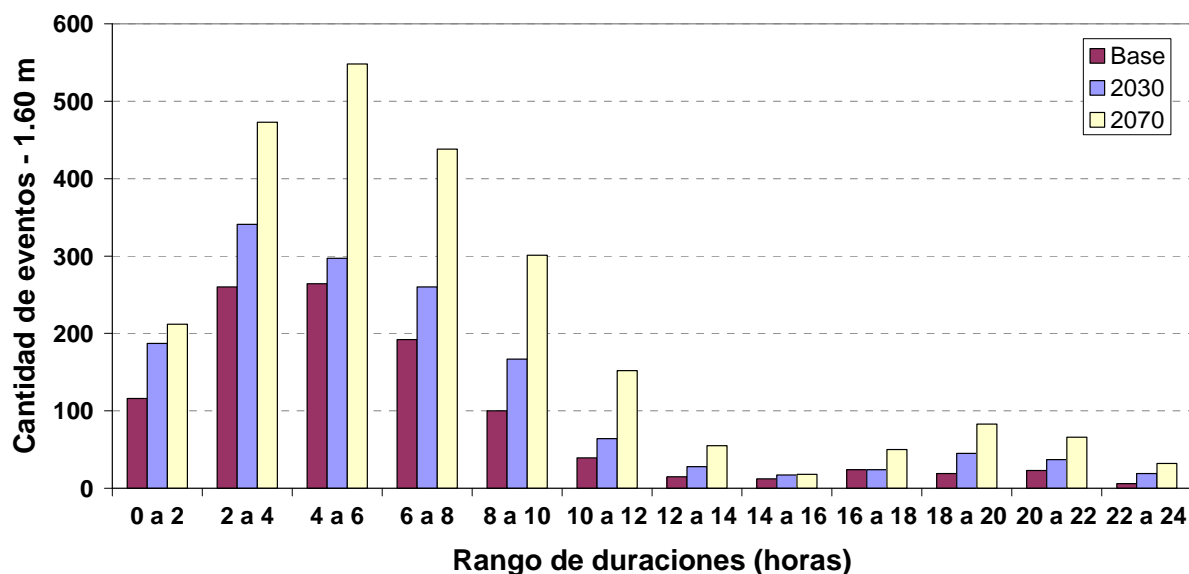
Figura 5.6. Semanas de inundación promedio por año en estación para los 3 escenarios

5.2.3. Frecuencia de Duraciones

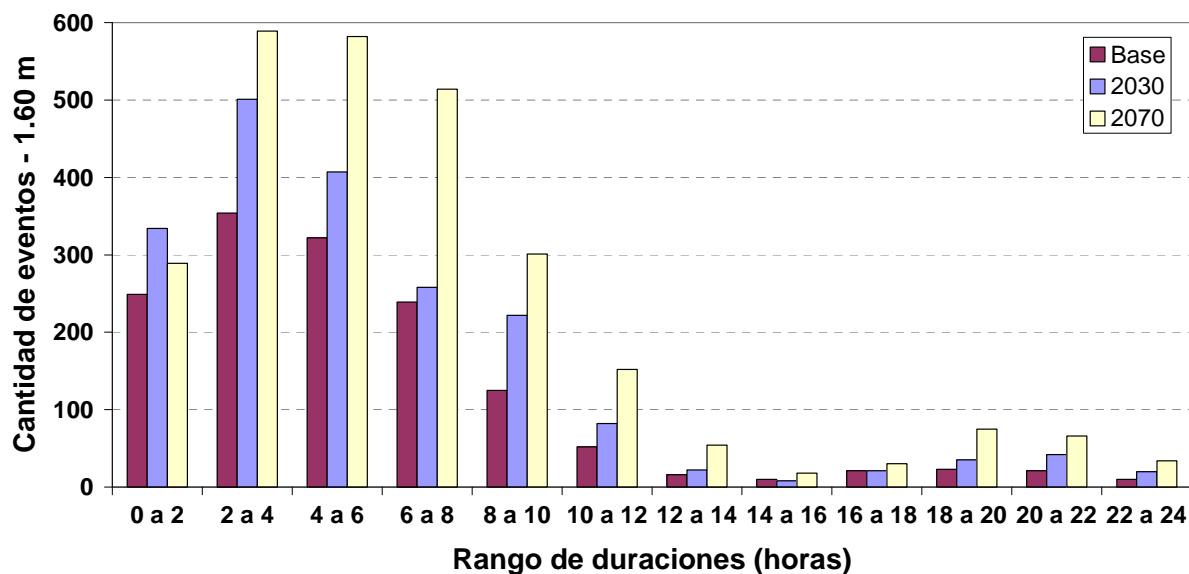
Para comparar las distribuciones de los 3 escenarios para las diferentes estaciones se utilizó la frecuencia relativa y absoluta de duración de inundación. En la figura 5.7 se muestra la frecuencia absoluta. Se muestra en principio la forma de distribución para el umbral 1.60 m. Se puede evidenciar un comportamiento distinto para las 3 estaciones, en La Plata la cantidad de eventos aumenta notablemente en el escenario 2070 para la mayoría de las duraciones, en cambio en Tigre o Buenos Aires el aumento es considerable a partir de las 6 hs de duración. El aumento más evidente es en la estación de La Plata, siguiéndole en importancia Buenos Aires y Tigre.



a) La Plata



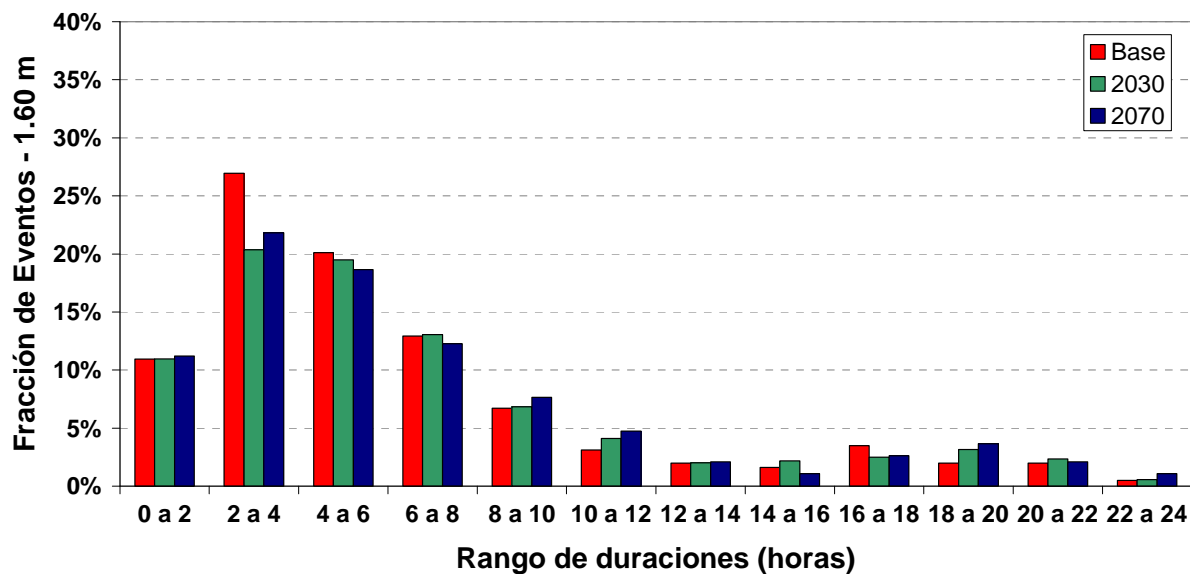
b) Buenos Aires



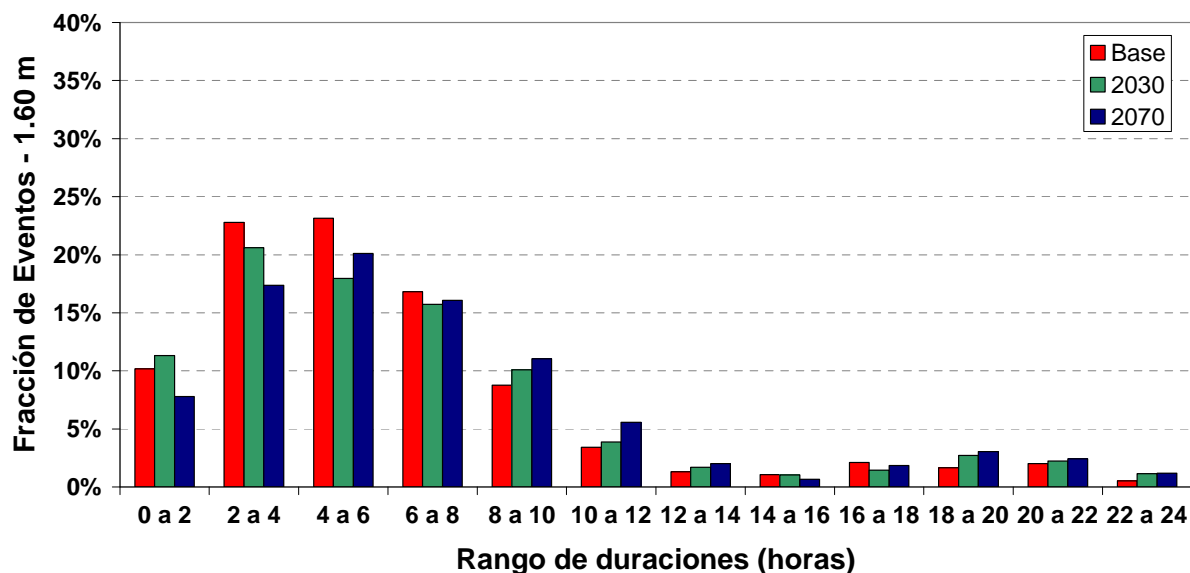
c) Tigre

Figura 5.7. Frecuencia absoluta de duración de inundación para los distintos escenarios

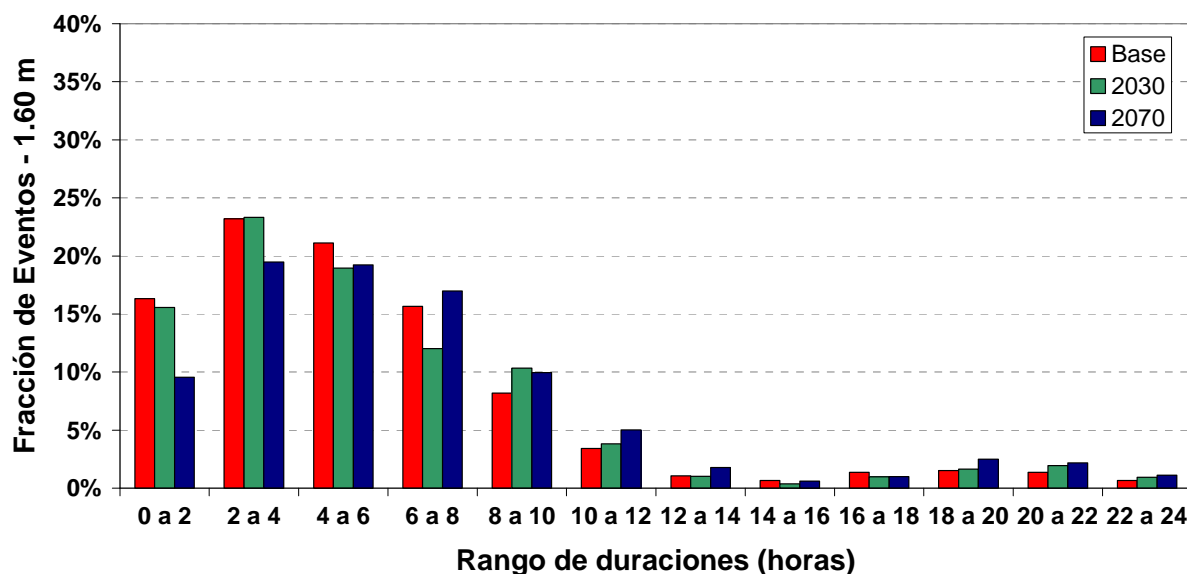
Con la frecuencia relativa no se observan cambios significativos, sin embargo tienden a disminuir las duraciones menores e incrementar las de mayor duración. Para las 3 estaciones se observan prácticamente la misma tendencia, siendo las distribuciones similares para los distintos escenarios.



