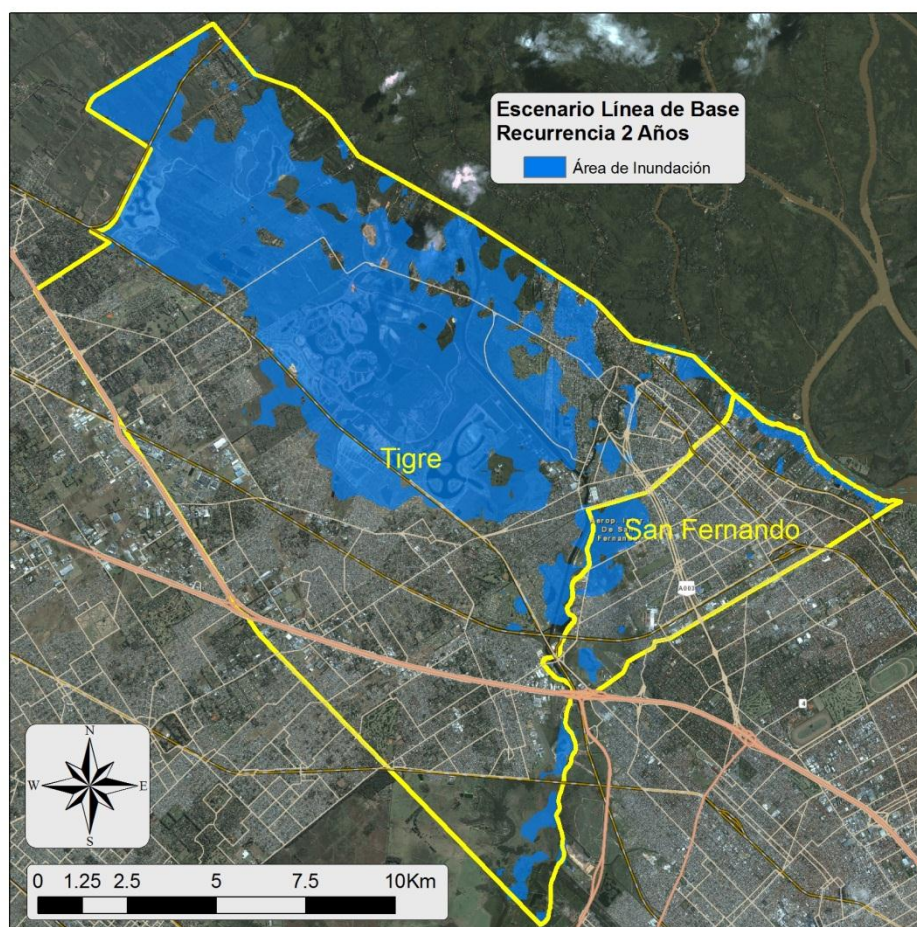




MAPAS DE RIESGO DE INUNDACIÓN PARA CIUDADES COSTERAS DEL RÍO DE LA PLATA



Angel N. MENÉNDEZ & Emilio A. LECERTÚA

Noviembre 2012

RESUMEN

Se presentan mapas de riesgo de inundación para cuatro localidades costeras del Río de la Plata: San Fernando y Tigre, sobre la margen argentina, y Carmelo y Juan Lacaze, sobre la margen uruguaya. Incluyen mapas de niveles de inundación, de altura de inundación, y de duración de inundación. Se presentan mapas para un Escenario de Línea de Base y para un Escenario Futuro. Para cada escenario, se muestran mapas para períodos de retorno de 2 y 10 años. Se describen los resultados, se indican sus limitaciones en cuanto a alcance y precisión, y se recomiendan acciones para alcanzar versiones más precisas.

INDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	METODOLOGÍA DE ESTUDIO.....	4
2.1	Modelo hidrodinámico.....	4
2.2	Análisis estadístico	6
2.3	Construcción de mapas.....	8
3	MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN.....	9
3.1	Base de datos	9
3.2	Procesamiento	10
4	RESULTADOS.....	21
4.1	Productos del estudio	21
4.2	Tigre y San Fernando	22
4.3	Juan Lacaze	35
4.4	Carmelo	48
5	CONCLUSIONES	61
	REFERENCIAS	63

1 INTRODUCCIÓN

Una parte significativa de la zona costera del Río de la Plata está sujeta a inundaciones periódicas por efecto del incremento de nivel del río. Este incremento está asociado a las Sudestadas, que son tormentas con fuertes vientos preponderantes de la dirección sudeste, los cuales inducen la formación de una onda de crecida que penetra por la boca del Río de la Plata y se traslada aguas arriba, ingresando en todos los tributarios, tanto pequeños, como medianos (por ejemplo, ríos Matanza-Riachuelo y Reconquista, del lado argentino) y grandes (por ejemplo, ríos Paraná de las Palmas, Paraná Guazú y Uruguay).

La caracterización estadística de la ocurrencia de estas inundaciones, y su eventual modificación bajo los efectos del Cambio Climático, constituye la forma de cuantificar el riesgo asociado, aportando así elementos para la gestión.

Para efectuar un análisis estadístico de las inundaciones es necesario contar con una serie temporal de niveles del río que se extienda durante una ventana de tiempo lo suficientemente larga. Donde existe una estación de registro de niveles, estos datos pueden ser usados directamente para el análisis. Pero para poder generalizar el análisis a cualquier lugar de la zona costera, o para hacer proyecciones a futuro incluso en zonas donde existen estaciones, se debe recurrir a la simulación numérica hidrodinámica, es decir, se debe utilizar un modelo matemático del río capaz de reproducir la evolución del nivel (y las velocidades de corriente) para distintas situaciones hidrometeorológicas, incluyendo períodos de calma y de tormenta.

El objetivo de este trabajo es producir mapas de riesgo de inundación para cuatro localidades costeras del Río de la Plata: San Fernando y Tigre, sobre la margen argentina, y Carmelo y Juan Lacaze, sobre la margen uruguaya (Figura 1.1). Para todas ellas las series temporales de nivel deben determinarse en base a la simulación numérica.



Figura 1.1. Ubicación de las localidades de análisis.

En este trabajo se utiliza el modelo hidrodinámico RPP2D como la herramienta para producir series temporales de niveles en las cuatro localidades sobre ventanas de tiempo decadales. Este modelo fue desarrollado dentro de un proyecto de investigación sobre la influencia del Cambio Climático sobre todo el Río de la Plata. Por un lado, se toma como línea de base la correspondiente a la década de 1990, que fue la utilizada para validar el modelo. Por el otro, se toma como proyección a la década de 2030, considerando para ella el escenario de Cambio Climático planteado en ese proyecto de investigación. Luego se efectúa un análisis estadístico bivariado para determinar la probabilidad de alcanzar distintos niveles y duraciones de la onda de crecida, es decir, distintas alturas y duraciones de las inundaciones. En base a ellos se construyen mapas de inundación en términos del nivel pico alcanzado y de la distribución de duraciones. Los mapas de niveles de inundación son además combinados con un MDE (modelo digital de elevación) del terreno, para cada localidad, obteniéndose los mapas de altura de inundación.

Las lluvias torrenciales que precipitan sobre la parte continental también pueden provocar inundaciones en la zona costera, que es donde se produce la descarga desde las cuencas sometidas a esas tormentas. Este fenómeno, cuya oportunidad de ocurrencia correlaciona muy débilmente con las Sudestadas, no es considerado en este estudio.

La organización del informe es como sigue. En el capítulo 2 se describe sintéticamente la metodología de estudio (modelo hidrodinámico, análisis estadístico y construcción de mapas de inundación); más detalles se presentan en Lecertúa (2010). En el capítulo 3 se explica la construcción del MDE (modelo digital de elevación) del terreno a partir de las bases de datos globales disponibles. En el capítulo 4 se presentan y discuten los resultados obtenidos. Las conclusiones del estudio se desarrollan en el capítulo 5.

Es necesario explicitar las limitaciones de los resultados presentados en este Informe. En primer lugar, las ligadas al área inundada: el modelo no tiene en cuenta la existencia de eventuales zonas ‘polderizadas’, es decir, defendidas de la inundación mediante terraplenes. De existir, ellas deberían ser explícitamente excluidas.

En segundo, respecto a la precisión de los mapas de altura de inundación, ligados a la precisión del MDE:

- El MDE utilizado en las cuatro localidades surgió de observaciones satelitales de acceso público. Si bien se analizaron alternativas de MDE, seleccionándose la que mejor ajustaba a datos topográficos del IGN para la zona de mayor elevación de la localidad de Tigre (Argentina) – tal como se explica en el capítulo 3 –, no se encaró una tarea de ajuste a datos topográficos locales en las zonas de inundación, lo cual se considera muy recomendable.
- Los datos del MDE satelital están provistos redondeados al metro, lo cual introduce un umbral de error considerable.
- La escala de resolución del MDE utilizado es de 270 metros (ver capítulo 3), con lo cual no tiene capacidad para resolver zonas de extensiones menores a ese límite. En particular, los contornos costeros que surgen de los resultados del modelo pueden mostrar desajustes con la línea de costa local.

A pesar de las imprecisiones asociadas, los mapas de altura de inundación para el escenario de la línea de base se consideran representativos a escala de cada localidad.

En tercer lugar, respecto del escenario de Cambio Climático utilizado:

- Se trata de un escenario conservativo, tanto en lo que respecta a la elevación del nivel medio del mar, como a la variación del patrón de vientos.
- Para la elevación del nivel medio del mar está considerado prácticamente el aumento máximo que surgía de las proyecciones.
- El patrón de vientos es el obtenido explotando el Modelo de Circulación General Hadley para el escenario socioeconómico A2 del IPCC (evolución sin cambios significativos en el patrón de comportamiento actual relativo a emisiones de gases de efecto invernadero), que indica un desplazamiento hacia el sur del anticiclón del Atlántico Sur, lo cual induce una mayor penetración de vientos desde el Este, que también contribuye a un incremento del nivel del Río de la Plata.

Los mapas de inundación para el escenario futuro se consideran, entonces, indicativos de tendencias y orden de magnitud de los cambios, aunque resultaría recomendable encarar proyecciones con escenarios menos exigentes.

2 METODOLOGÍA DE ESTUDIO

2.1 Modelo hidrodinámico

Para la simulación de niveles de agua en el Río de la Plata se dispuso del modelo hidrodinámico bidimensional en el plano horizontal RPP-2D (Re y Menéndez, 2003, 2007), cuyo dominio incluye al Río de la Plata y a su Frente Marítimo de modo de poder simular, además de las ondas de marea astronómica, la generación de ondas de tormenta (Figura 2.1.1). El software de base utilizado fue el HIDROBID II (Menéndez, 1990), que resuelve numéricamente las ecuaciones hidrodinámicas para aguas poco profundas. La descarga de los tributarios principales considerados (Uruguay y Paraná, a través de dos de sus brazos principales: Paraná de las Palmas y Paraná Guazú-Bravo) se impone como una condición de borde. El modelo consta de tres bordes oceánicos que constituyen contornos matemáticos: i) Borde Este (contorno impenetrable), ii) Borde Norte (contorno no reflejante), iii) Borde Sur, donde se impone la onda de marea astronómica. La información de campos de vientos utilizada corresponde a las series de reanálisis de NCEP/NCAR, discretizados temporalmente cada 6 horas.

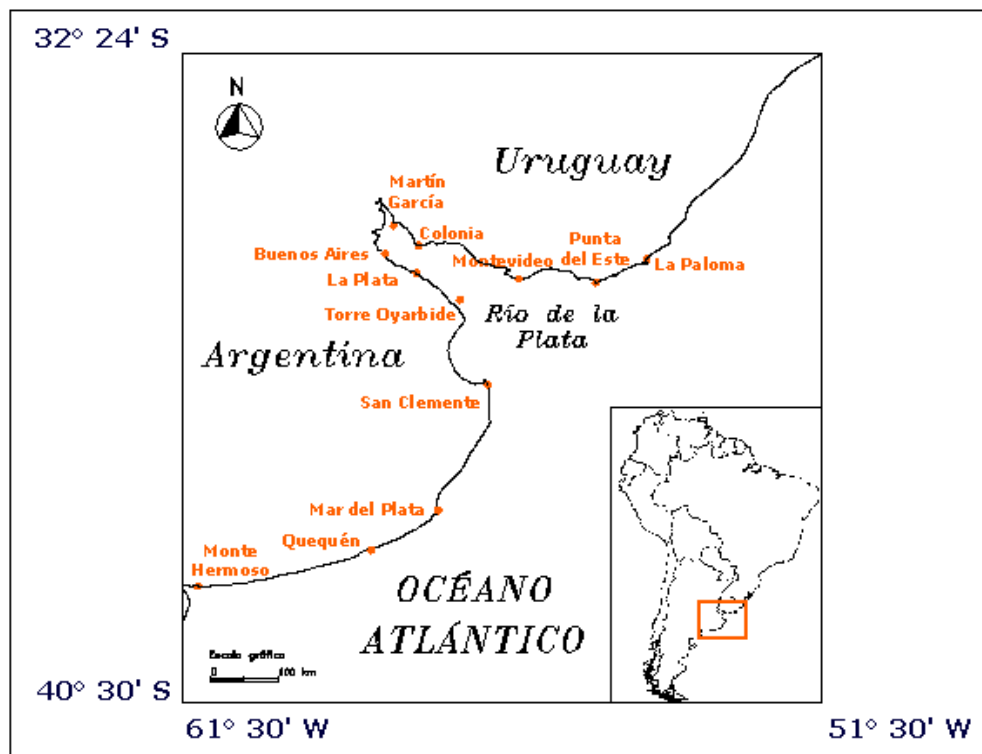


Figura 2.1.1. Dominio de cálculo del modelo RPP-2D.

La calibración del modelo hidrodinámico RPP-2D se desarrolló en varias etapas en base al criterio de discriminar efectos, permitiendo así una validación y ajuste progresivo. Específicamente, se trabajó con cuatro escenarios de calibración: Escenario de Marea Astronómica Predicha, con referencia en los niveles de agua predichos por las Tablas de Mareas; Escenario de Marea Astronómica Registrada, con niveles de agua observados en un período de relativa calma; Escenario de Marea Normal, con niveles de agua y velocidades de corrientes registradas durante intervalos de tiempo en los que se incluyen efectos de viento sin la presencia de tormentas; Escenario de Tormenta, con niveles de agua en períodos en los que se desarrollan eventos de tormentas significativos. A título ilustrativo, en la Figura 2.1.2 se muestra la comparación entre marea predicha de tablas y simulada con el modelo para la localidad de Colonia.

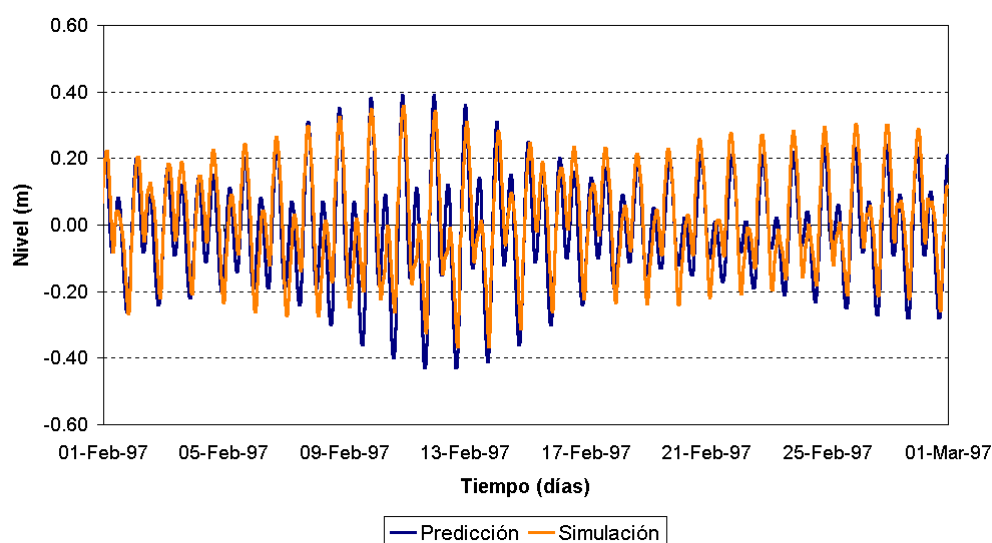


Figura 2.1.2. Comparación entre marea predicha de tablas y simulada con el modelo RPP-2D para Colonia.