a) La Plata



b) Buenos Aires



c) Tigre

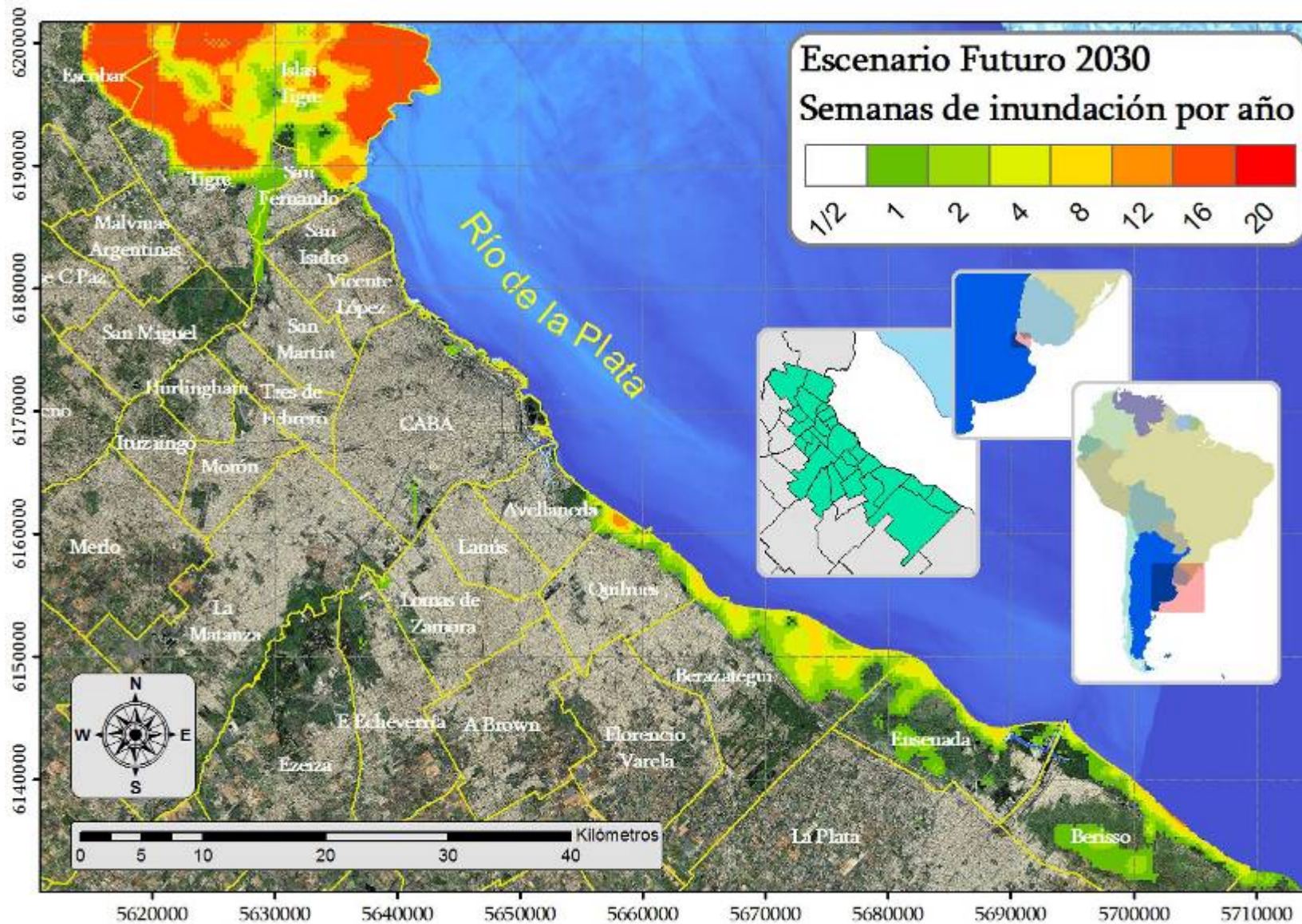
Figura 5.8. Frecuencia relativa de duración de inundación para los distintos escenarios

5.2.4. Mapas de Frecuencia de Inundación

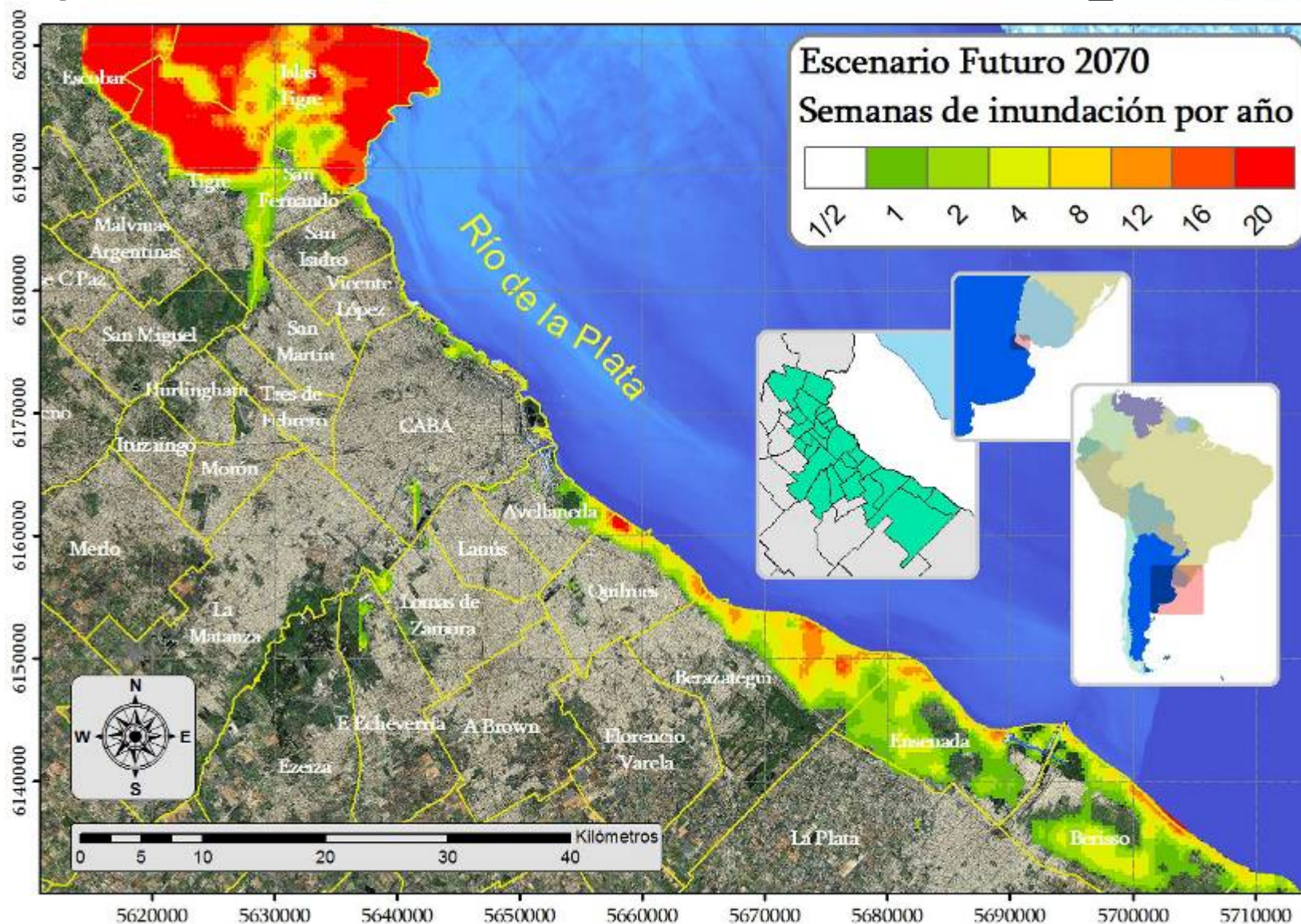
En la figura 5.9 se presentan los mapas de frecuencia de inundación para los escenarios futuros 2030 y 2070.

Existe un incremento del tiempo de inundación y del área respecto del escenario de línea de base, en la zona de Tigre y Escobar las inundaciones recurrentes pasan a ser de entre 12 y 16 semanas para el 2030, y de entre 16 y 20 semanas para el 2070. Se registra también el aumento del área sobre la desembocadura del Río Reconquista del orden de entre 1/2 y 1 semana para el 2030 y entre 1 y 2 semanas para el 2070.

En Quilmes y Berazategui se registran inundaciones del orden de entre 2 y 4 semanas para el 2030 y entre 4 y 8 semanas para el 2070. En los partidos de Ensenada y Berisso, dónde prácticamente no se registraban inundaciones de recurrencia intranual se registra un incremento de las inundaciones de entre 1 y 2 semanas para el 2030 y entre 2 y 4 semanas para el 2070.



a) Escenario Futuro 2030



b) Escenario Futuro 2070

Figura 5.9. Mapas de Riesgo de Inundación – Semanas de inundación por año

Se ha hecho la comparación del área de inundación en las 3 estaciones para los distintos escenarios en la figura 5.10.

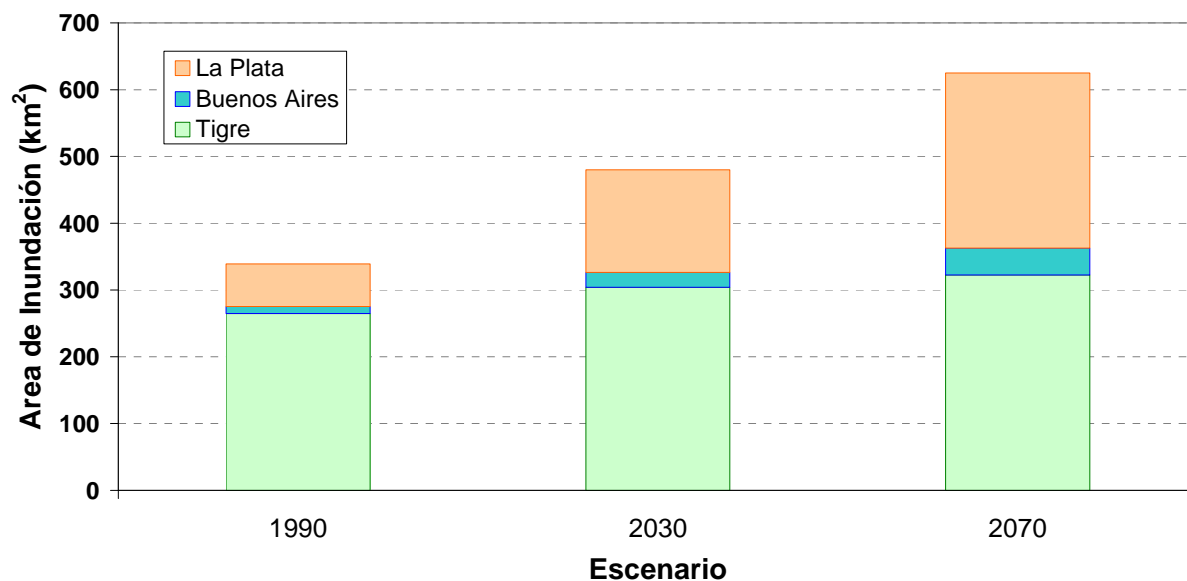
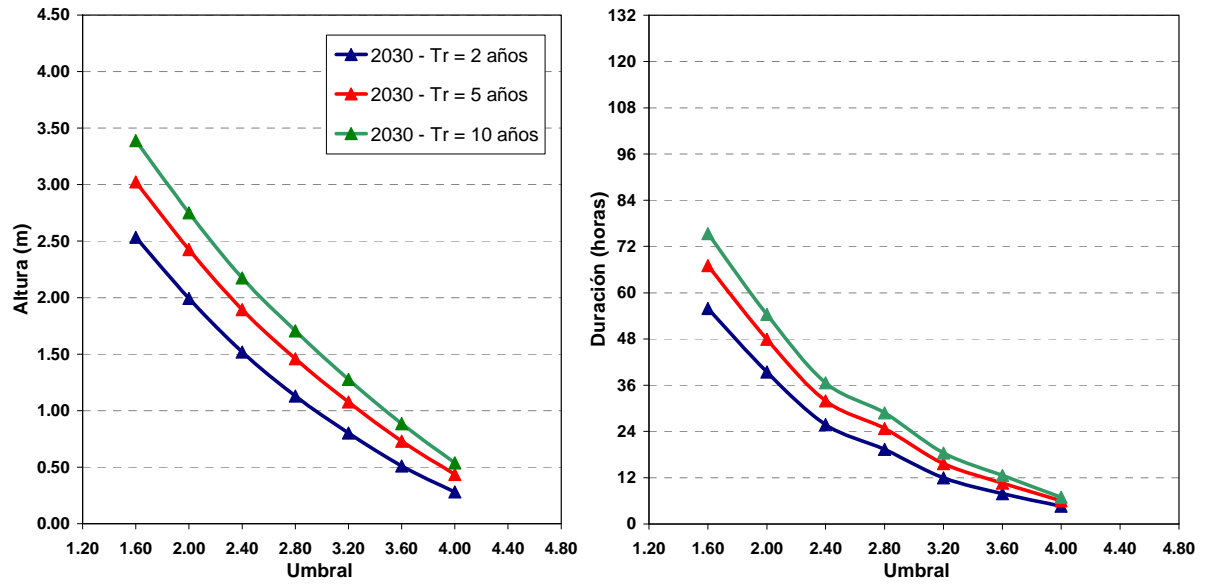


Figura 5.10. Área de inundación recurrente para los 3 escenarios

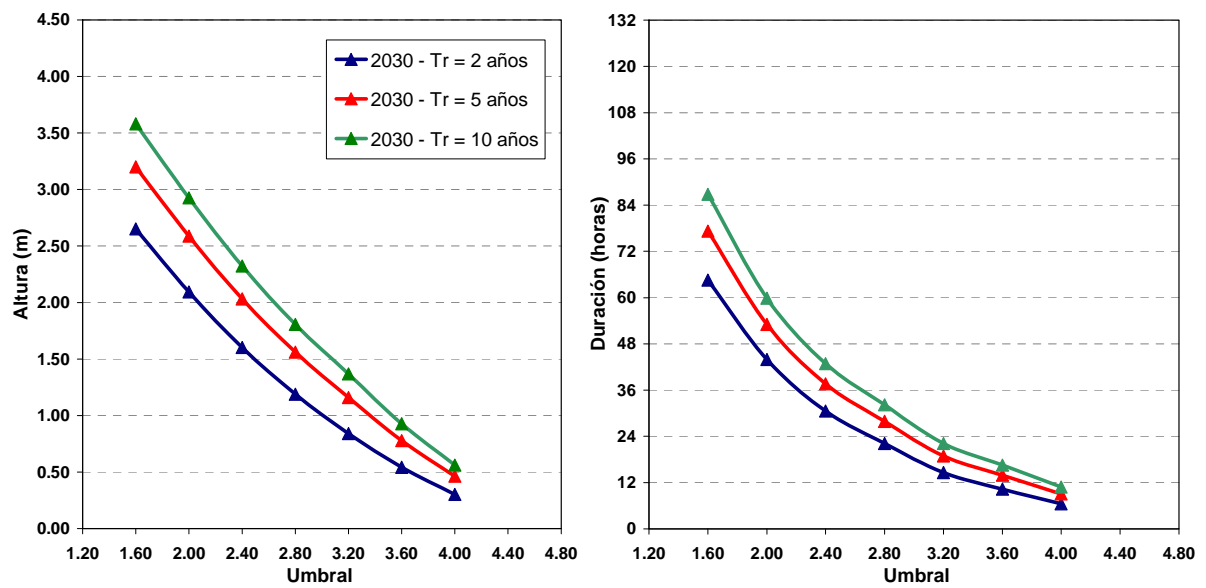
Existe un aumento de área para inundaciones recurrentes para el 2030 de un 41% y un 82 % para el 2070 respecto del escenario línea de base, principalmente movilizadopor un aumento significativo de las áreas correspondientes a la estación de La Plata.

5.2.5. Eventos Extremos

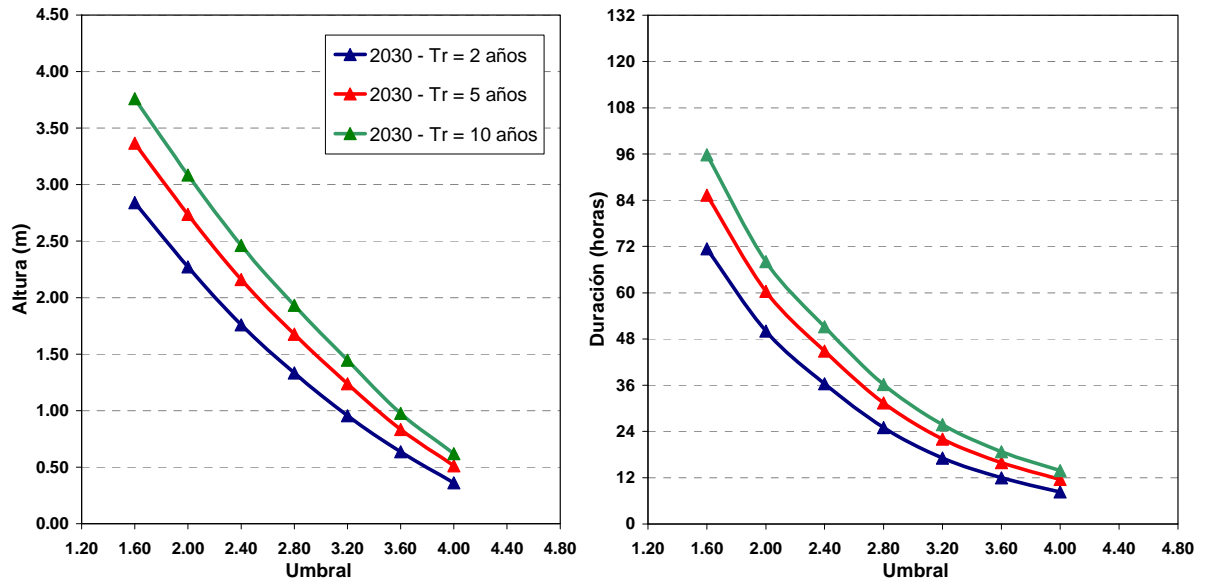
Se desarrolla el análisis estadístico para eventos extremos obteniendo las alturas y duraciones de inundación para las 3 estaciones y los distintos escenarios. En la figura 5.10 se muestra alturas y duraciones extremas para el escenario futuro 2030 para las recurrencias de 2, 5 y 10 años y en la figura 5.11 para el escenario futuro 2070.



a) La Plata

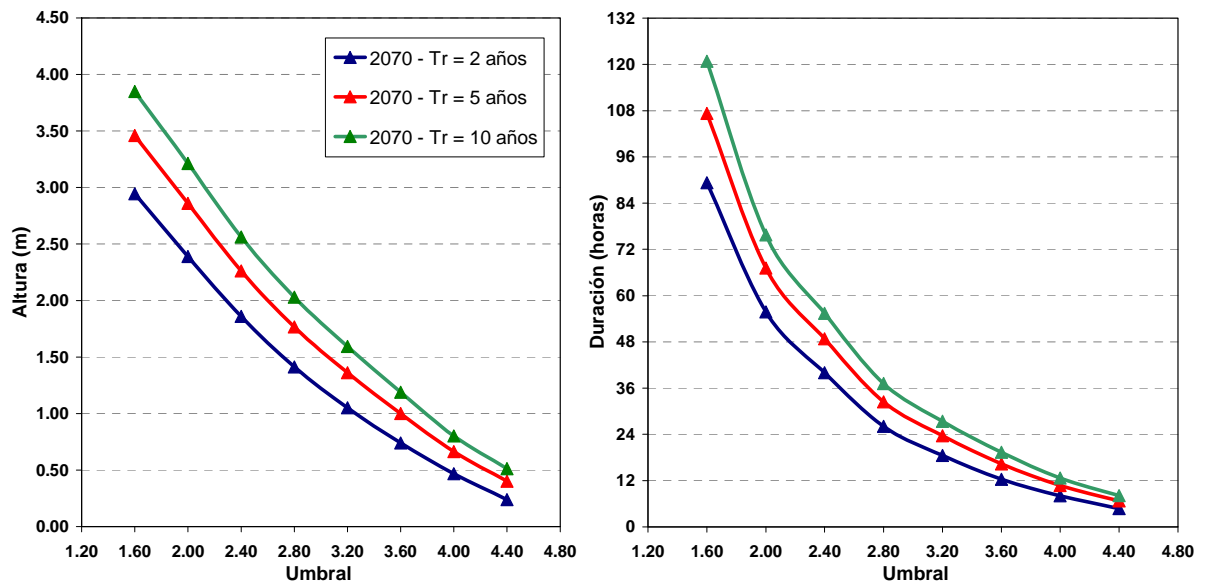


b) Buenos Aires

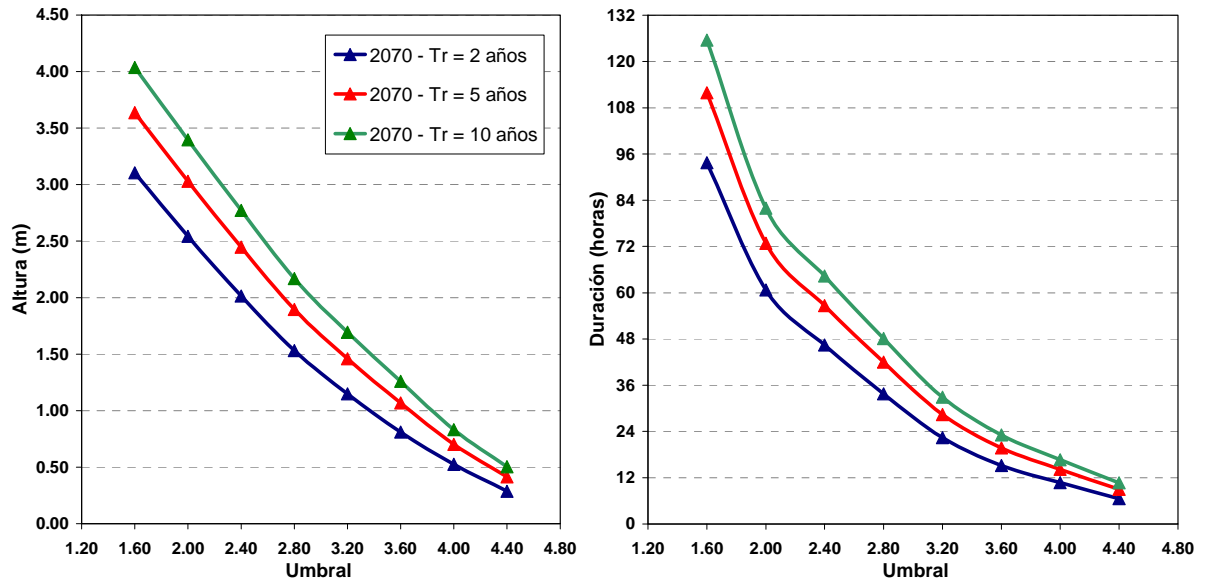


c) Tigre

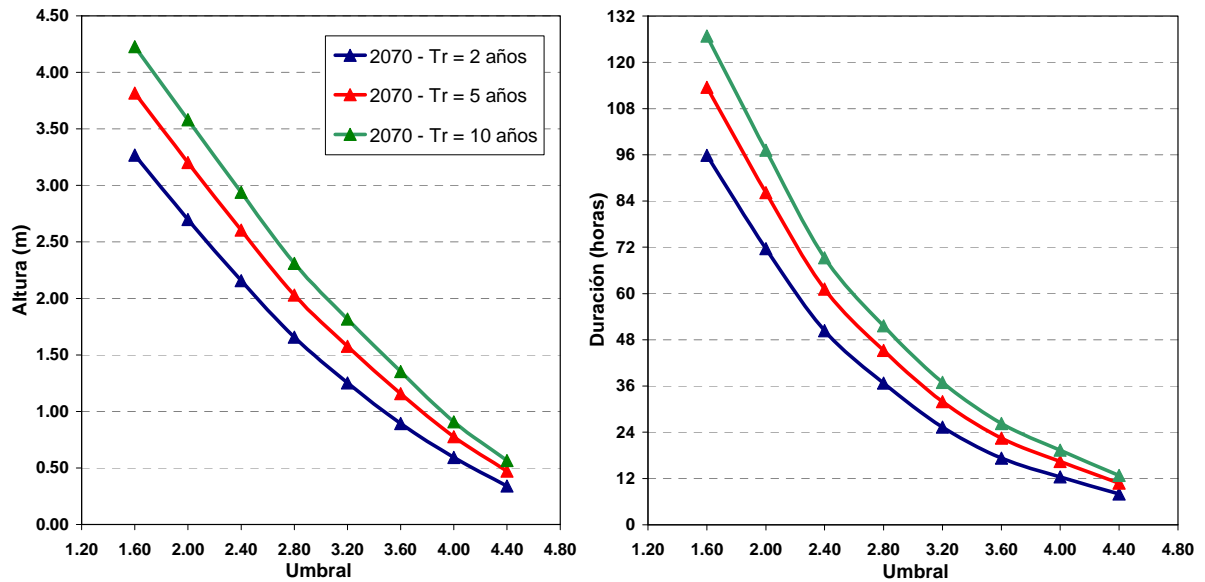
Figura 5.11. Altura y duración de inundación para el escenario 2030



a) La Plata



b) Buenos Aires



c) Tigre

Figura 5.12. Altura y duración de inundación para el escenario 2070

5.2.6. Mapas de Riesgo de Inundación

Se construyen los mapas de riesgo de inundación para los dos escenarios futuros. Las figuras 5.13 contienen las alturas y duraciones para el escenario 2030, y las figuras 5.15 y 5.16 para el escenario 2070, para las recurrencias de 2, 5 y 10 años. Asimismo, se adjuntan las tablas 5.2 y 5.3 para el escenario 2030 y las 5.4 y 5.5 para el escenario 2070. Al igual que en el escenario de línea de base se analizará los resultados para la recurrencia de 10 años.