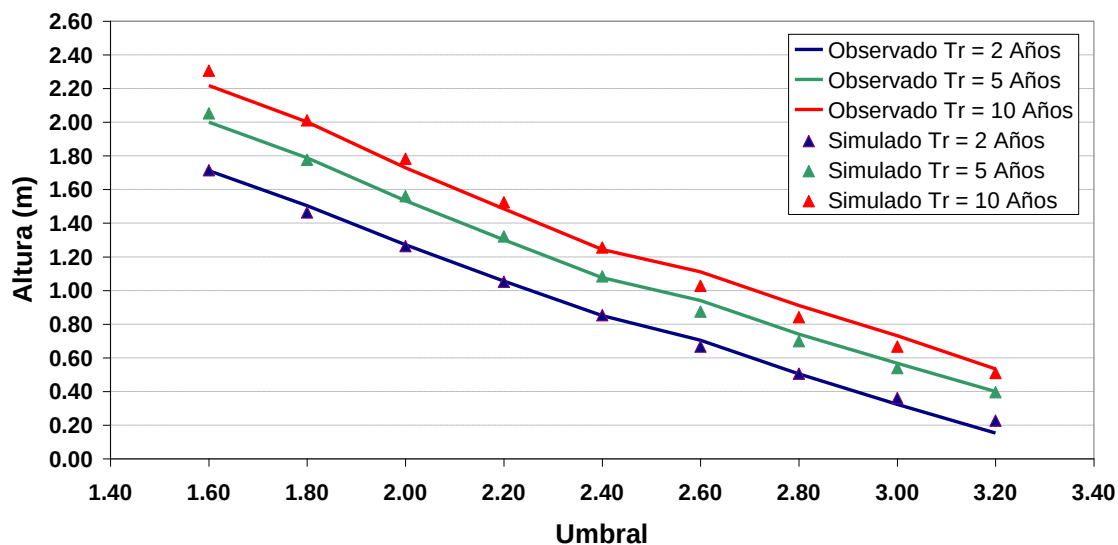
2.2 Análisis estadístico

Para identificar eventos de inundación y caracterizar estadísticamente su duración y frecuencia de ocurrencia, se establecen diferentes umbrales de nivel relacionados con la cota topográfica del terreno. El umbral mínimo considerado es 1,60 m MOP (1,04 m IGM), consistente con el HAT (*High Astronomical Tide*) de Buenos Aires (Fiore et al., 2001); desde allí los valores umbral aumentan con un paso de 0,20 m. Para analizar la frecuencia de ocurrencia de duraciones, los eventos se agrupan según intervalos discretos de 2 horas de paso.

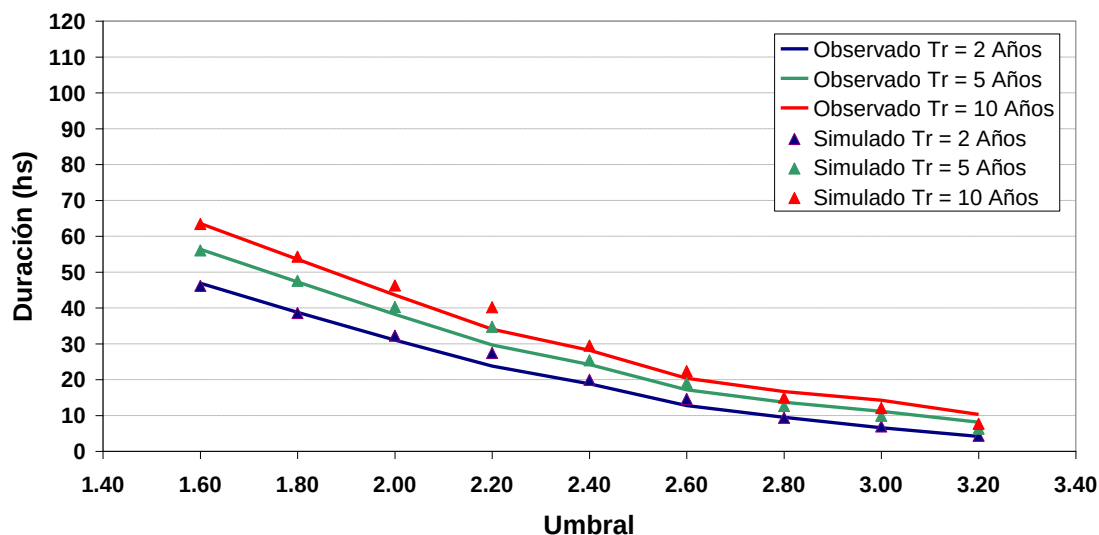
A título ilustrativo, utilizando la serie temporal de niveles del Río de la Plata registrada en la ciudad de Buenos Aires – provista por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) – correspondiente al período 1990-1999 (considerado como escenario de base), se concluye que el umbral mínimo se ve superado un 9% del tiempo, aproximadamente, es decir, 5 semanas por año. Además, entre el 60% y el 80% de los eventos tiene una duración menor a 6 horas, y para el 90% su duración es menor a 12 horas.

Para efectuar el análisis estadístico de los eventos extremos se utiliza una función de distribución bivariada, que tiene en cuenta el nivel máximo (pico) y la duración de la inundación, basada en el modelo logístico de Gumbel presentado en Yue (2001). El período mínimo entre eventos se fijó en 1 mes. Previamente, se procede a filtrar las series de niveles de los efectos de la marea astronómica, de carácter determinístico, de modo de considerar sólo los procesos meteorológicos (vientos, presión), que pueden considerarse de carácter estocástico. La caracterización estadística se efectúa en términos del ‘tiempo de recurrencia’ ó ‘período de retorno’, que es el tiempo promedio de ocurrencia entre eventos que superan el valor extremo considerado (nivel ó duración).

Esta metodología fue aplicada simultáneamente a las series temporales de niveles registrada y simulada en Buenos Aires para el escenario de base, observándose una buena performance del modelo numérico en cuanto a simulación de alturas de inundación, pero una significativa sobrestimación de las duraciones, discrepancia adjudicada a la baja resolución espacial y temporal de la información de los campos de viento. Para corregir esta desviación, se establecieron factores de corrección para cada umbral. En la Figura 2.2.1 se muestra el grado de acuerdo así alcanzado. Estos factores son los que se utilizan luego para corregir en las cuatro localidades analizadas en este estudio.



a) Pico de inundación



b) Duración de inundación

Figura 2.2.1. Comparación entre parámetros estadísticos calculados a partir de las observaciones y de la simulación para Buenos Aires.

2.3 Construcción de mapas

Se construyen dos tipos de mapas de riesgo de inundación: de niveles – asociados al pico – y de duraciones (correspondientes a las respectivas distribuciones estadísticas marginales).

Los mapas de niveles, a su vez, dan lugar a una subcategoría relevante: la de alturas de inundación por sobre el terreno. Estas últimas surgen de efectuar la resta entre el nivel de agua y el nivel del terreno. Para conocer este último es necesario disponer de un MDE (modelo digital de elevación).

3 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

3.1 Base de datos

Para la construcción del Modelo Digital de Elevación (MDE) del terreno se tomaron como base los datos generados por la misión SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), que constituye un MDE cuasi global realizado en cooperación entre la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), el *German Aerospace Center* (DLR), la Agencia Espacial Italiana (ASI) y la *National Geospatial Intelligence Agency* (NGA). Los datos de interferometría por radar de apertura sintética fueron obtenidos por dos sistemas de radar montados en el transbordador espacial *Endeavor*. El *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) de la NASA operó un sistema en banda C y en modo ScanSAR, cubriendo un ancho de faja de 225 Km, y logrando así un modelo digital de elevación (MDE) en un rango de latitudes desde 56° S a 60° N. El DLR operó un sistema en banda X con un ancho de faja de 50 Km. Esta limitación de ancho de barrido de la banda X no permitió realizar una cobertura continua, pero, al poseer menor ruido, para una misma observación los errores aleatorios de elevación de la banda X son cercanos a la mitad de los de la banda C.

Las bandas C y X fueron procesadas independientemente. La primera banda fue distribuida públicamente, con resolución espacial de 1" de arco (~30 m) para Estados Unidos y reducida a 3" (~90 m) para el resto del mundo. Luego la NGA posprocesó el MDE de banda C creado por el JPL, de donde surgieron las versiones circulantes denominadas SRTM v3.0 y SRTM v4.1. Los MDE realizados por el DLR en banda X son distribuidos en grillas de 10° x 10° en formato comprimido de cuadros de 15' x 15', e incluye un mapa de errores de elevación (*HEM, Height Errors Map*).

Para el presente estudio se seleccionó como base de datos el SRTM v4.1, por ser la última versión abierta al público. Se trata, entonces, de un MDE del terreno de 90 m de paso. Los valores de elevación provistos están redondeados al metro.

3.2 Procesamiento

Es común efectuar un filtrado de los datos del SRTM, de modo eliminar oscilaciones bruscas generadas, entre otras cosas, por el redondeo de los valores de elevación. Esto resulta importante para evitar la aparición de una sucesión de pequeños picos y valles al interpolar en busca de representar una distribución continua de niveles del terreno. Pero implica de hecho bajar la resolución espacial, ya que se eliminan variaciones de corta escala.

En este estudio, el filtrado consistió en promediar los valores de elevación sobre grupos de 3 x 3 celdas, generando un único valor representativo, entonces, de una celda de 270 m de lado, tal como se ilustra en la Figura 3.2.1. A este MDE se lo denomina 'Medio'.

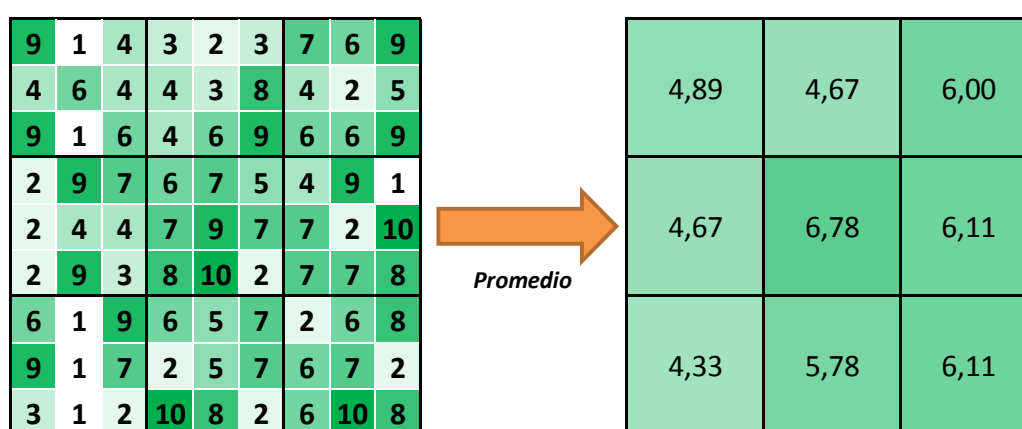


Figura 3.2.1. Filtrado del SRTM.

Por otro lado, es necesario tener en cuenta que el relevamiento de radar copia la superficie, incorporando la altura de la vegetación, que puede ser densa en zonas rurales, y la de las construcciones, que puede ser densa en zonas urbanas. Esto introduce un sesgo hacia valores más altos de elevación.

Para corregir por este sesgo, en este estudio se extrajo, también, el valor mínimo de cada grupo de 9 celdas filtrada, tal como se ilustra en la Figura 3.2.2, con la esperanza de detectar así valores más representativos de la superficie del terreno. A este MDE se lo denomina 'Mínimo'. Ahora bien, dado que con este procedimiento puede generarse un efecto inverso de sesgo hacia abajo, se construyó también un MDE 'Promedio', justamente promediando el Medio y el Mínimo.

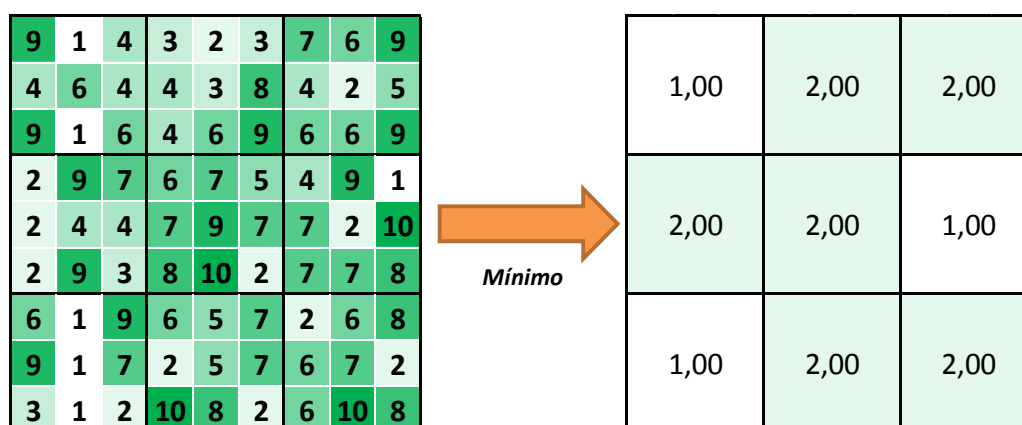
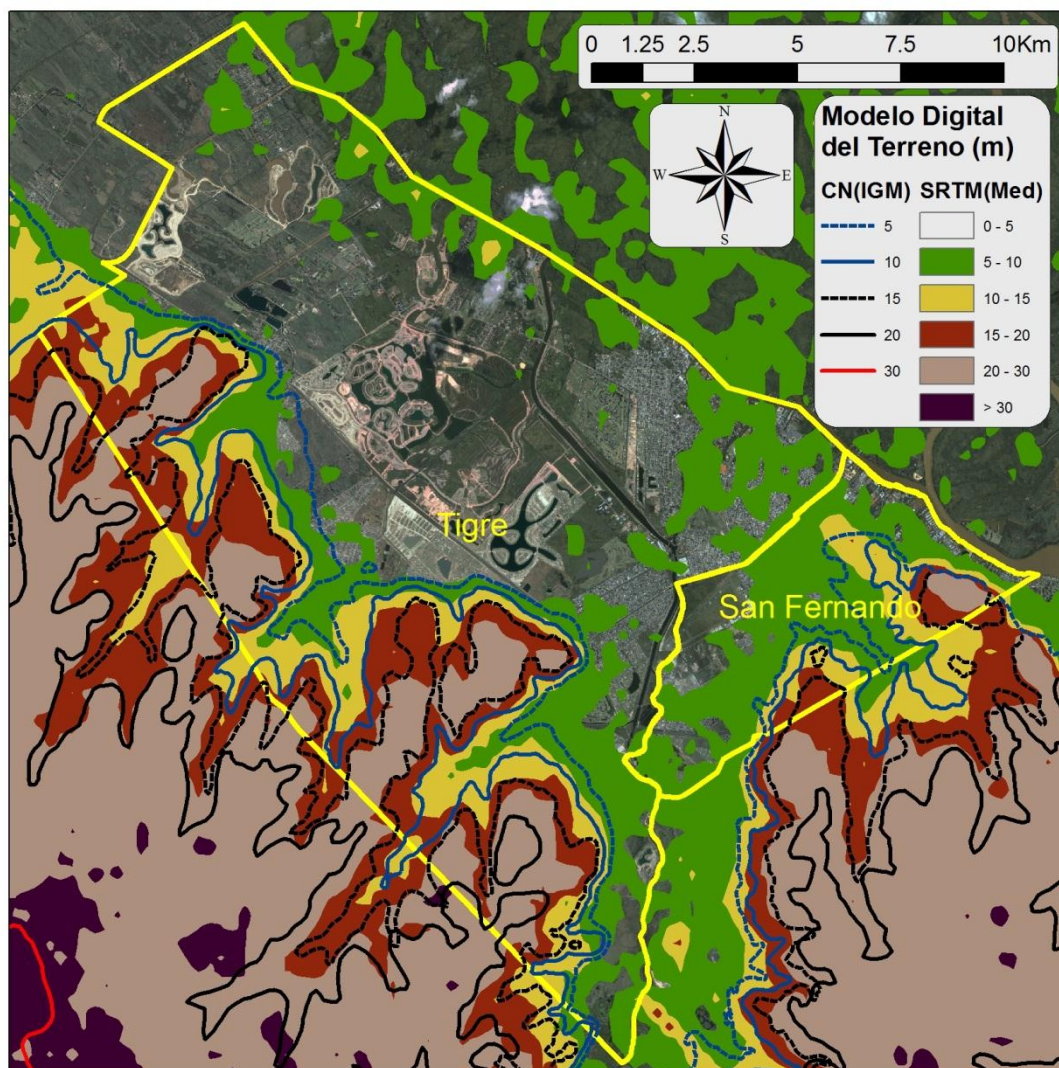


Figura 3.2.2. Extracción del mínimo del SRTM.