Para la estación Tigre, las duraciones máximas pasan a tener un valor del orden de los 4 días para el 2030 y 5 días para el 2070, con alturas de inundación de hasta 4.00 m. En las zonas adyacentes al río Reconquista y costa de San Isidro las duraciones máximas son del orden de 48 hs y 60 hs y las alturas de hasta 1.50 m y 2.00 m para el 2030 y 2070 respectivamente.

En las áreas correspondientes a la estación Buenos Aires, el área más afectada corresponde a las áreas lindantes al Matanza – Riachuelo con duraciones máximas del orden de 12 horas para el 2030 y 24 horas para el 2070, y el partido de Avellaneda, con duraciones máximas de 36 hs y 48 hs y alturas de hasta 1.50 m y 2.00 m, para el 2030 y 2070 respectivamente. En el partido de Quilmes las duraciones máximas son de 48 hs y 60 hs y alturas de 2.00 m y 2.50 m para el 2030 y 2070 respectivamente.

En las áreas costeras de la estación La Plata, en el partido de Berazategui, se registran duraciones máximas 48 hs y 60 hs, con alturas de 2.00 m y 2.50 m para el escenario 2030 y 2070. En Ensenada y Berisso predominan las duraciones máximas de 36 y 48hs, con alturas del orden de 1.50 m y 2.00 m para el 2030 y 2070 respectivamente.

De las tablas 5.2 a 5.4 se detalla por cada estación el porcentaje de área inundada según rango de altura y duración para los escenarios futuros de cambio climático para las recurrencias de 2, 5 y 10 años.

<i>Período de Retorno</i>	<i>Estación</i>	<i>Altura (m)</i>							
		<i>0.50</i>	<i>1.00</i>	<i>1.50</i>	<i>2.00</i>	<i>2.50</i>	<i>3.00</i>	<i>3.50</i>	<i>4.00</i>
2 Años	La Plata	16%	38%	29%	13%	4%	-	-	-
	Buenos Aires	40%	35%	13%	8%	2%	1%	-	-
	Tigre	1%	4%	13%	10%	12%	13%	48%	-
5 Años	La Plata	15%	24%	31%	18%	10%	3%	-	-
	Buenos Aires	39%	30%	16%	7%	4%	2%	1%	-
	Tigre	5%	5%	8%	8%	11%	15%	48%	-
10 Años	La Plata	15%	18%	25%	22%	11%	7%	1%	-
	Buenos Aires	44%	26%	14%	8%	5%	3%	1%	1%
	Tigre	6%	4%	6%	8%	8%	11%	15%	43%

Tabla 5.2. Porcentaje de área total inundada por estación para distintos períodos de retorno según rangos de altura - Escenario 2030

Período de Retorno	Estación	Duración (hs)										
		6	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
2 Años	La Plata	9%	28%	42%	13%	7%	1%	-	-	-	-	-
	Buenos Aires	12%	43%	29%	10%	4%	1%	1%	-	-	-	-
	Tigre	1%	4%	13%	10%	12%	13%	48%	-	-	-	-
5 Años	La Plata	12%	17%	37%	22%	8%	4%	-	-	-	-	-
	Buenos Aires	24%	27%	31%	10%	5%	2%	1%	1%	-	-	-
	Tigre	3%	2%	10%	9%	8%	11%	10%	9%	37%	-	-
10 Años	La Plata	14%	14%	31%	26%	8%	6%	2%	-	-	-	-
	Buenos Aires	28%	24%	30%	9%	5%	2%	1%	-	1%	-	-
	Tigre	3%	3%	7%	9%	6%	9%	9%	9%	44%	-	-

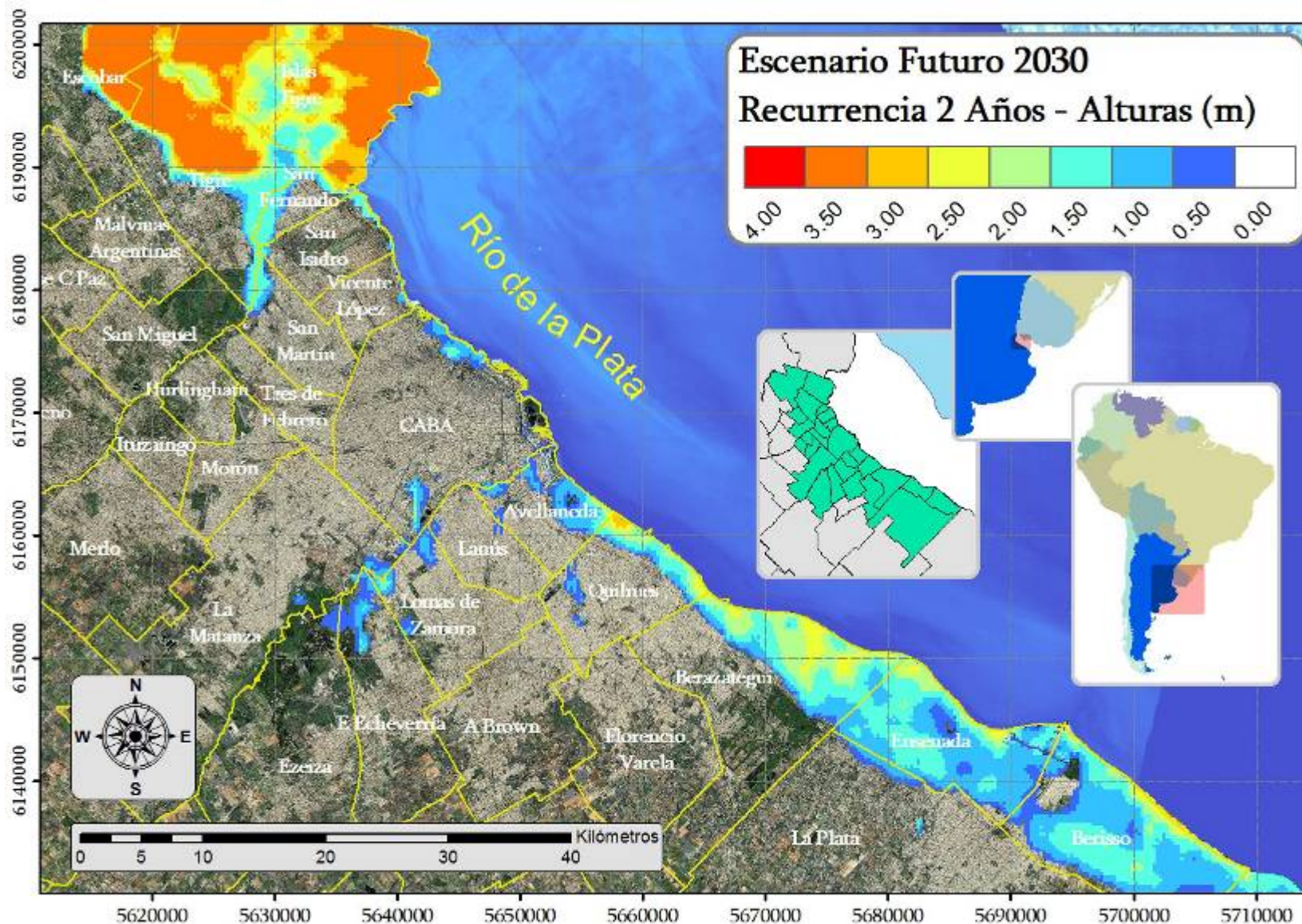
Tabla 5.3. Porcentaje de área total inundada por estación para distintos períodos de retorno según rangos de duración - Escenario 2030

Período de Retorno	Estación	Altura (m)							
		0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00
2 Años	La Plata	14%	26%	31%	17%	10%	2%	-	-
	Buenos Aires	34%	35%	17%	7%	4%	2%	1%	-
	Tigre	4%	5%	9%	8%	12%	17%	45%	-
5 Años	La Plata	11%	19%	24%	24%	12%	8%	2%	-
	Buenos Aires	36%	30%	16%	8%	5%	2%	1%	1%
	Tigre	5%	4%	5%	8%	7%	10%	15%	45%
10 Años	La Plata	12%	17%	17%	24%	15%	8%	6%	1%
	Buenos Aires	39%	26%	15%	10%	4%	3%	2%	1%
	Tigre	5%	4%	4%	7%	7%	7%	10%	56%

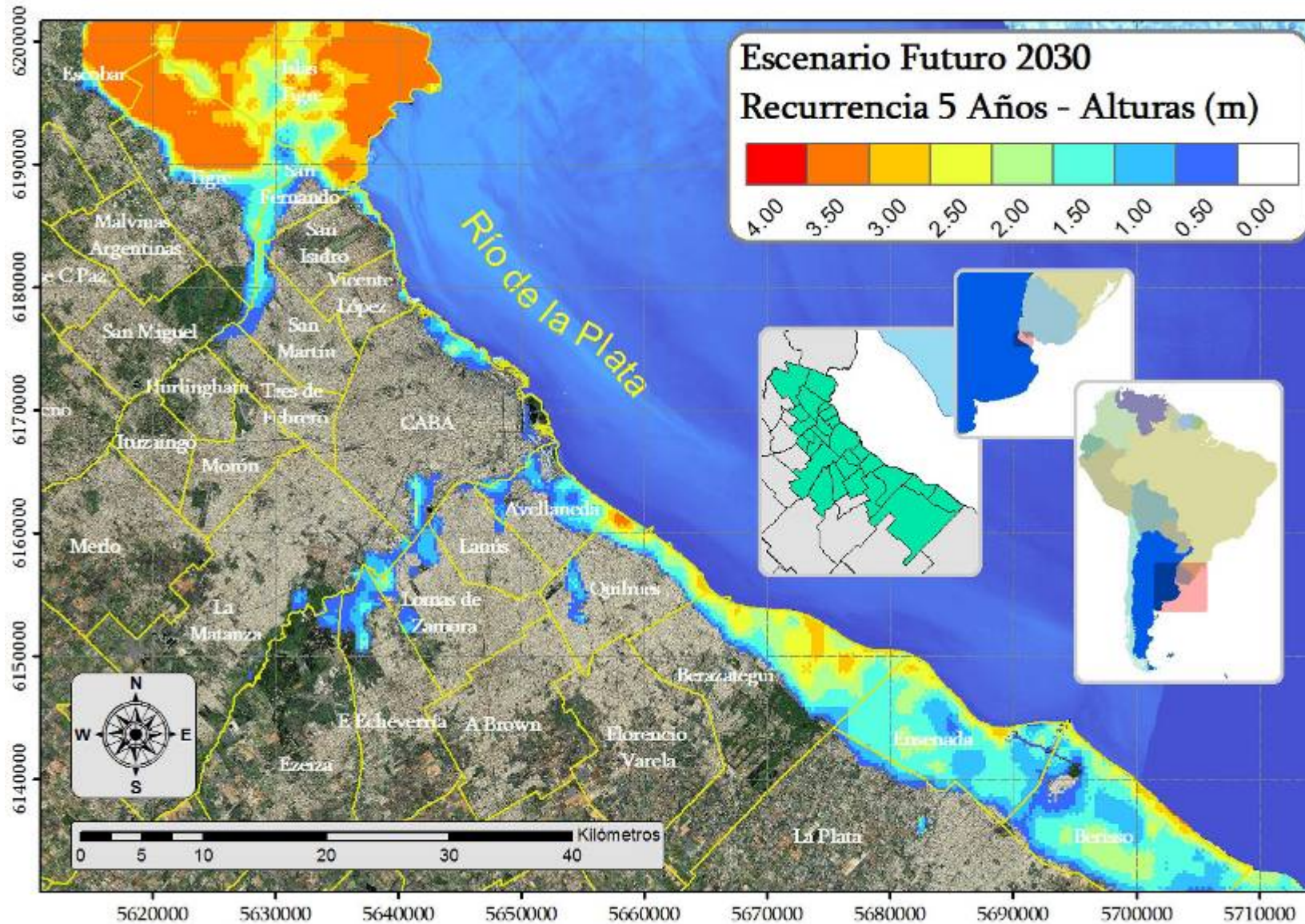
Tabla 5.4. Porcentaje de área total inundada por estación para distintos períodos de retorno según rangos de altura - Escenario 2070