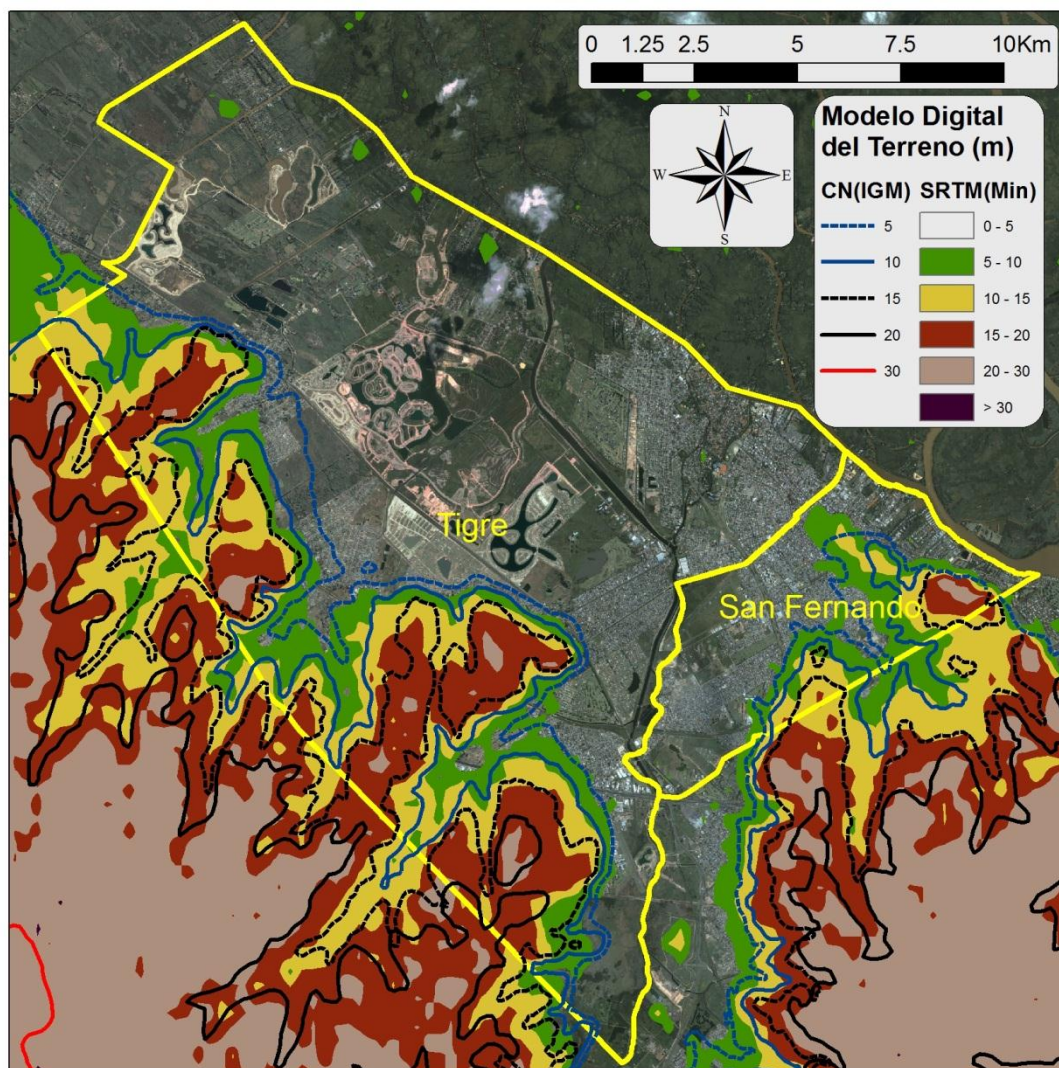
Para analizar la calidad de los tres tipos de MDE construidos, se efectuó una comparación de cada uno de ellos, para la zona Tigre/San Fernando, con las curvas de nivel del IGN disponibles, correspondientes a elevaciones que van de 5 a 30 m, en pasos de 5 m. Obviamente, la zona de comparación no es, precisamente, la de inundación, de modo que este ejercicio de validación es relativo.

Estas comparaciones se muestran en la Figura 3.2.3. Se observa que el MDE Medio tiende a sobrestimar las elevaciones, sobre todo en la parte más baja, mientras que el MDE Mínimo, por el contrario, muestra un sesgo hacia abajo, sobre todo en la parte más baja de Tigre. El MDE Promedio se considera un compromiso razonable entre ambos, de modo que es la metodología adoptada.

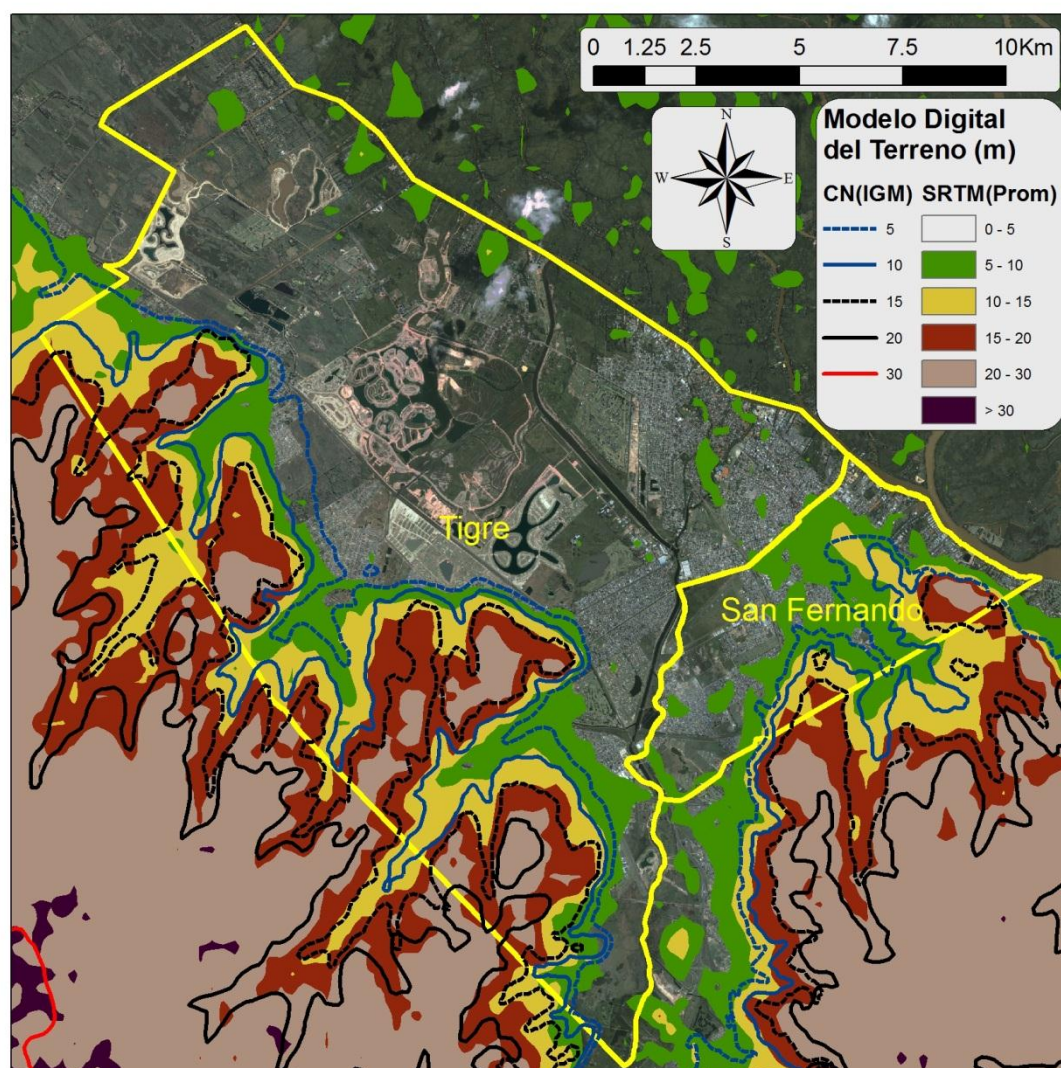
Los MDE generados se muestran en las Figuras 3.2.4 (Tigre/San Fernando), 3.2.5 (Juan Lacaze) y 3.2.6 (Carmelo). Para cada zona se presenta el general de toda el área, y el de detalle de la zona baja potencialmente inundable.



a) MDE Medio

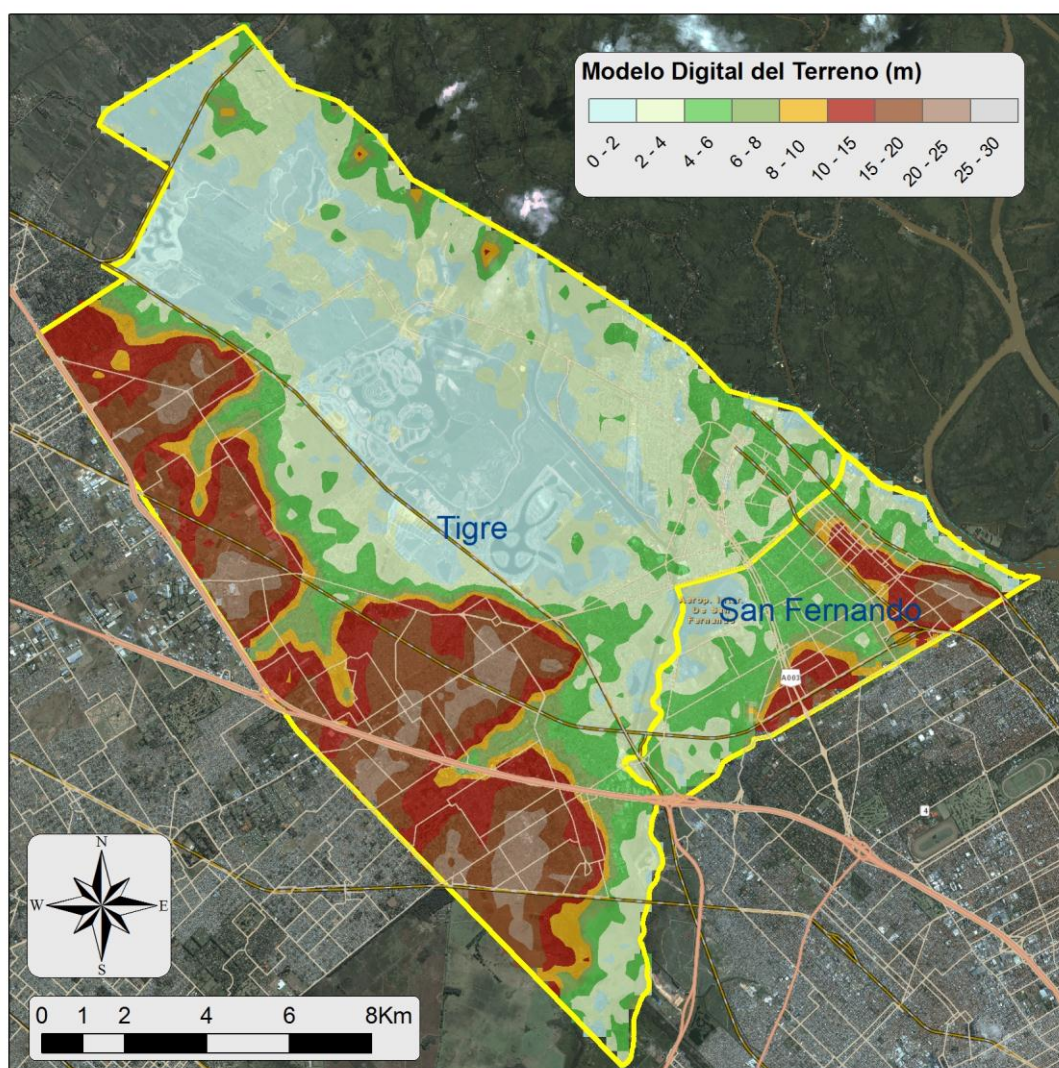


b) MDE Mínimo

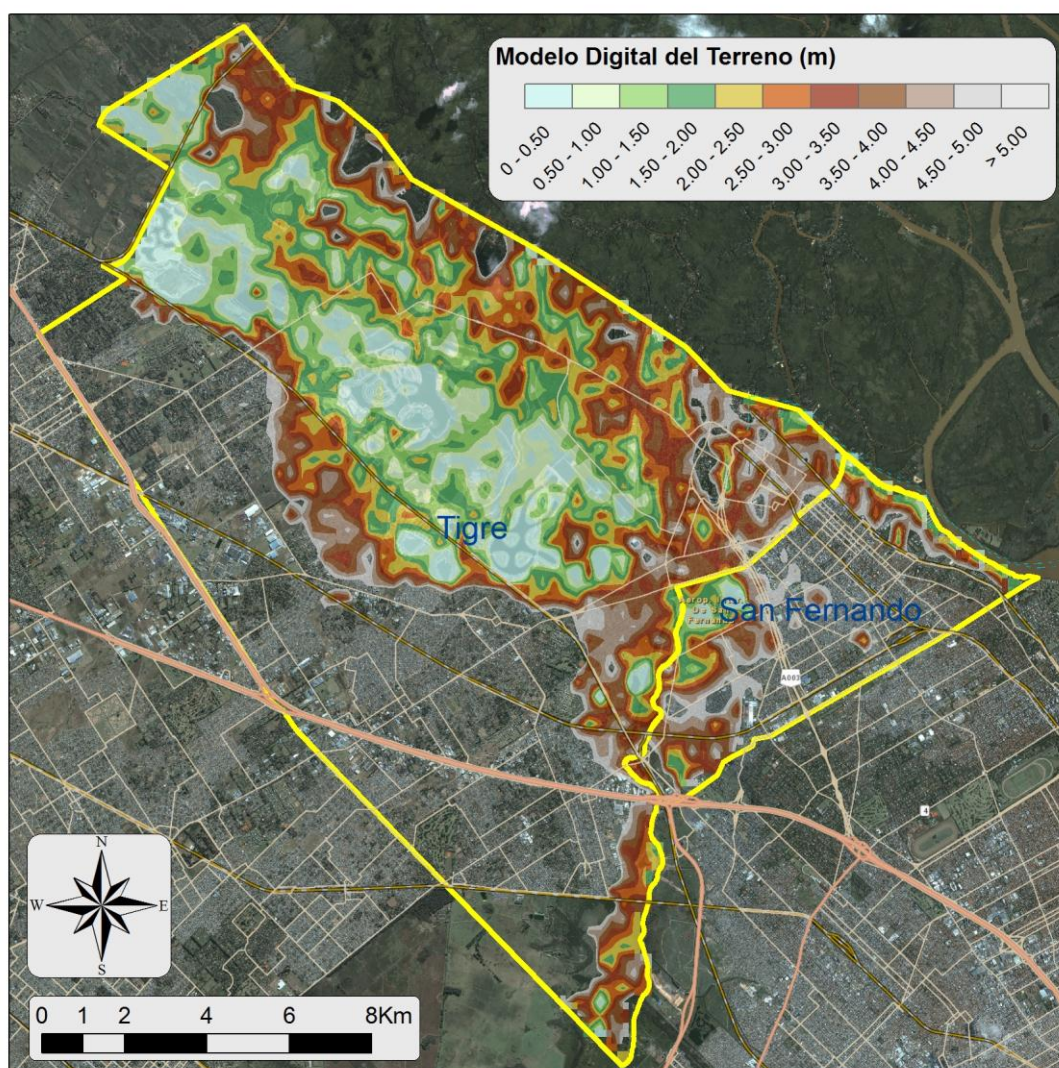


c) MDE Promedio

Figura 3.2.3. Comparación entre curvas de nivel del MDE y del IGN.

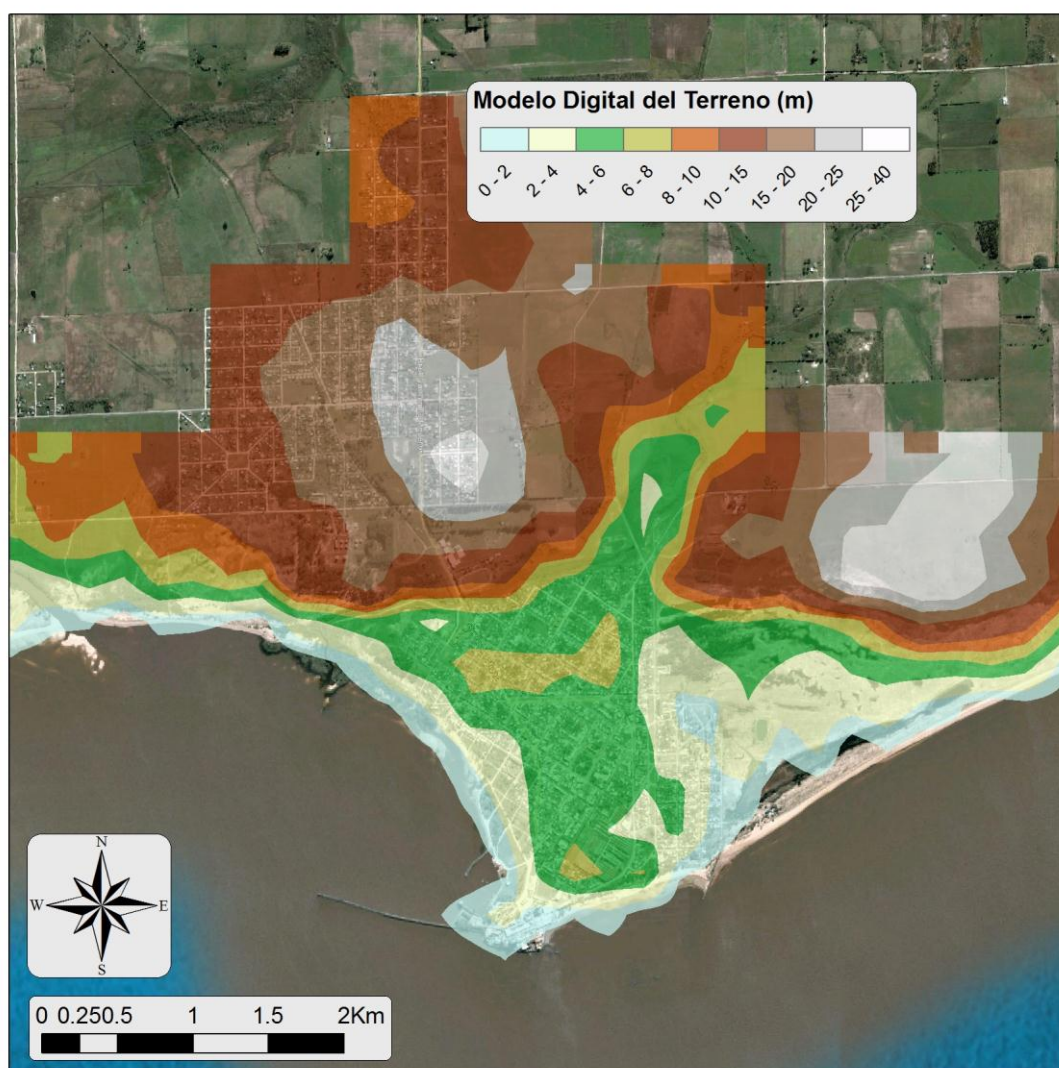


a) General

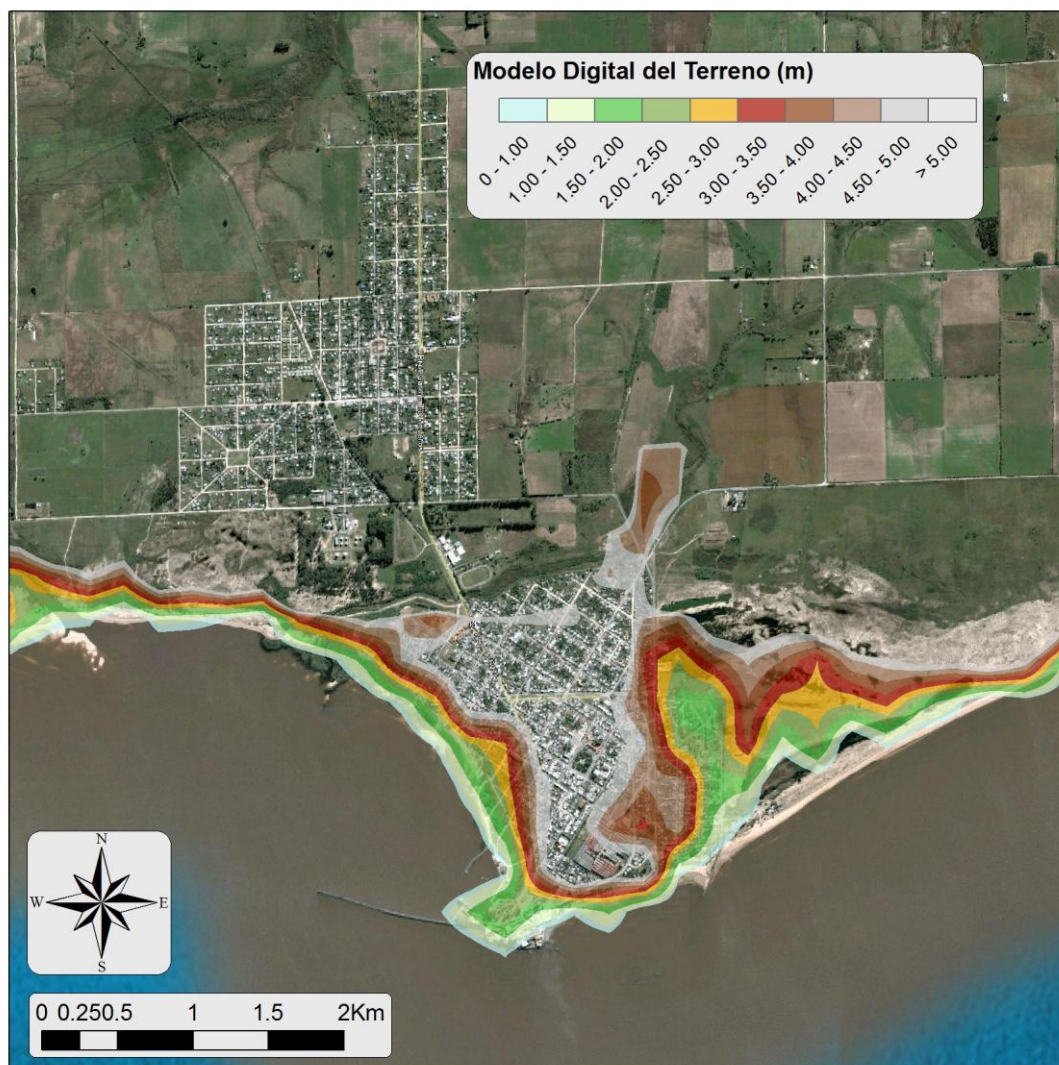


b) Zona baja

Figura 3.2.4. MDE para Tigre/San Fernando.

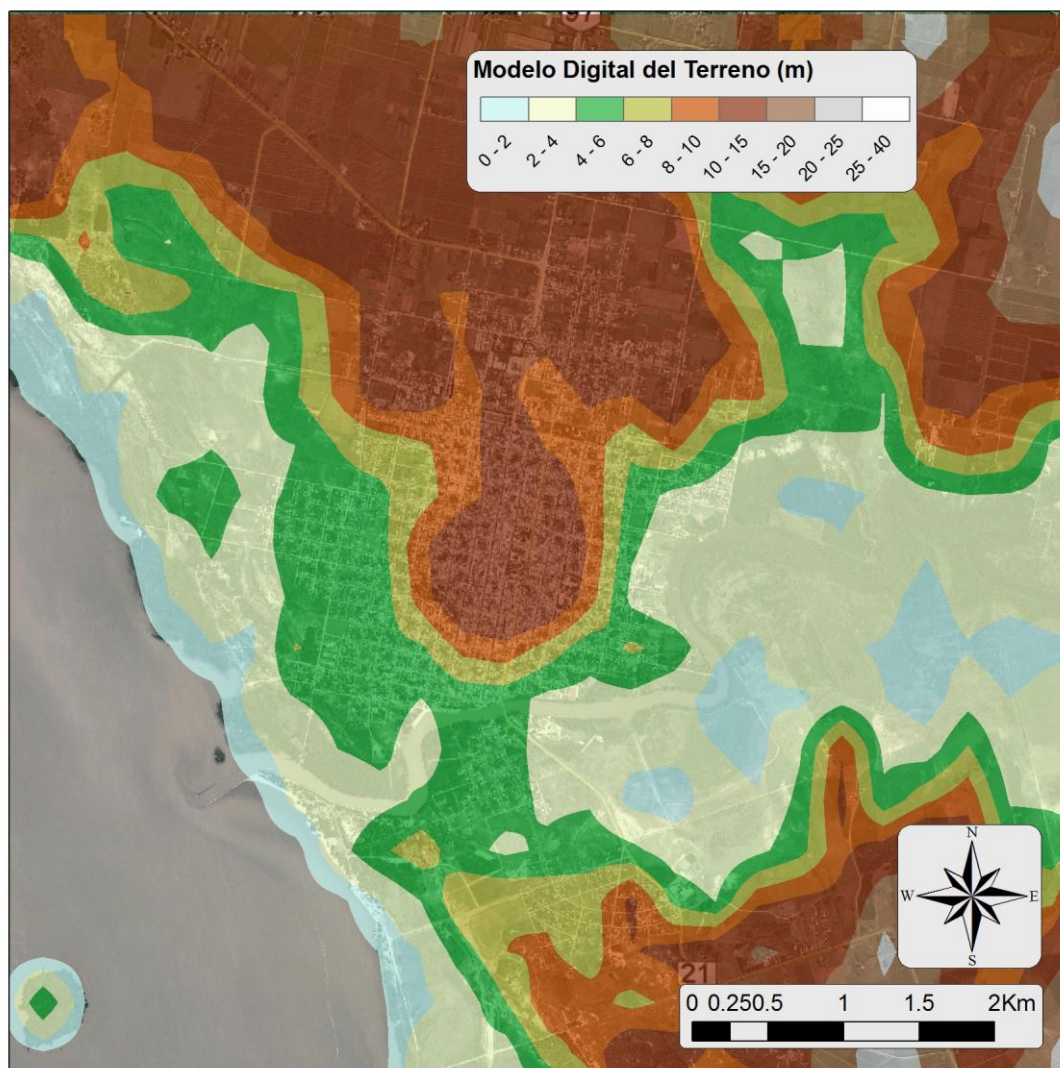


a) General

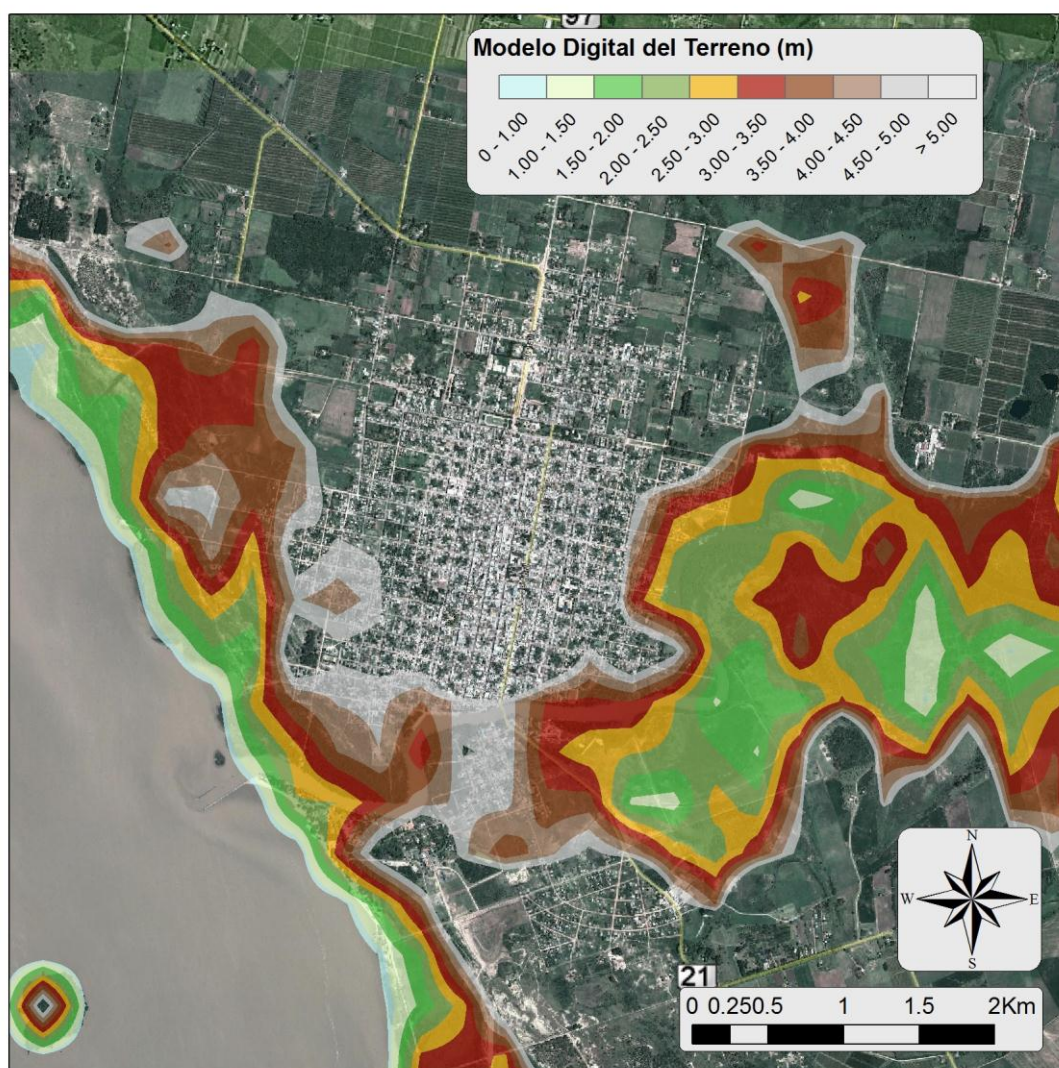


b) Zona baja

Figura 3.2.5. MDE para Juan Lacaze.



a) General



b) Zona baja

Figura 3.2.6. MDE para Carmelo.

4 RESULTADOS

4.1 Productos del estudio

Se construyeron tres tipos de mapas de inundación:

- i. Mapas de niveles de inundación, que básicamente muestran el área inundada para el pico de la crecida, ya que la variación de nivel de agua es prácticamente despreciable a la escala de cada localidad.
- ii. Mapas de altura de inundación, que indican la distribución espacial de alturas máximas de agua esperables sobre el área inundada.
- iii. Mapas de duración de inundación, que indican la distribución espacial de tiempos de duración de la inundación sobre el área inundada.

Los mapas se construyeron para dos escenarios:

- A. Escenario de Línea de Base, que corresponde a la década de 1990.
- B. Escenario Futuro, que corresponde a la década de 2030.

Se seleccionaron dos períodos de retorno: 2 y 10 años.

4.2 Tigre y San Fernando

Las localidades de Tigre y San Fernando se trabajaron en forma conjunta, dada su cercanía. En la Tabla 4.2.1 se indican los valores de niveles pico asociados a los dos escenarios y las dos recurrencias consideradas.

Tabla 4.2.1. Niveles pico (m IGN) para Tigre/San Fernando.

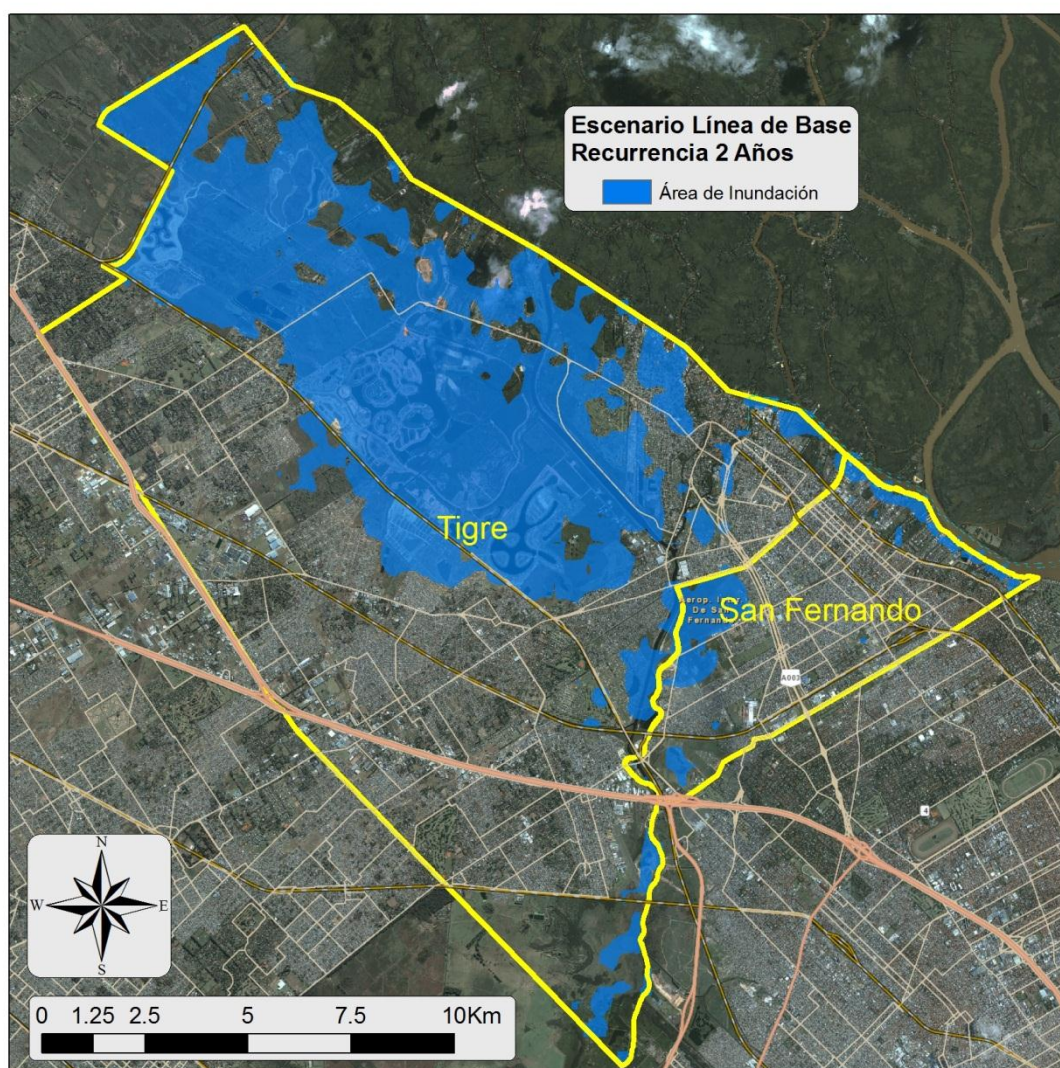
Escenario	Recurrencia	
	2 años	10 años
Línea de Base	2,84	3,70
Futuro	3,29	4,28

En primer lugar se presentan los resultados correspondientes al escenario de Línea de Base. La Figura 4.2.1 muestra los mapas de área de inundación para las dos recurrencias. Se distingue claramente el efecto comentado (en la Introducción) de desajuste entre el contorno costero que surge del modelo y la línea de costa local, que podría ser corregido mediante un ajuste ad-hoc. Se observa que la inundación ocupa toda el área baja de Tigre y el valle de inundación del río Reconquista. En esta última zona, algunas áreas podrían estar protegidas por obras efectuadas como parte del proyecto de sistematización de la cuenca. Algo similar podría ocurrir en la zona baja de Tigre donde se efectuaron grandes desarrollos urbanos, como Nordelta.