Período de Retorno	Estación	Duración (hs)										
		6	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
2 Años	La Plata	4%	20%	38%	19%	10%	6%	2%	1%	-	-	-
	Buenos Aires	7%	38%	34%	10%	6%	3%	1%	-	1%	-	-
	Tigre	2%	3%	7%	8%	7%	8%	8%	10%	46%	-	-
5 Años	La Plata	6%	16%	27%	25%	12%	7%	5%	2%	1%	-	-
	Buenos Aires	21%	22%	33%	11%	5%	4%	2%	1%	-	-	1%
	Tigre	2%	3%	6%	7%	7%	7%	6%	7%	8%	9%	39%
10 Años	La Plata	9%	12%	22%	27%	12%	8%	5%	3%	1%	1%	-
	Buenos Aires	22%	21%	32%	11%	5%	3%	3%	1%	-	-	1%
	Tigre	2%	3%	5%	5%	6%	5%	6%	6%	6%	7%	47%

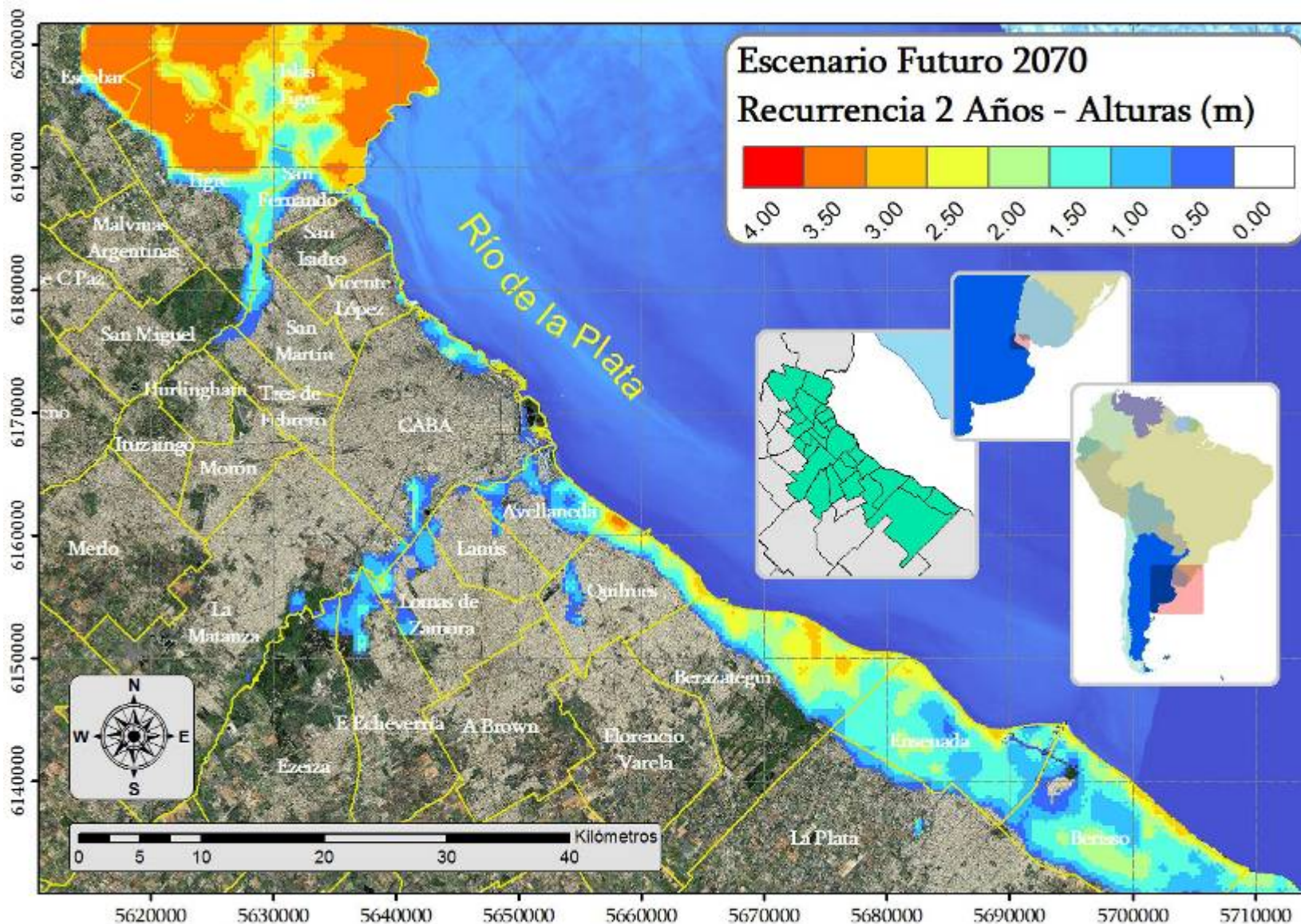
Tabla 5.5. Porcentaje de área total inundada por estación para distintos períodos de retorno según rangos de duración - Escenario 2070