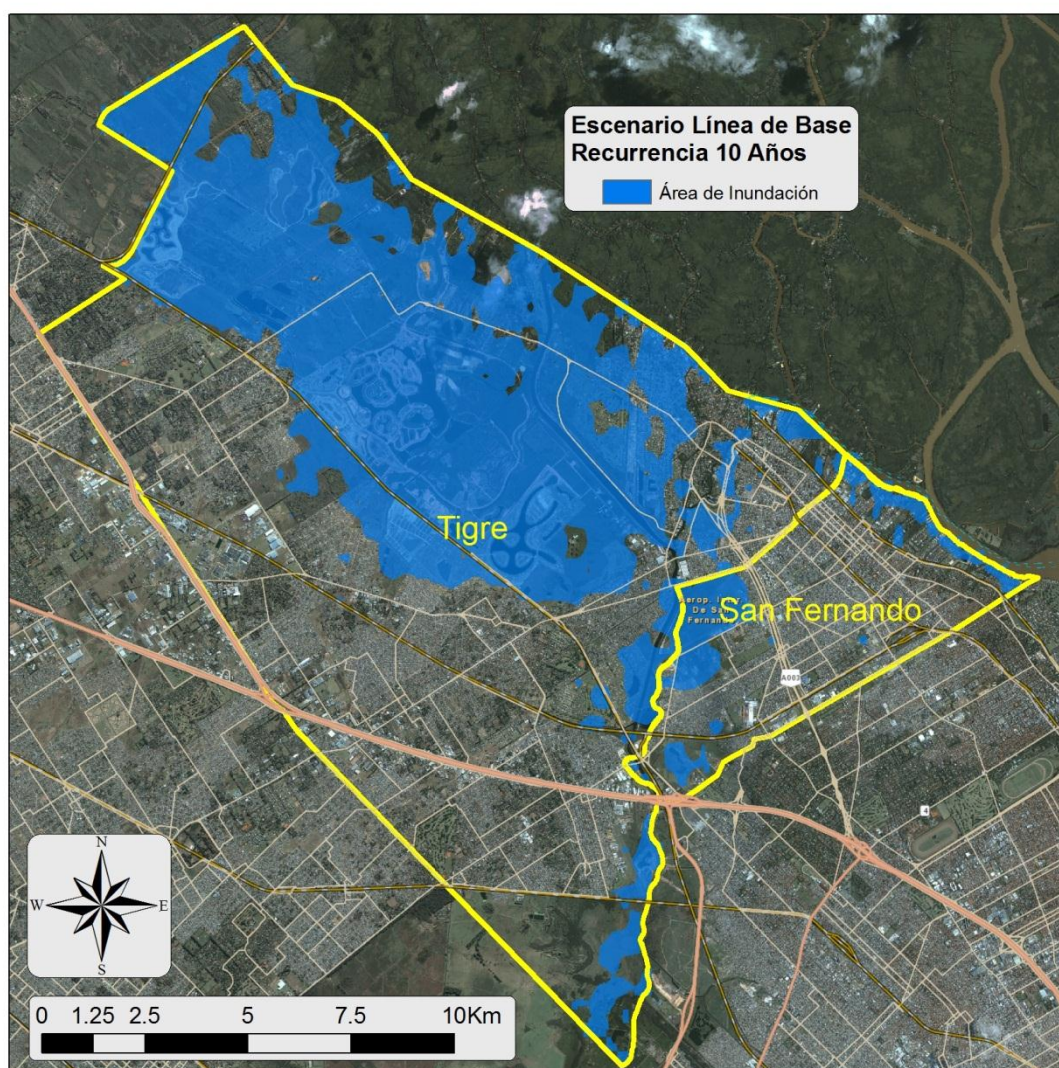
En la Figura 4.2.2 se presentan los mapas de alturas de inundación. Se observan alturas máximas mayores a 1,50 m para 2 años de recurrencia, y mayores a 2,00 m para 10 años de recurrencia.

Los mapas de duración de inundación se muestran en la Figura 4.2.3. Se observan duraciones máximas mayores a 2 días para 2 años de recurrencia, y mayores a 2,5 días para 10 años de recurrencia.

Los mapas correspondientes al Escenario Futuro se presentan en las Figuras 4.2.4 a 4.2.6. Respecto a los de Línea de Base, se observan incrementos significativos en el área inundada, las alturas de agua sobre el terreno y la duración de la inundación, compatible con la severidad del cambio incorporada en escenario considerado.

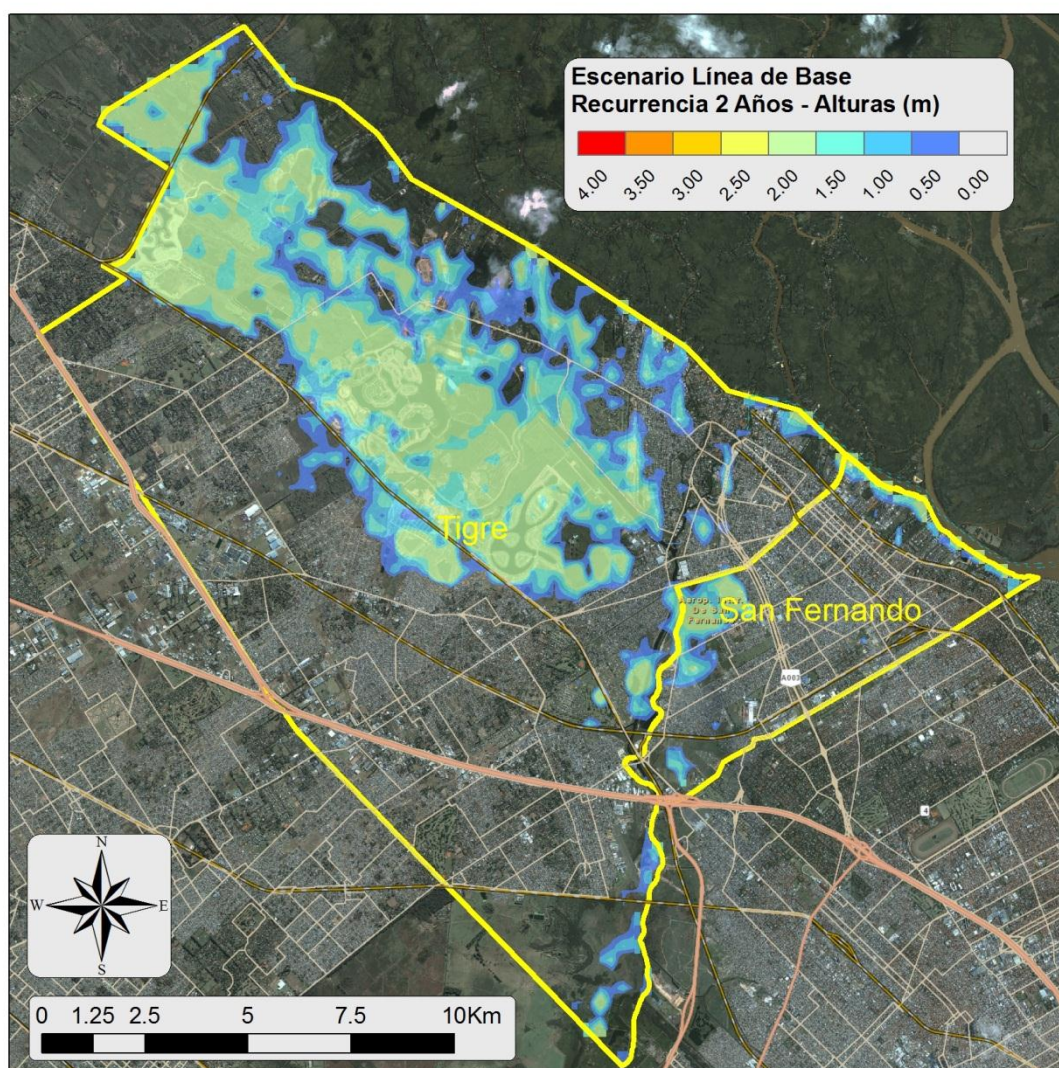


a) 2 años

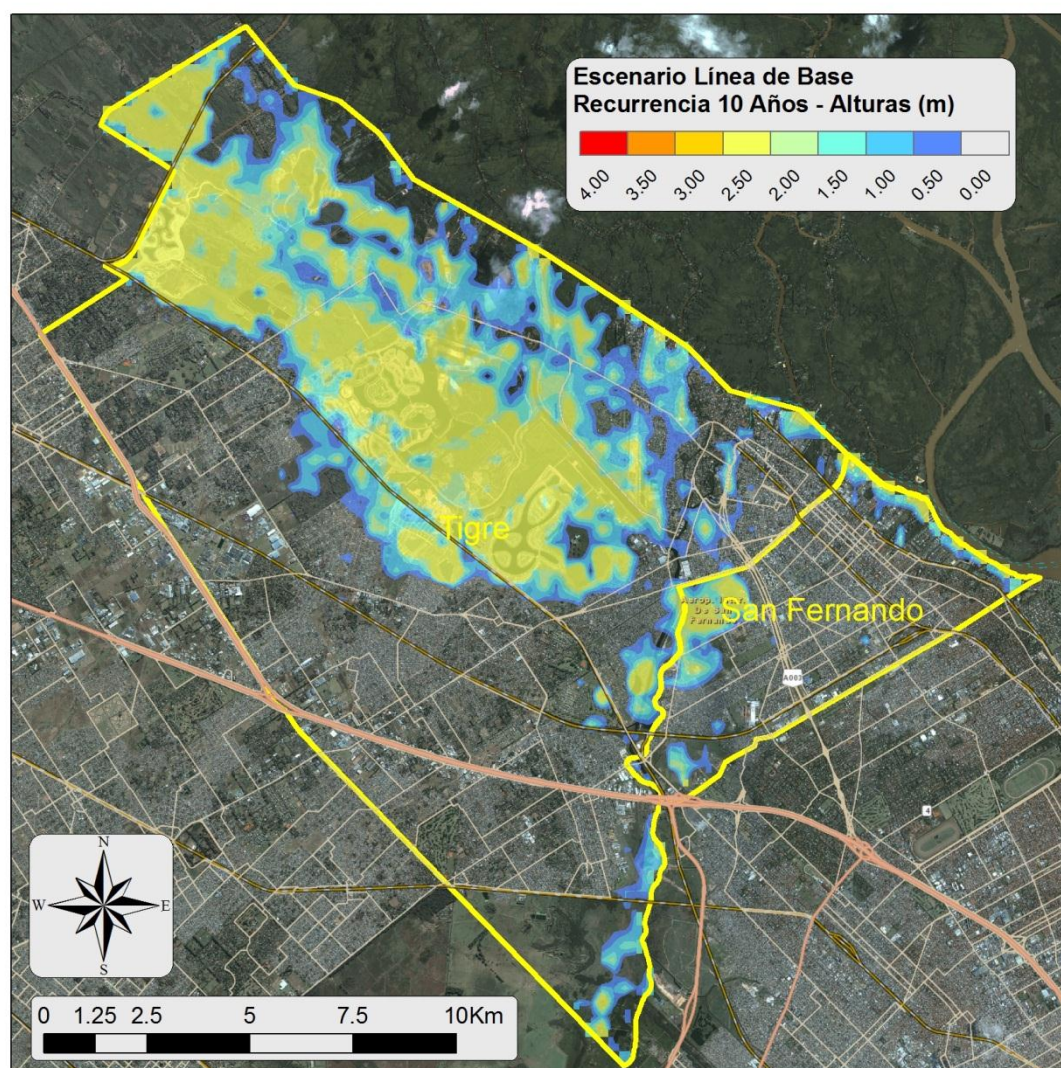


b) 10 años

Figura 4.2.1. Mapas de área de inundación para el escenario de Línea de Base y distintas recurrencias. Tigre/San Fernando.