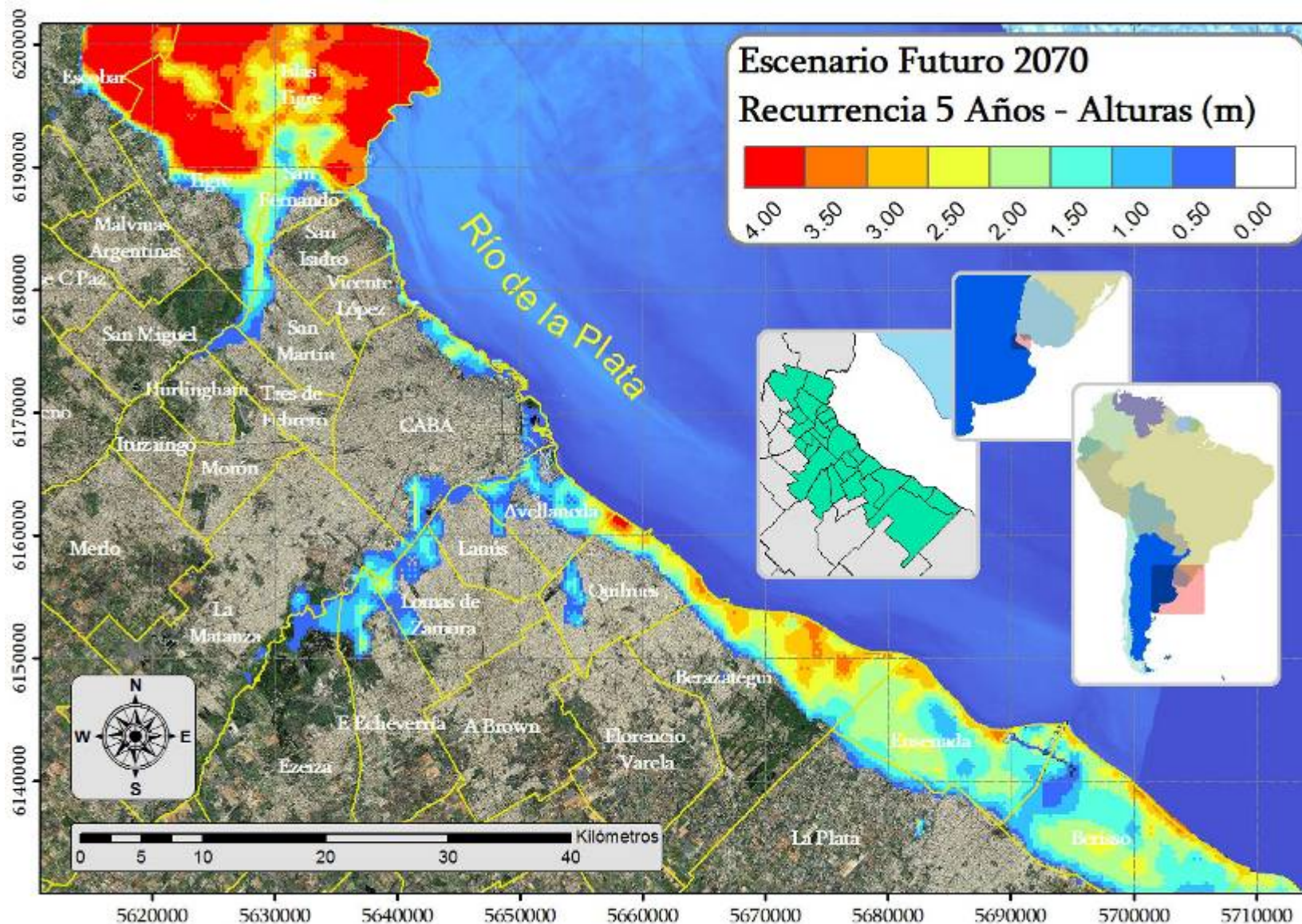
a) Tiempo de Recurrencia: 2 Años



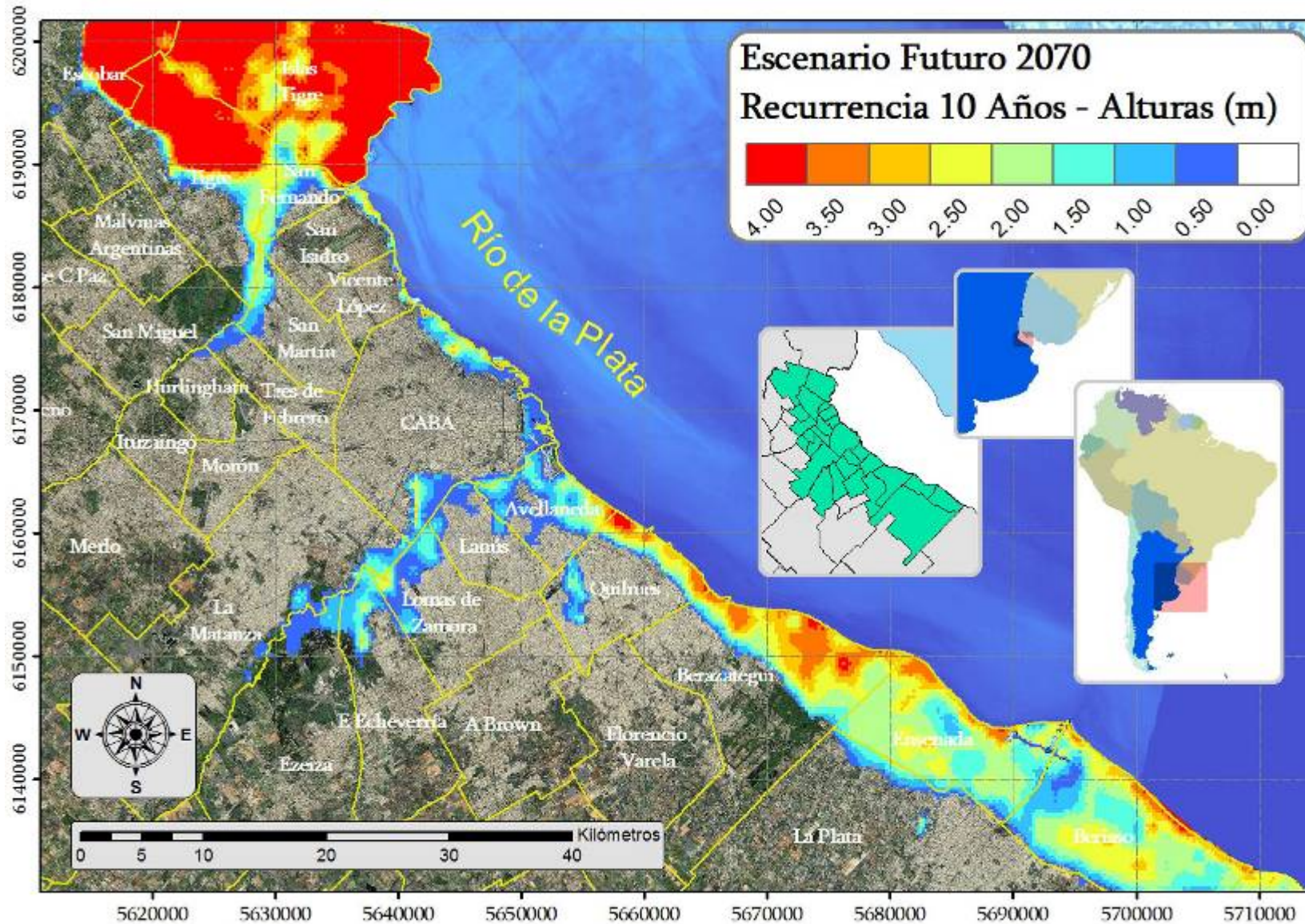
b) Tiempo de Recurrencia: 5 Años



a) Tiempo de Recurrencia: 2 Años

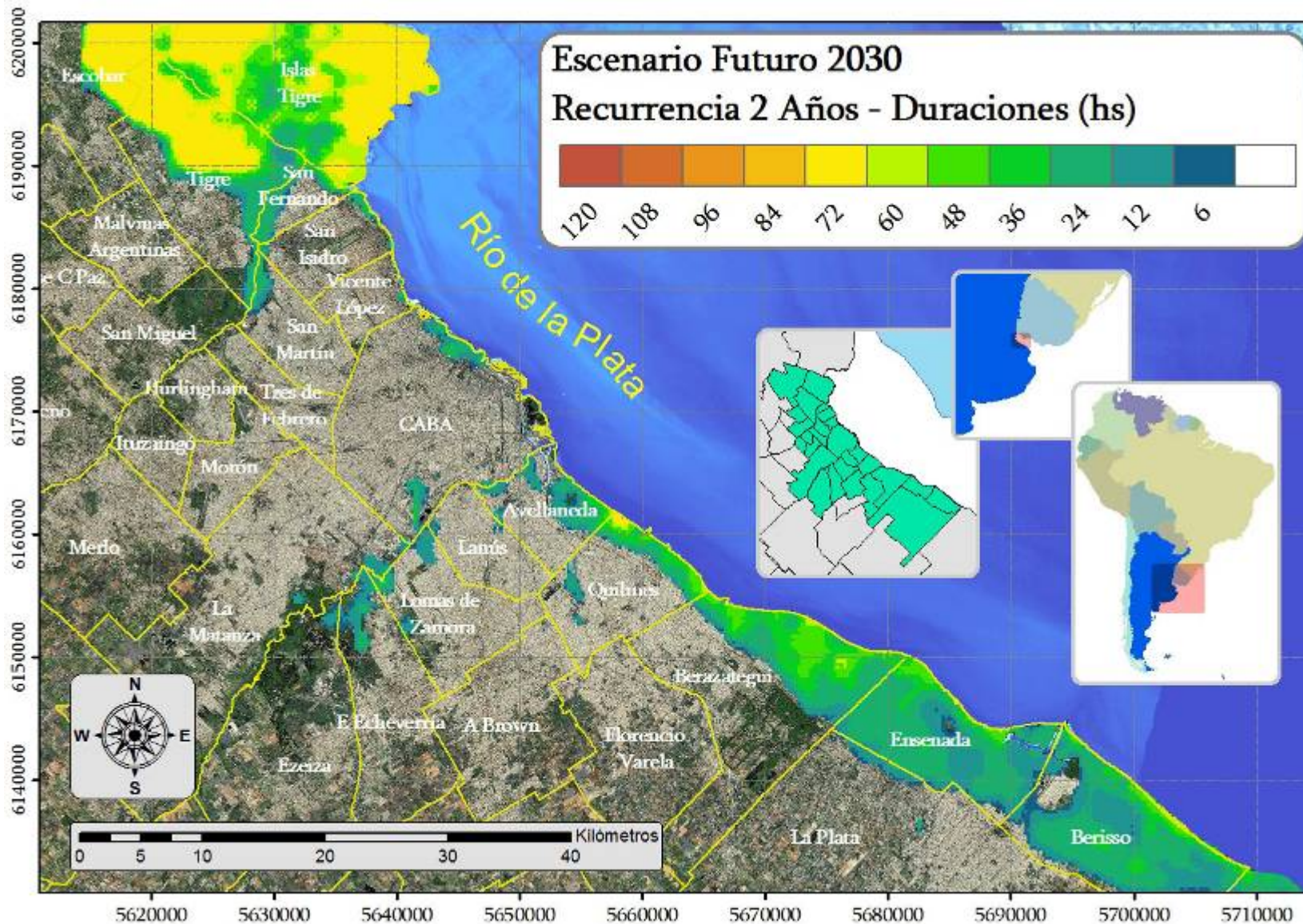


b) Tiempo de Recurrencia: 5 Años

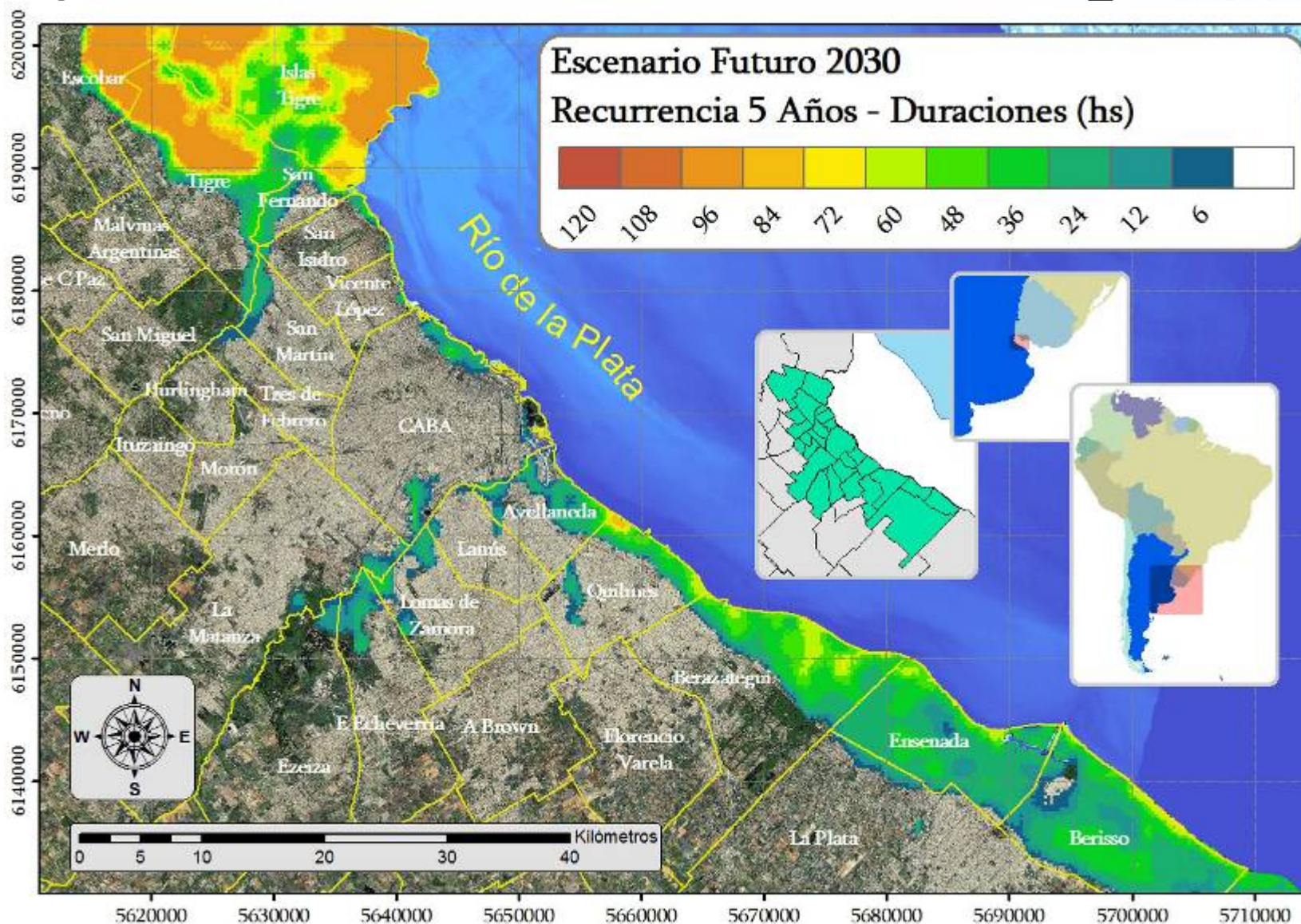


c) Tiempo de Recurrencia: 10 Años

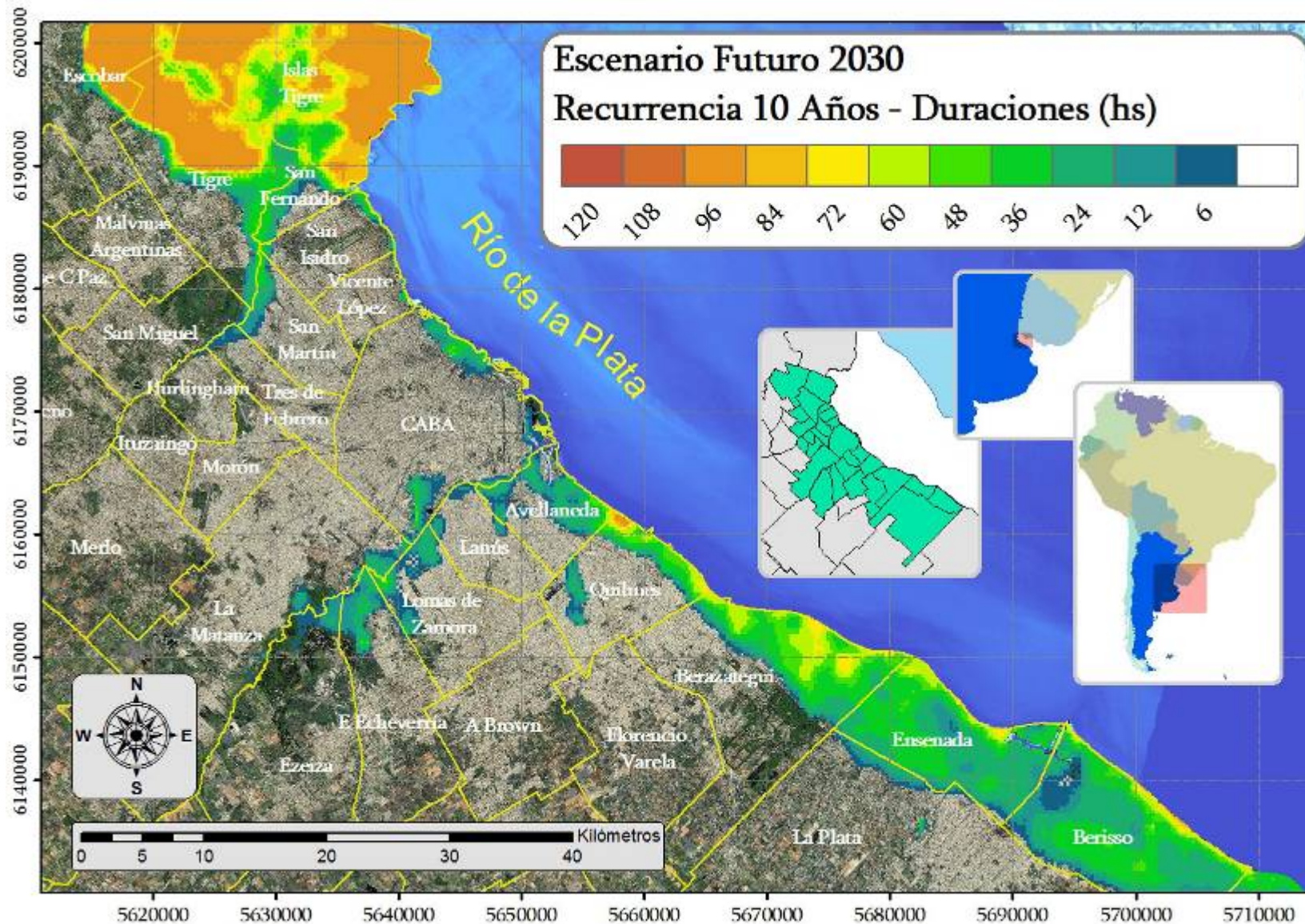
Figura 5.14. Mapas de Riesgo de Inundación – Escenario Futuro 2070 - Alturas (m)



a) Tiempo de Recurrencia: 2 Años

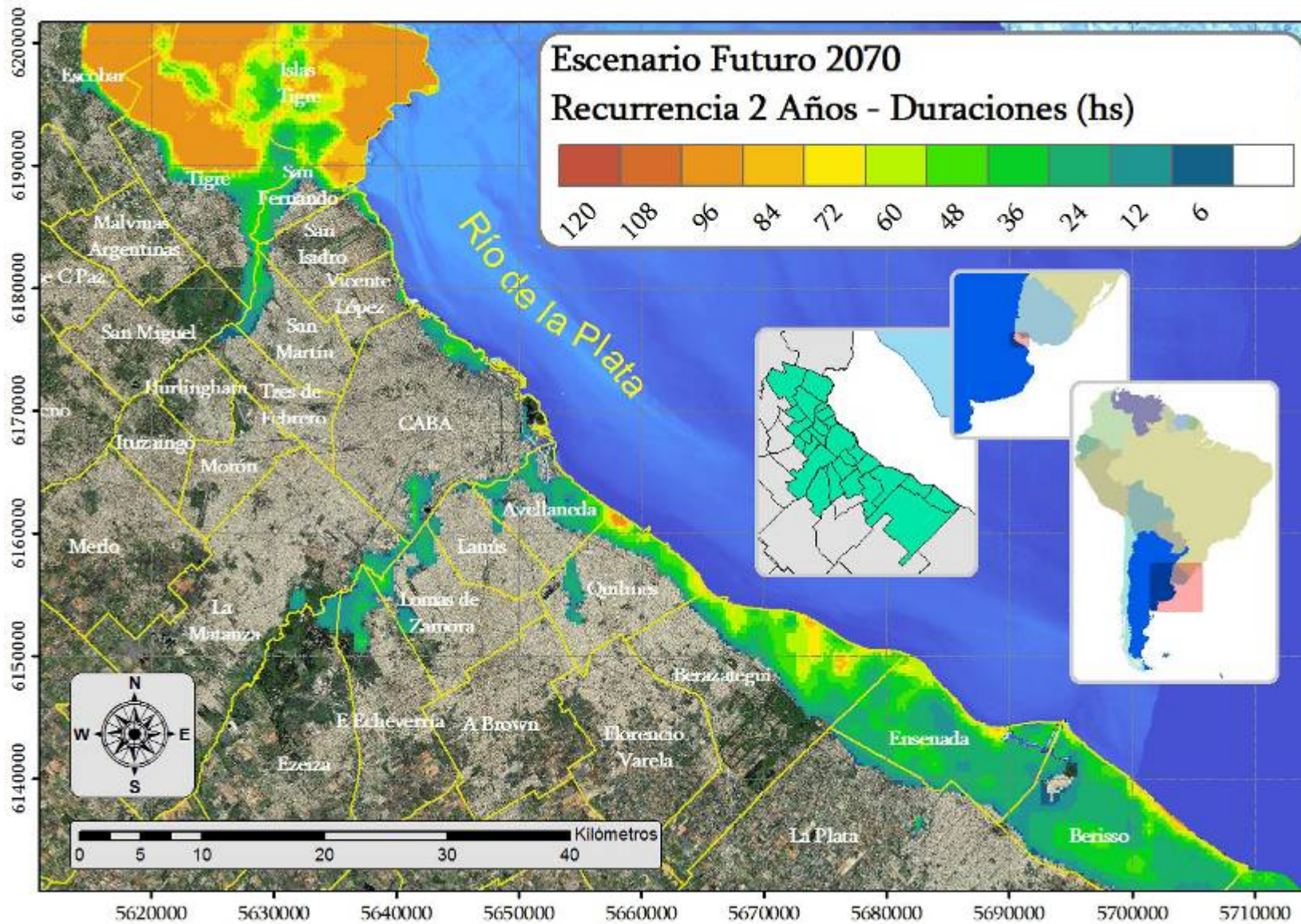


b) Tiempo de Recurrencia: 5 Años

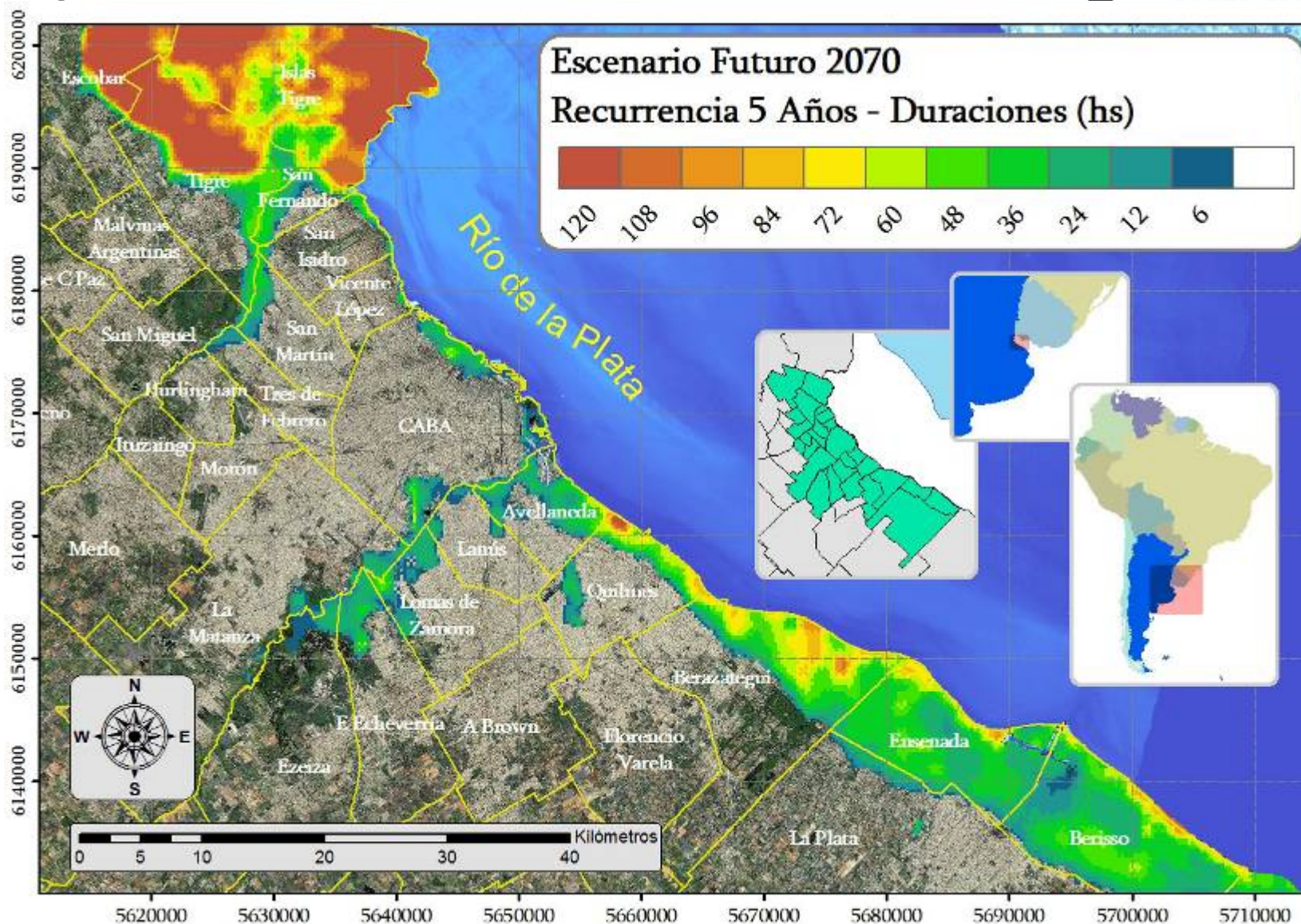


c) Tiempo de Recurrencia: 10 Años

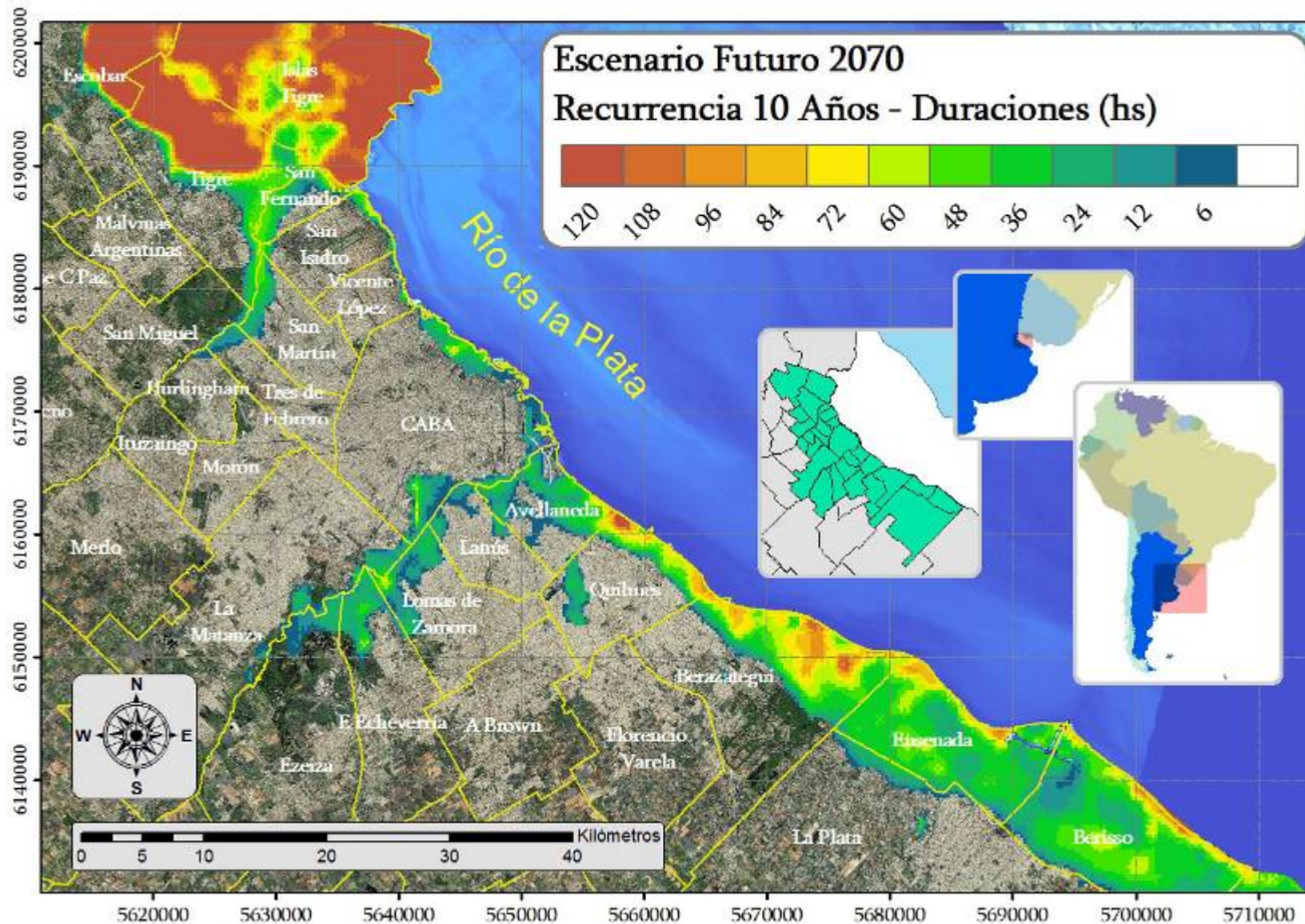
Figura 5.15. Mapas de Riesgo de Inundación – Escenario Futuro 2030 - Duraciones (hs)



a) Tiempo de Recurrencia: 2 Años



b) Tiempo de Recurrencia: 5 Años



c) Tiempo de Recurrencia: 10 Años

Figura 5.16. Mapas de Riesgo de Inundación – Escenario Futuro 2070 - Duraciones (hs)

En la figura 5.17 se observa las áreas inundadas superpuestas para los distintos escenarios considerando un tiempo de recurrencia de 10 años.