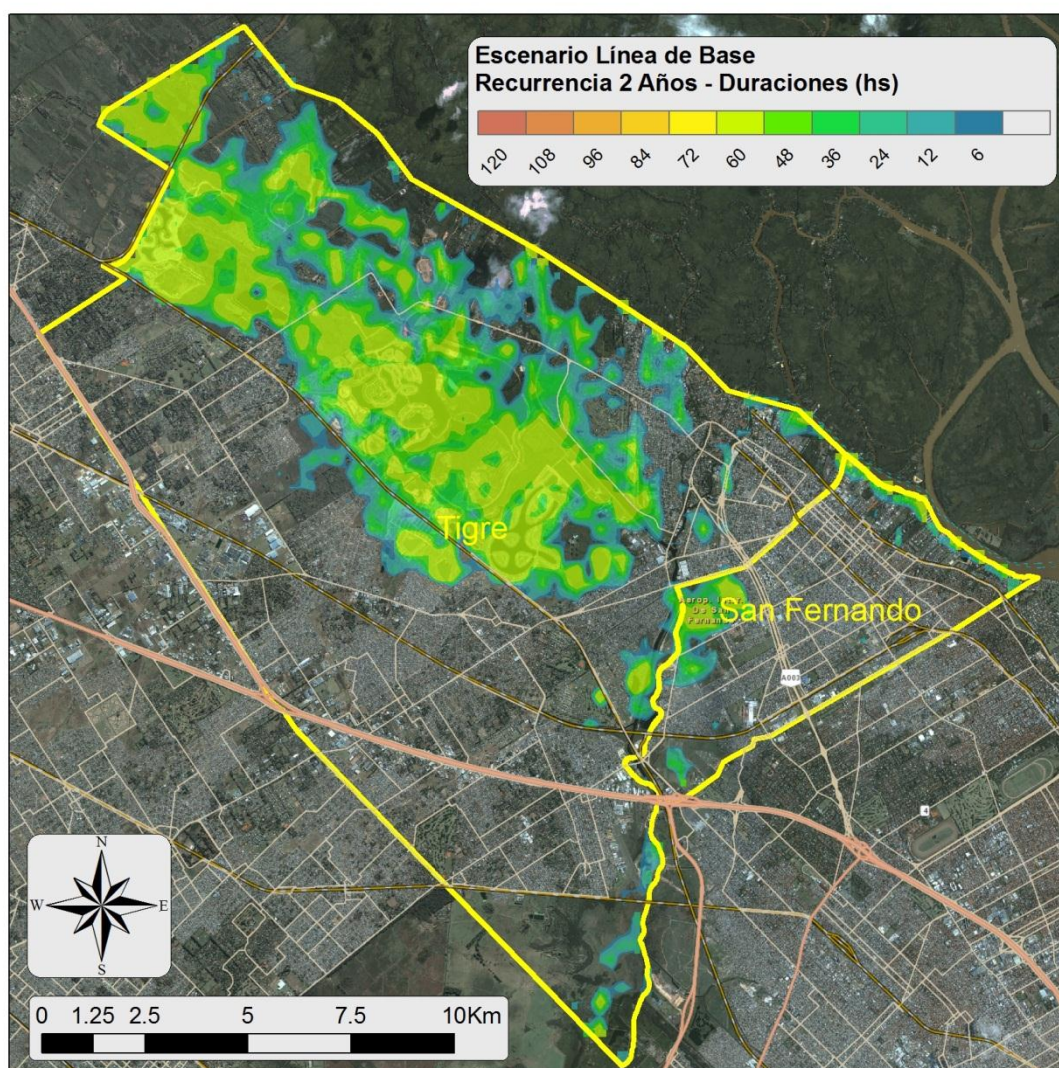


a) 2 años

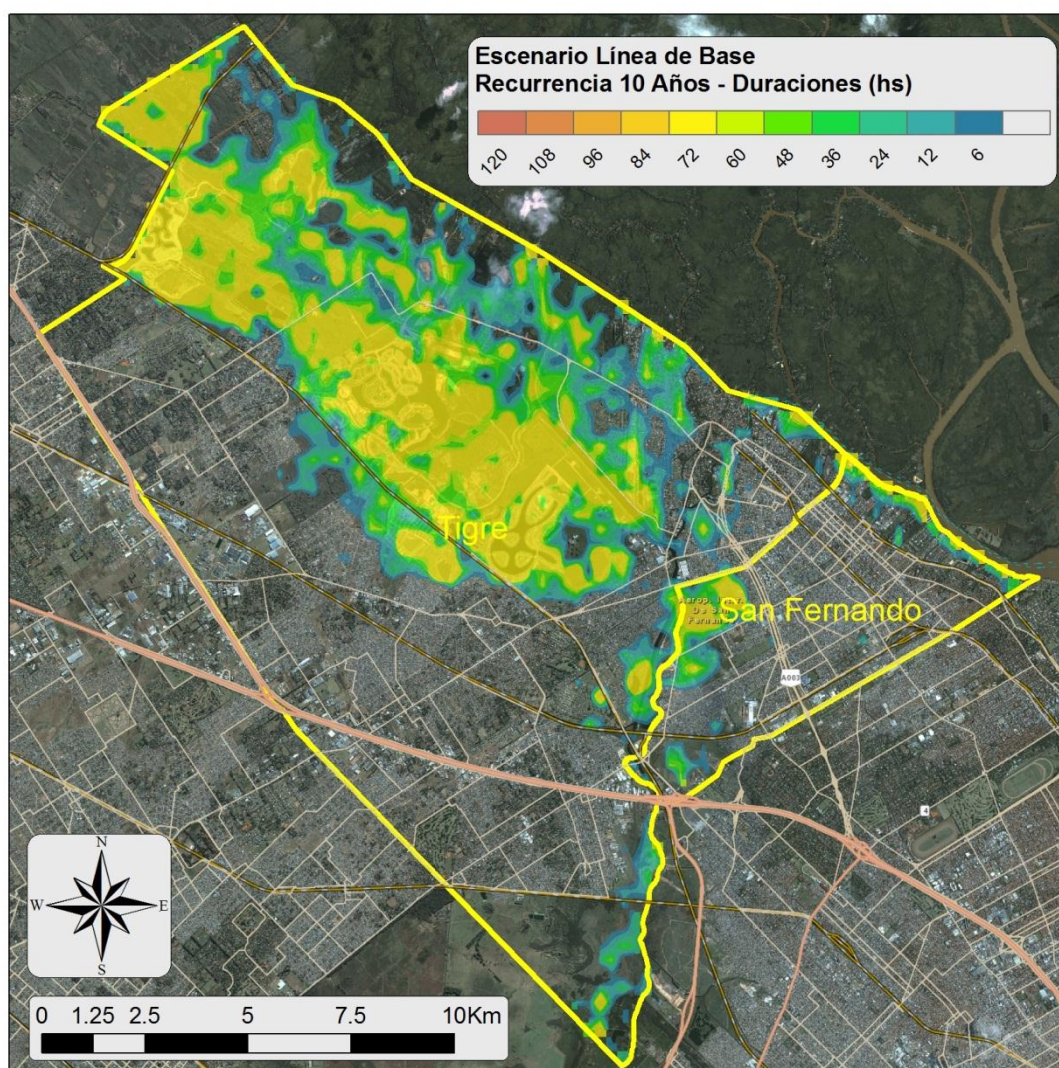


b) 10 años

Figura 4.2.2. Mapas de alturas de inundación para el escenario de Línea de Base y distintas recurrencias. Tigre/San Fernando.

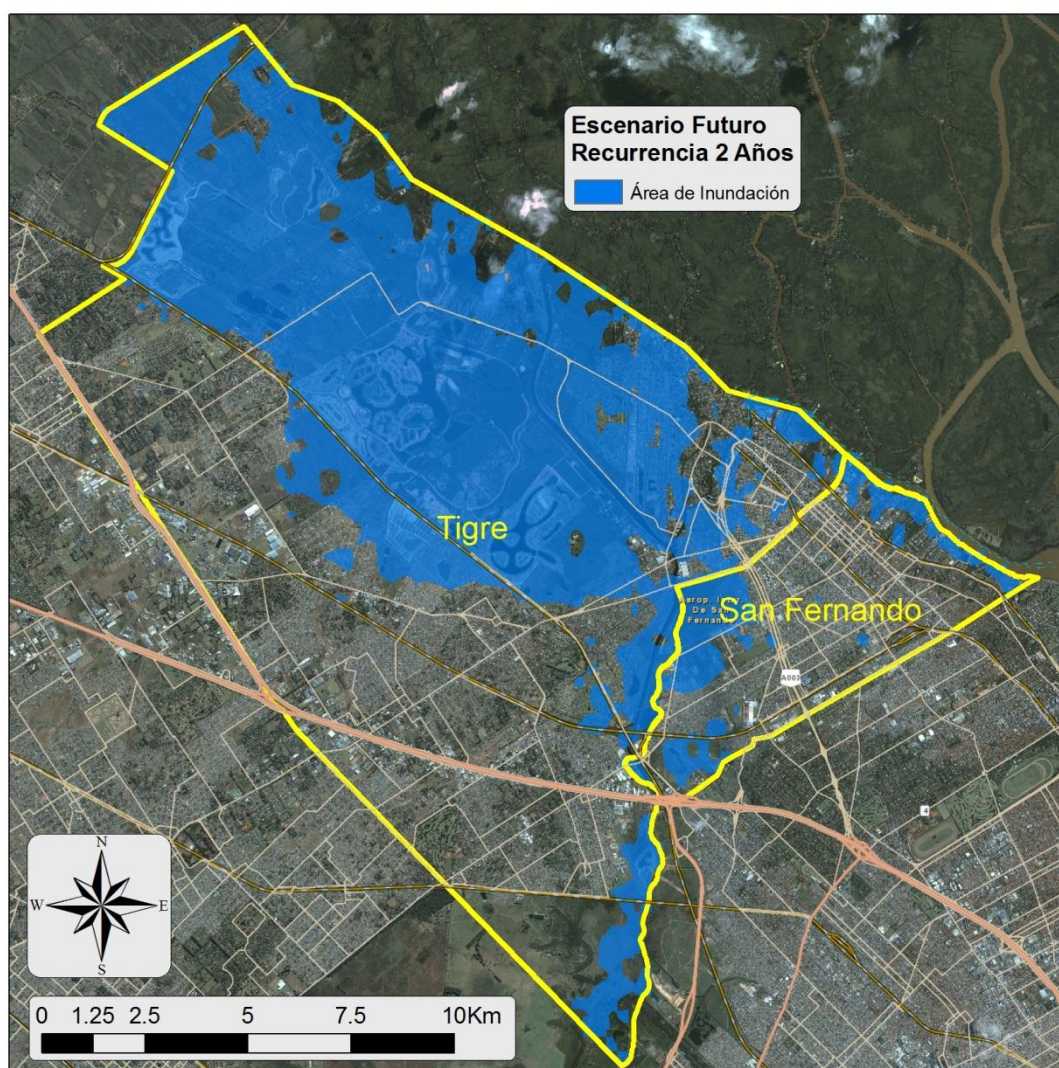


a) 2 años

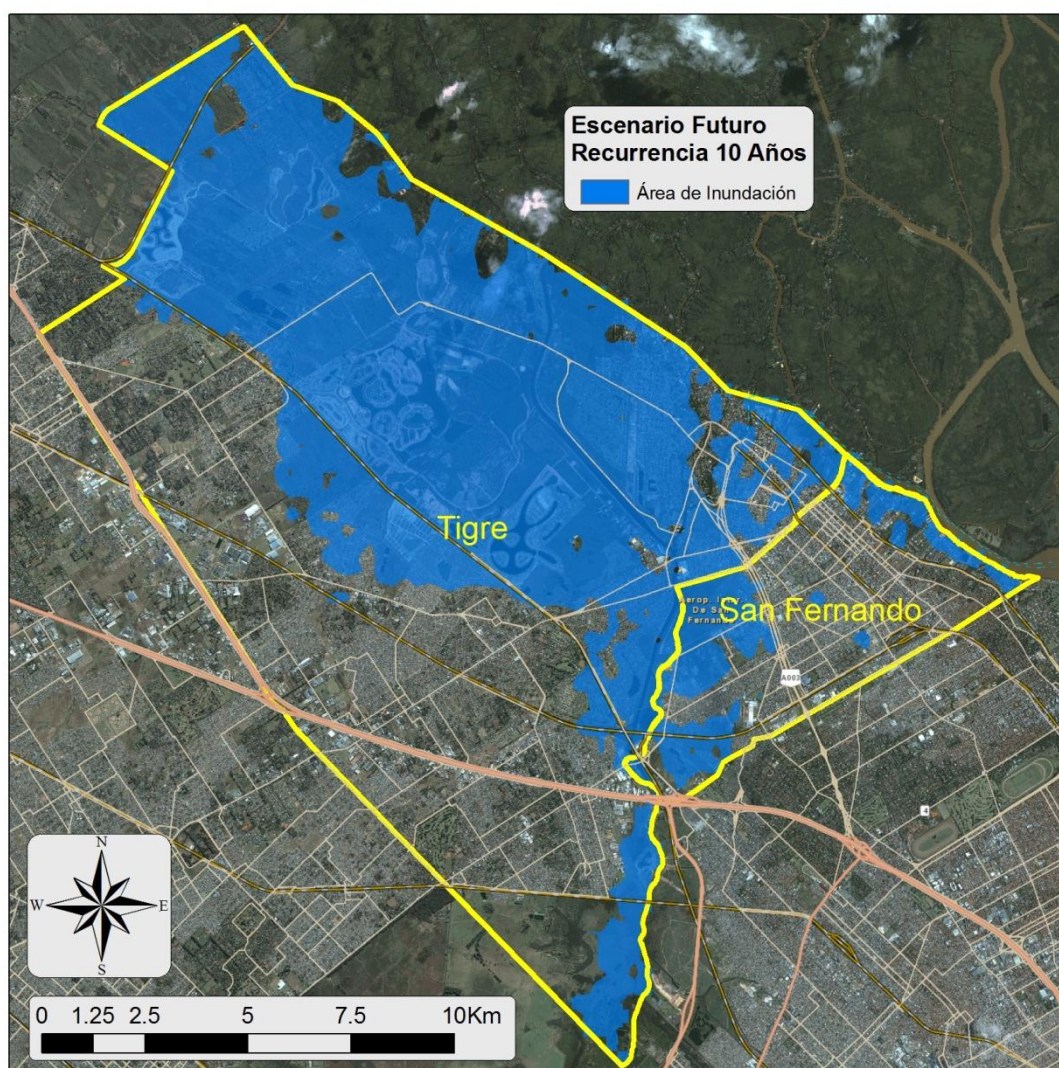


b) 10 años

Figura 4.2.3. Mapas de duración de inundación para el escenario de Línea de Base y distintas recurrencias. Tigre/San Fernando.

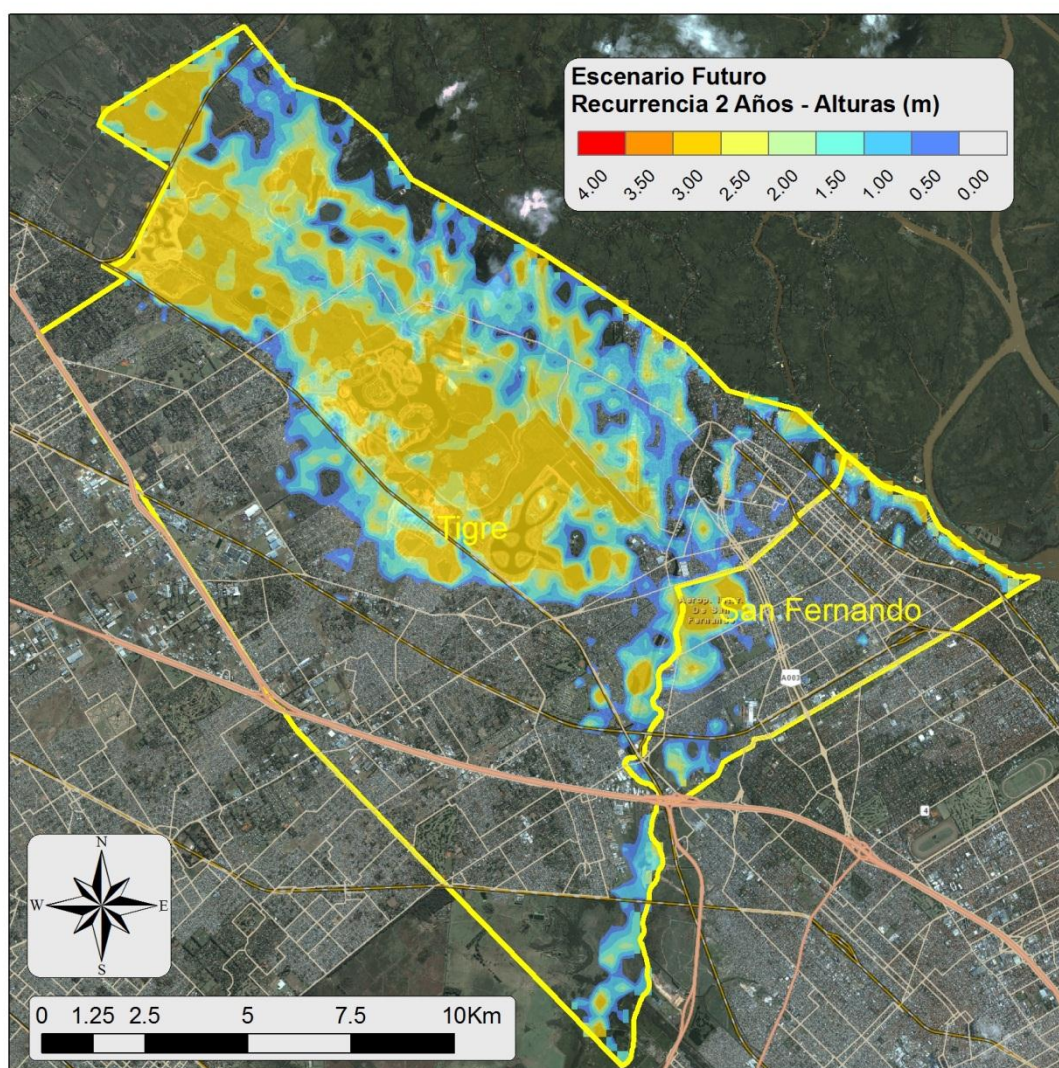


a) 2 años

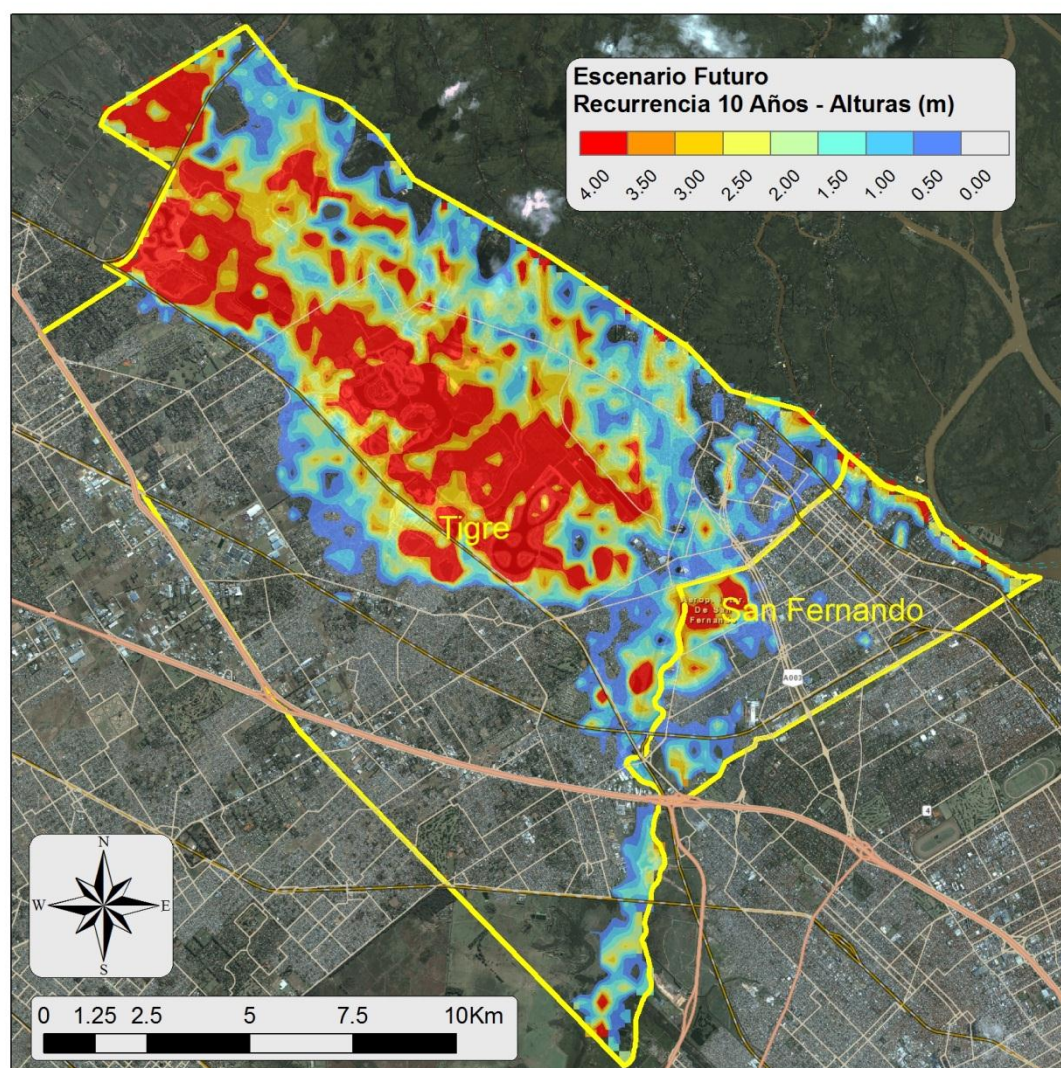


b) 10 años

Figura 4.2.4. Mapas de área de inundación para el escenario Futuro y distintas recurrencias. Tigre/San Fernando.