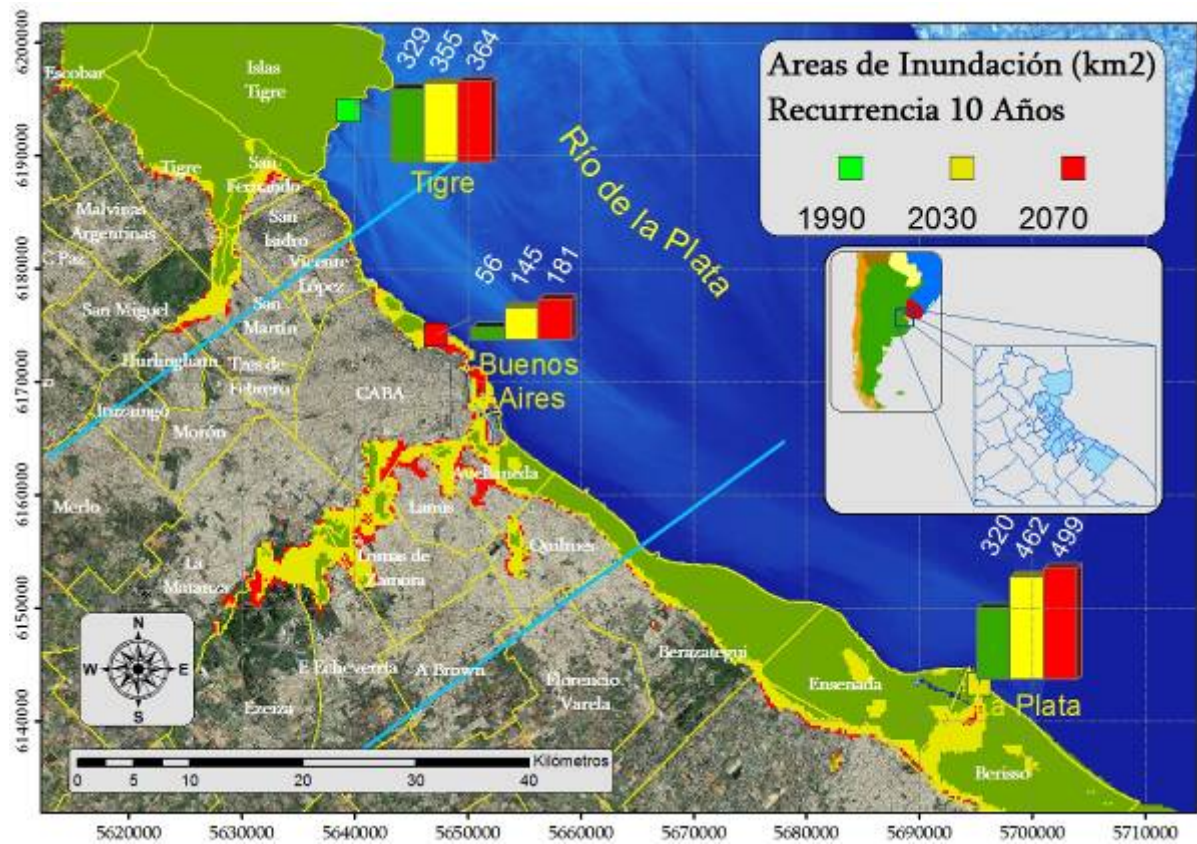


Figura 5.17. Mapas de Riesgo de Inundación - Alturas

El mayor incremento areal por inundaciones se produce en el escenario futuro del 2030, en donde se produce un incremento del orden del 37 % respecto del escenario de línea de base. Las áreas inundadas corresponden a grandes extensiones de la estación Buenos Aires (parte baja de la cuenca Matanza - Riachuelo) y a la estación de La Plata (áreas de Berisso y Ensenada). El aumento total del área de inundación para el escenario futuro 2070 es del 48 % respecto del escenario base. En la figura 5.18 se presentan las áreas inundadas para las 3 estaciones y los diferentes escenarios con las distintas recurrencias.

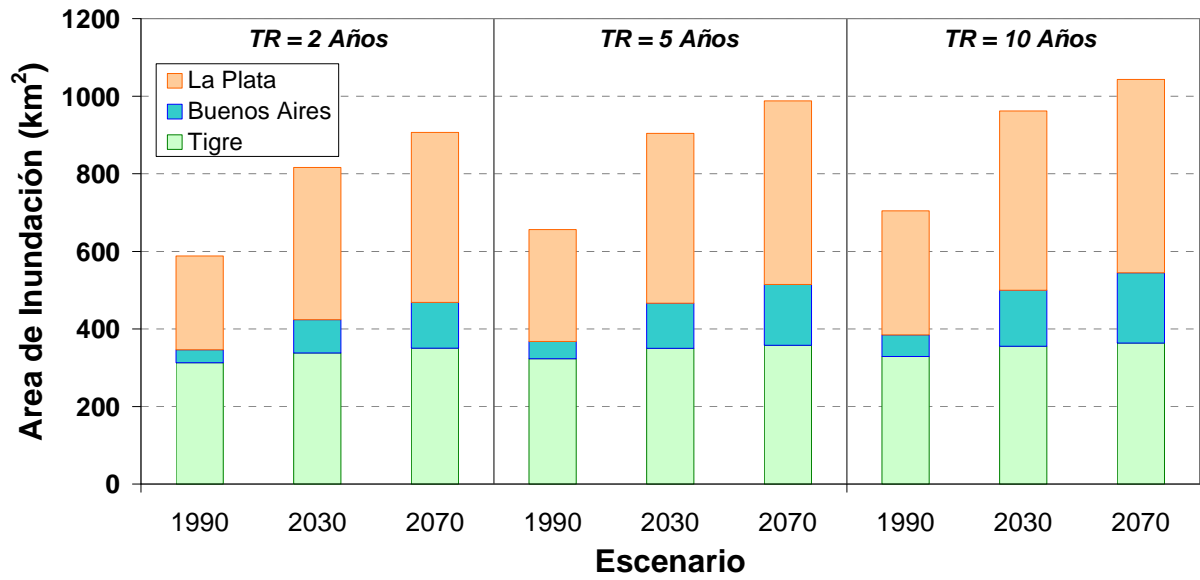


Figura 5.18. Áreas de inundación para distintas recurrencias y escenarios

6. CONCLUSIONES

Se presentan las conclusiones del trabajo, en primer lugar en relación a la metodología, y en segundo lugar en cuanto a los resultados obtenidos con su aplicación. También se indican posibles mejoras.

Metodología:

- Se ha planteado e implementado una metodología original para la construcción de mapas de riesgo de inundación de la Región Metropolitana de Buenos Aires por crecidas del Río de la Plata, que permite considerar simultáneamente la altura máxima y la duración de las mismas. La metodología está basada en una previa que sólo determinaba el riesgo de alcanzar alturas máximas de inundación. Estos mapas proveen una información muy útil para la toma de decisión en cuanto a la gestión del riesgo.
- No sólo se han construido mapas de riesgo de inundación para las condiciones climáticas actuales, sino también para posibles escenarios futuros, dentro del contexto del Cambio Climático.
- Los mapas de riesgo de inundación se construyen en base a resultados obtenidos de simulaciones numéricas hidrodinámicas continuas sobre una ventana de tiempo de una década. Esto constituye una mejora sensible sobre la metodología anterior, que se basaba en la simulación de eventos extremos.
- El modelo hidrodinámico disponible logra reproducir satisfactoriamente estadísticas de niveles del Río de la Plata en la estación de la ciudad de Buenos Aires.
- El paso temporal de la serie de datos de vientos regionales utilizada para forzar el modelo hidrodinámico, influye significativamente en la capacidad del modelo de poder representar con precisión adecuada la estadística de duraciones de las crecidas. Con el menor paso disponible, de 6 horas, se hace necesario introducir un ajuste heurístico de los resultados para obtener una representación adecuada.

Resultados:

Riesgo Actual:

- Las áreas más vulnerables, en cuanto a inundaciones de recurrencia intranual, son la zona oeste de Escobar y zona norte de Tigre (incluyendo islas), con duraciones medias anuales de entre 4 y 8 semanas, seguida por las zonas costeras de Berazategui y Quilmes, con duraciones medias anuales de entre 1 y 2 semanas. El área afectada por este tipo de inundaciones es del orden de los 350 km².
- En cuanto a las recurrencias interanuales, considerando un período de retorno de 10 años, se obtienen duraciones máximas del orden de los 3 días para la zona oeste de Escobar y zona norte de Tigre (incluyendo islas), 2 días para las zonas de Quilmes y Berazategui, y 1 día para las zonas de Ensenada y Berisso. El área afectada es de 700 km², es decir, prácticamente el doble de la asociada a inundaciones intranuales.

Riesgo Futuro:

- Para los escenarios de Cambio Climático considerados se predicen incrementos considerables de las áreas y duración de las inundaciones.
- En el caso de inundaciones de recurrencia intranual, se produce un incremento de las duraciones medias anuales de entre 12 y 16 semanas para el 2030 y de entre 16 y 20 semanas para el 2070, en la zona oeste de Escobar y zona norte de Tigre (incluyendo islas); entre 2 y 4 semanas para el 2030 y entre 4 y 8 semanas para el 2070 en las zonas costeras de Berazategui y Quilmes; y entre 1 y 2 semanas para el 2030 y entre 2 y 4 semanas para el 2070 en la zona de Ensenada y Berisso.
- Para las inundaciones de recurrencia intranual, las áreas vulnerables alcanzan 450 km² para el 2030 y 650 km² para el 2070, lo que representan aumentos del 41 % y 82 %, respectivamente, respecto de las áreas originales. El mayor incremento tiene lugar en los partidos de Berazategui, Ensenada y Berisso.
- En el caso de inundaciones de recurrencias interanuales, considerando un período de retorno de 10 años, para el escenario 2030 se obtienen duraciones máximas del orden de los 4 días y para el 2070 del orden de los 5 días en la zona oeste de Escobar y zona norte de Tigre (incluyendo islas), 2 días para el 2030 y 3 días para el 2070 en las zonas de Quilmes y Berazategui, 36 horas para el 2030 y 2 días para las zonas de Ensenada y Berisso, y 12 horas para el 2030 y 1 día para el 2070 en la zona lindante al Matanza - Riachuelo y noroeste de la Capital Federal.
- Para las inundaciones de 10 años de recurrencia se produce un aumento del área inundada del 37% para el 2030 y del 48% para el 2070. El mayor incremento de área corresponde a las zonas bajas de la cuenca Matanza - Riachuelo.

Mejoras posibles:

- Actualizar la línea de base a la década 2000 - 2009.
- Mejorar la precisión de la información topográfica.
- Implementar un sistema de información 'online' para consultar los mapas de riesgo de inundación a través de Internet.
- Actualizar el modelo hidrodinámico para tratar de mejorar la precisión de las estimaciones de nivel en la ciudad de Buenos Aires.

7. REFERENCIAS

- Abbott, M.**, 1979. Computational hydraulics, Pitman, Boston.
- Balay, M.A.**, 1961. El Río de la Plata entre la atmósfera y el mar, Publicación H 621, Servicio de Hidrografía Naval, 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.
- Camilloni et all**, 2005. Escenarios climáticos del siglo XXI: Influencia en los caudales de la Cuenca del Plata. IV Taller Internacional sobre Enfoques Regionales para el Desarrollo y Gestión de Embalses en la Cuenca del Plata, 22-25 de Noviembre, Salto Grande, Argentina.
- 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.
- Castañeda y Barros**, 1994 Castañeda, M.E. and Barros, V.R., 1994. Las tendencias de la precipitación en el cono sur de América al este de los Andes. Meteorológica, 49: 23-32.
- Chow, V. T.**, 1964. Handbook of Applied Hydrology, Mc Graw - Hill, New York.
- Costa y otros**, 1998. Las inundaciones en el área metropolitana de Buenos Aires. Medio ambiente y urbanización. N°23
- Cunnane, C.**, 1978. Unbiased plotted positions – a review, Journal of Hydrology, vol. 37, p. 205 - 222
- 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.
- Escobar, G., Vargas, W.M., Bischoff, S.**, 2004. Wind tides in the Rio de la Plata estuary: meteorological conditions, Intenational Journal of Climatology, 24, 1159–1169.

- Gringorten, I.I.**, 1963. A plotting rule for extreme probability paper, *Journal of Geophysical Research*, vol. 68, N°3, p. 813 - 814
- Gumbel, E.J.**, 1960. Multivariate extremal distributions. *Bull Int Stat Inst*; 39 (2): 471 - 475.
- Gumbel, E.J., Mustafi, C.K.**, 1967. Some analytical properties of bivariate extreme distributions, *Journal of the American Statistical Association*, vol. 62, p. 569 – 588
- 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.
- IPCC**, 2007a. *Cambio Climático 2007: La base científica*, Contribución del Grupo de trabajo I al Cuarto informe de evaluación del IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- IPCC**, 2007b. *Cambio Climático 2001: Impactos, adaptación y vulnerabilidad*, Contribución del Grupo de trabajo II al Cuarto 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.
- Menéndez, A.N., Norcini, R.**, 1982. Spectrum of shallow water waves: an analysis, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 108 (HY1), january.
- 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).

- Re, M., Menéndez, A.N.**, 2005 Impacto del Cambio Climático Global en las Costas del Río de la Plata. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales.
- 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.
- Yue, S.**, 2001. The Gumbel logistic model for representing a multivariate storm event, *Advances in Water Resources*, vol. 24, p. 179 - 185
- Whitham, G.B.**, 1974. *Linear and nonlinear waves*, Interscience, New York.