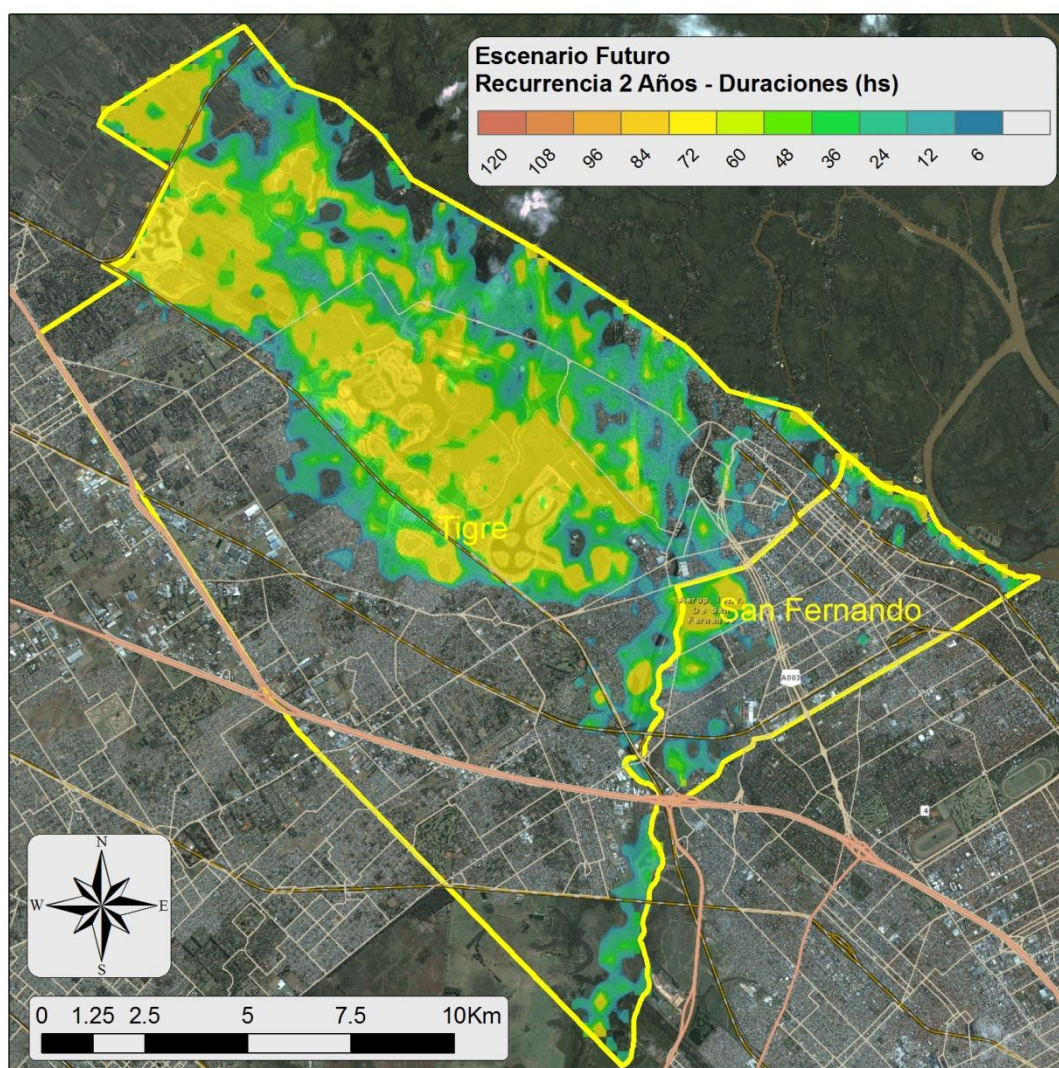


a) 2 años

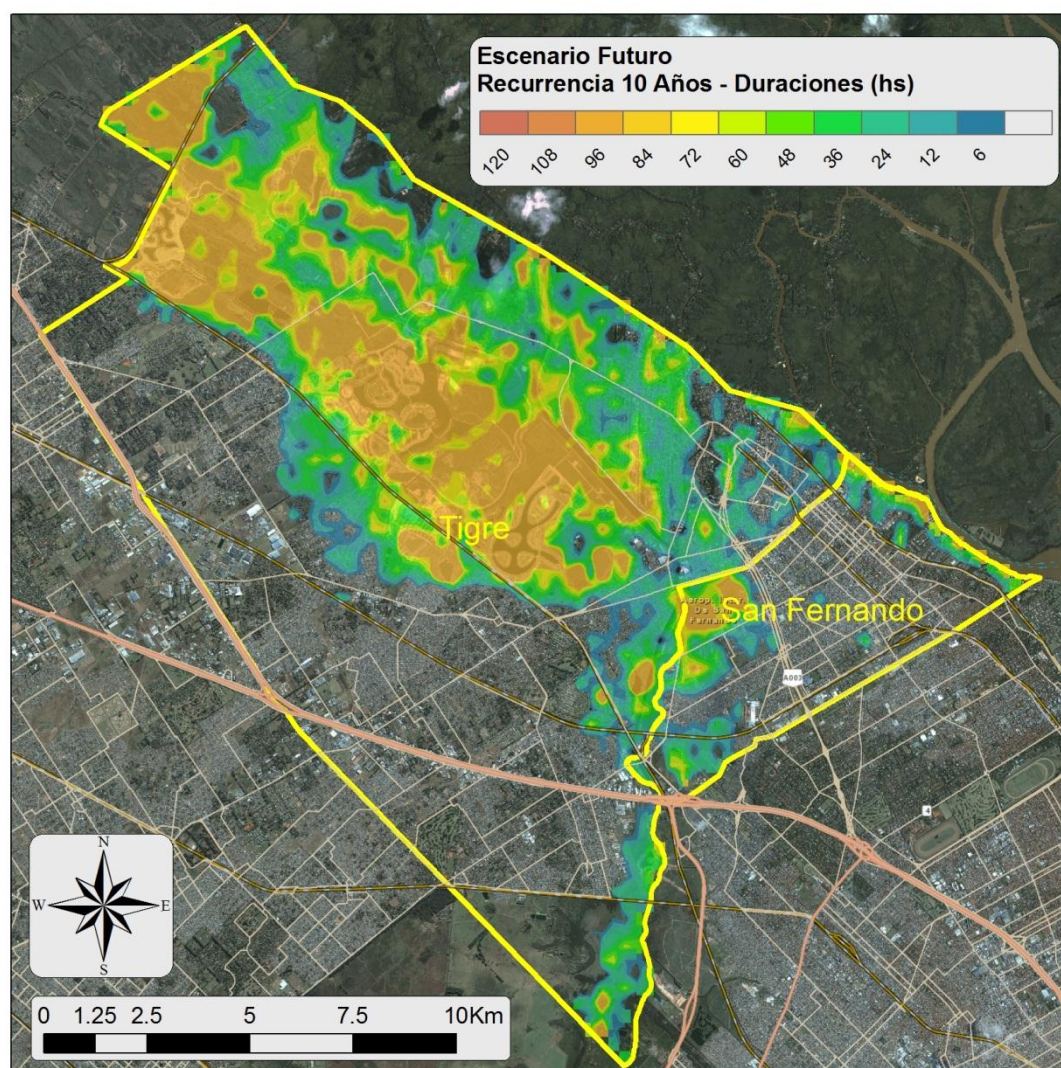


b) 10 años

Figura 4.2.5. Mapas de alturas de inundación para el escenario Futuro y distintas recurrencias. Tigre/San Fernando.



a) 2 años



b) 10 años

Figura 4.2.6. Mapas de duración de inundación para el escenario Futuro y distintas recurrencias. Tigre/San Fernando.

4.3 Juan Lacaze

En la Tabla 4.3.1 se indican los valores de niveles pico asociados a los dos escenarios y las dos recurrencias consideradas.

Tabla 4.3.1. Niveles pico (m IGN) para Juan Lacaze.

Escenario	Recurrencia	
	2 años	10 años
Línea de Base	2,63	3,02
Futuro	3,47	4,04

La Figura 4.3.1 muestra los mapas de área de inundación para el escenario de Línea de Base. En este caso se nota más el desajuste entre el contorno costero que surge del modelo y la línea de costa local, debido al menor tamaño de la zona de análisis respecto de Tigre/San Fernando. Se observa que la zona de afectación es una franja costera.

En la Figura 4.3.2 se presentan los mapas de alturas de inundación para este escenario. En las zonas urbanizadas se observan alturas máximas mayores a 0,50 m para 2 años de recurrencia, y mayores a 1,00 m para 10 años de recurrencia.

Los mapas de duración de inundación se muestran en la Figura 4.3.3. En las zonas urbanizadas se observan duraciones máximas mayores a 1 día para 2 años de recurrencia, y mayores a 1,5 días para 10 años de recurrencia.

Los mapas correspondientes al Escenario Futuro se presentan en las Figuras 4.3.4 a 4.3.6.

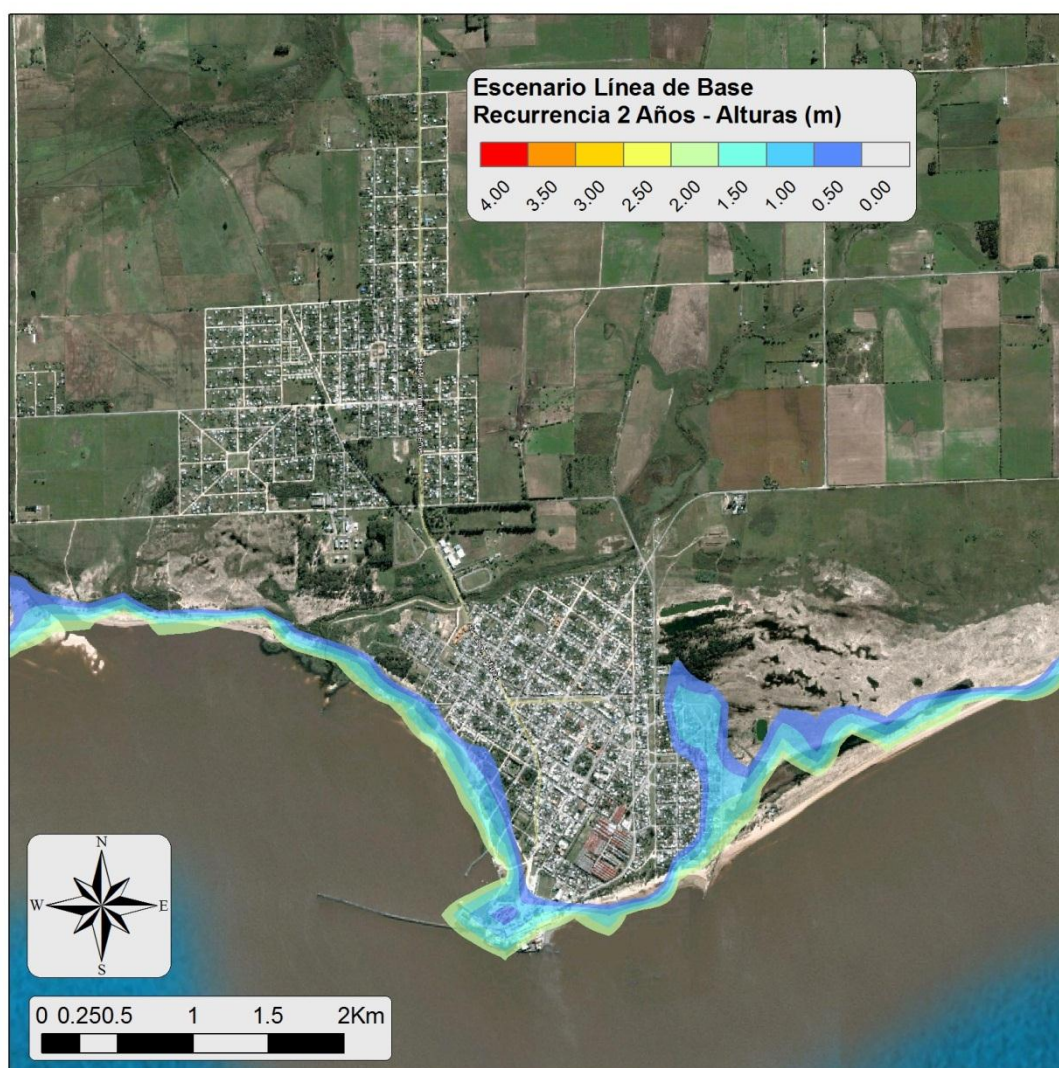


a) 2 años

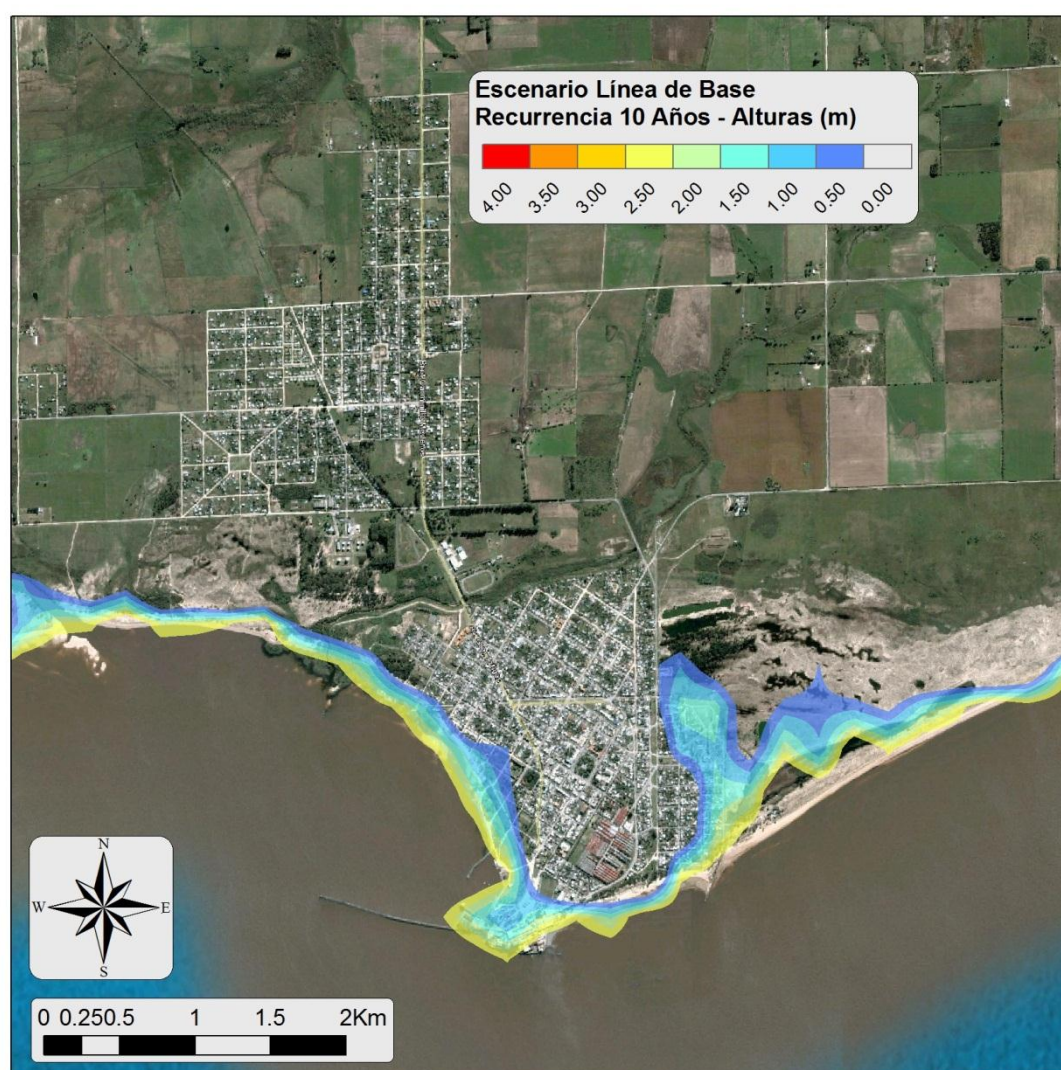


b) 10 años

Figura 4.3.1. Mapas de área de inundación para el escenario de Línea de Base y distintas recurrencias. Juan Lacaze.



a) 2 años



b) 10 años

Figura 4.3.2. Mapas de alturas de inundación para el escenario de Línea de Base y distintas recurrencias. Juan Lacaze.



a) 2 años



b) 10 años

Figura 4.3.3. Mapas de duración de inundación para el escenario de Línea de Base y distintas recurrencias. Juan Lacaze.

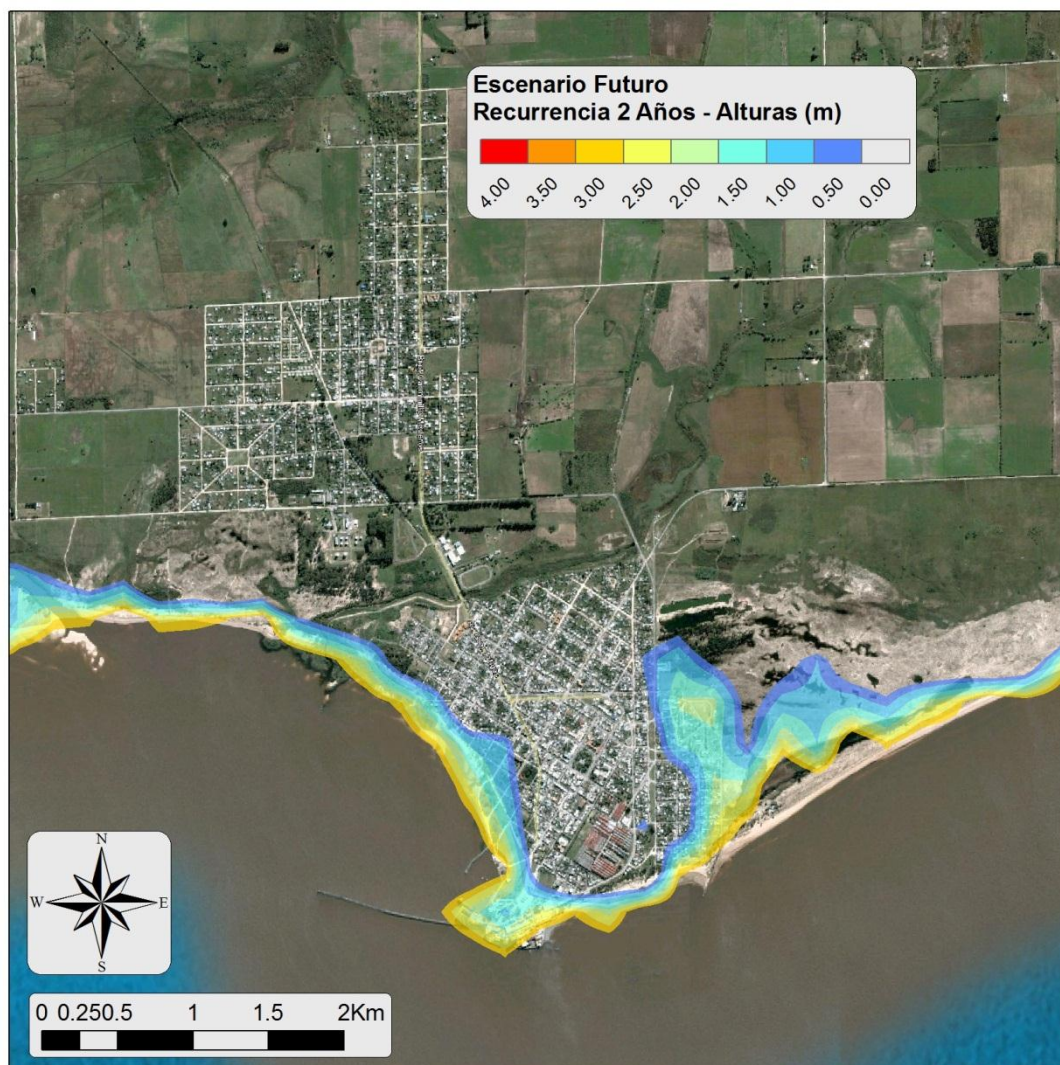


a) 2 años

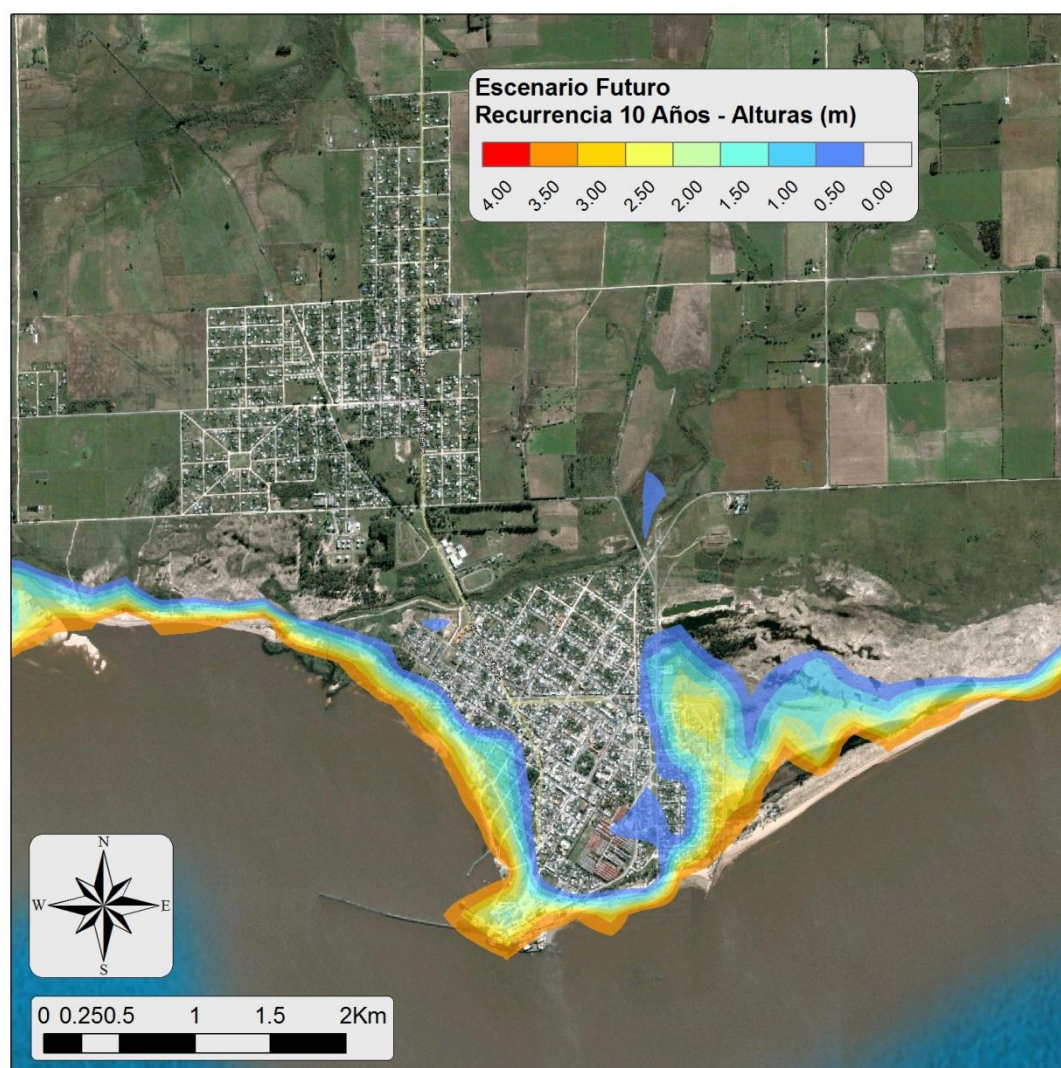


b) 10 años

Figura 4.3.4. Mapas de área de inundación para el escenario Futuro y distintas frecuencias. Juan Lacaze.

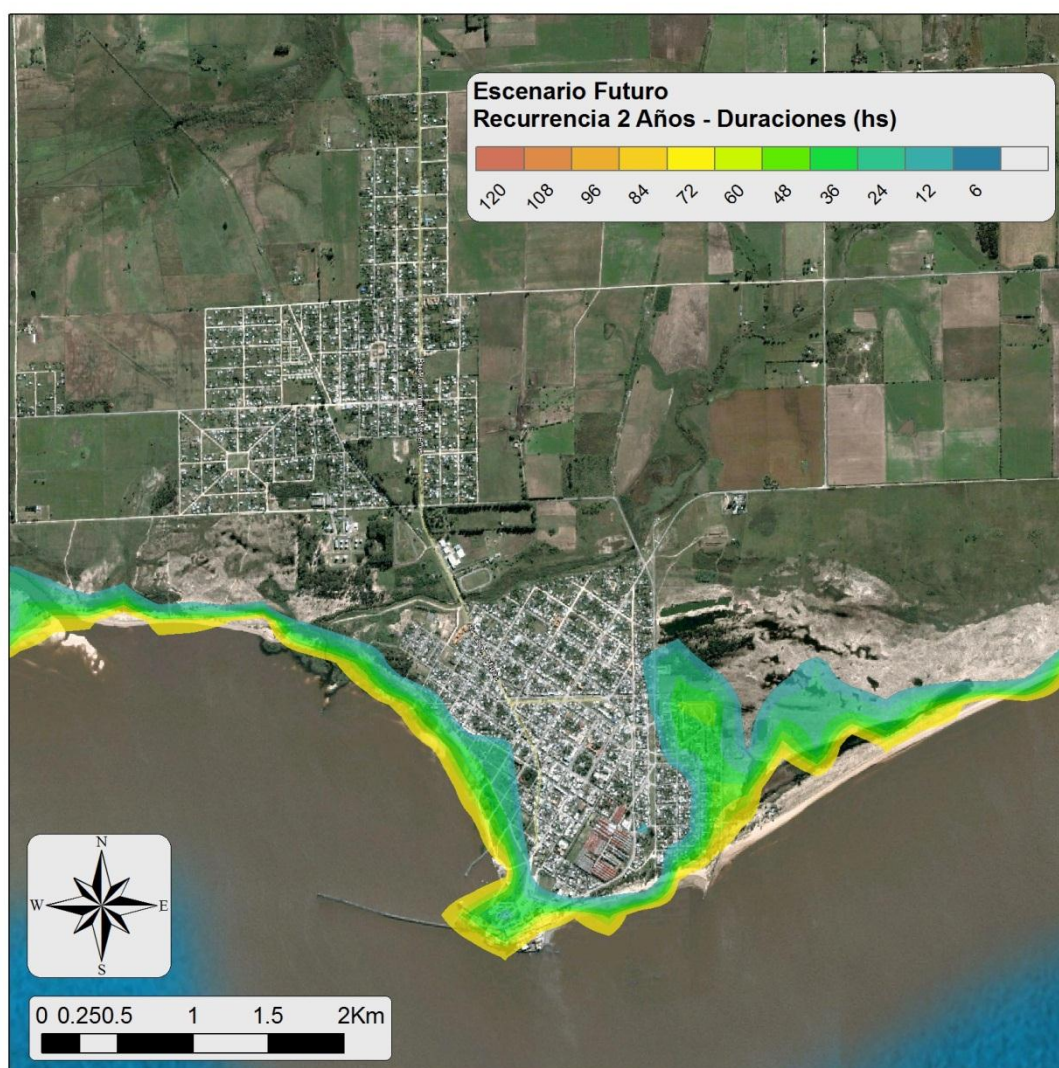


a) 2 años

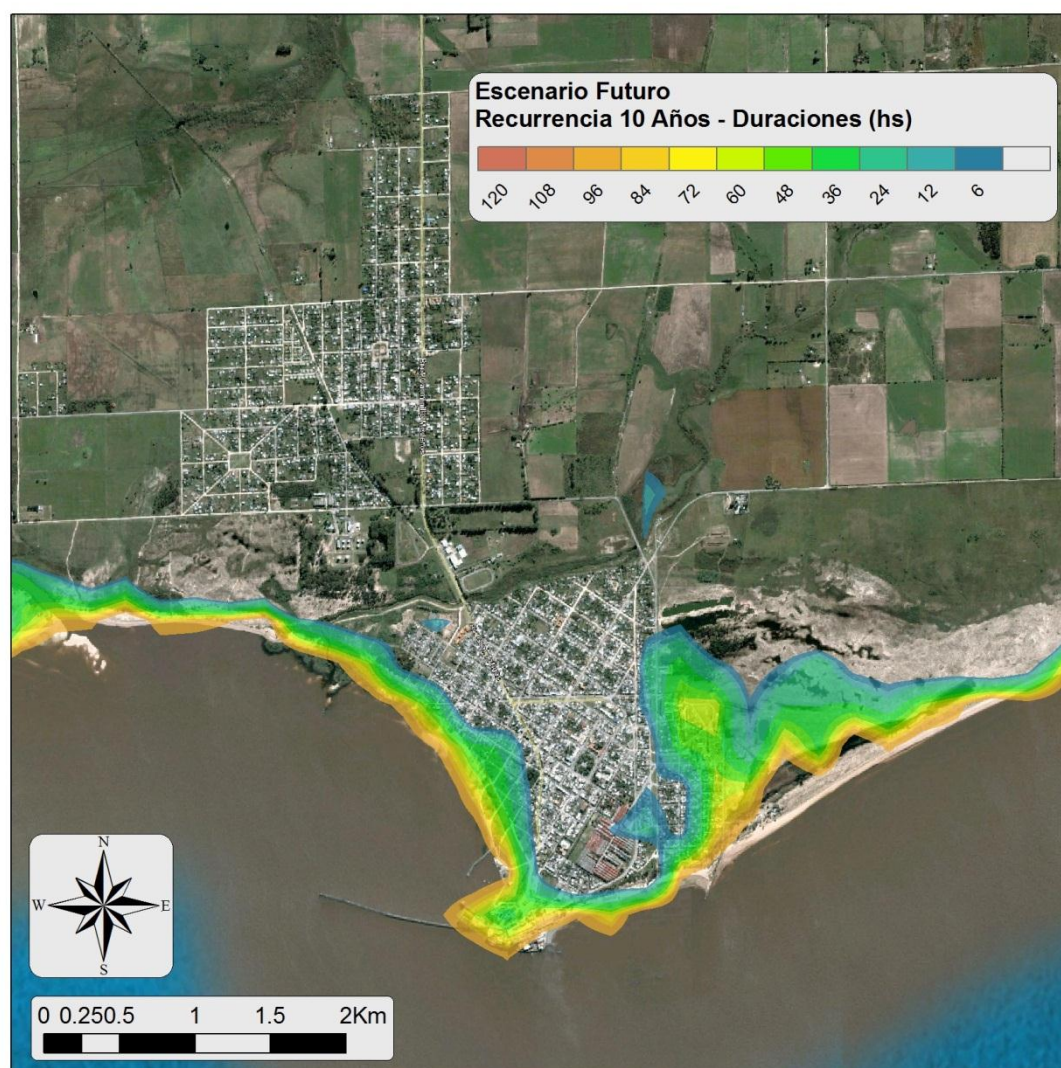


b) 10 años

Figura 4.3.5. Mapas de alturas de inundación para el escenario Futuro y distintas recurrencias. Juan Lacaze.



a) 2 años



b) 10 años

Figura 4.3.6. Mapas de duración de inundación para el escenario Futuro y distintas recurrencias. Juan Lacaze.

4.4 Carmelo

En la Tabla 4.4.1 se indican los valores de niveles pico asociados a los dos escenarios y las dos recurrencias consideradas.

Tabla 4.4.1. Niveles pico (m IGN) para Carmelo.

Escenario	Recurrencia	
	2 años	10 años
Línea de Base	3,14	3,53
Futuro	3,96	4,58

La Figura 4.4.1 muestra los mapas de área de inundación para el escenario de Línea de Base. Se observa que, además de una franja costera, aparece como afectada una amplia zona interior, poco urbanizada.

En la Figura 4.4.2 se presentan los mapas de alturas de inundación para este escenario. En las zonas urbanizadas se observan alturas máximas menores a 0,50 m para 2 años de recurrencia, y menores a 1,00 m para 10 años de recurrencia.

Los mapas de duración de inundación se muestran en la Figura 4.4.3. En las zonas urbanizadas se observan duraciones máximas mayores a 12 horas para 2 años de recurrencia, y mayores a 24 horas para 10 años de recurrencia.

Los mapas correspondientes al Escenario Futuro se presentan en las Figuras 4.4.4 a 4.4.6.

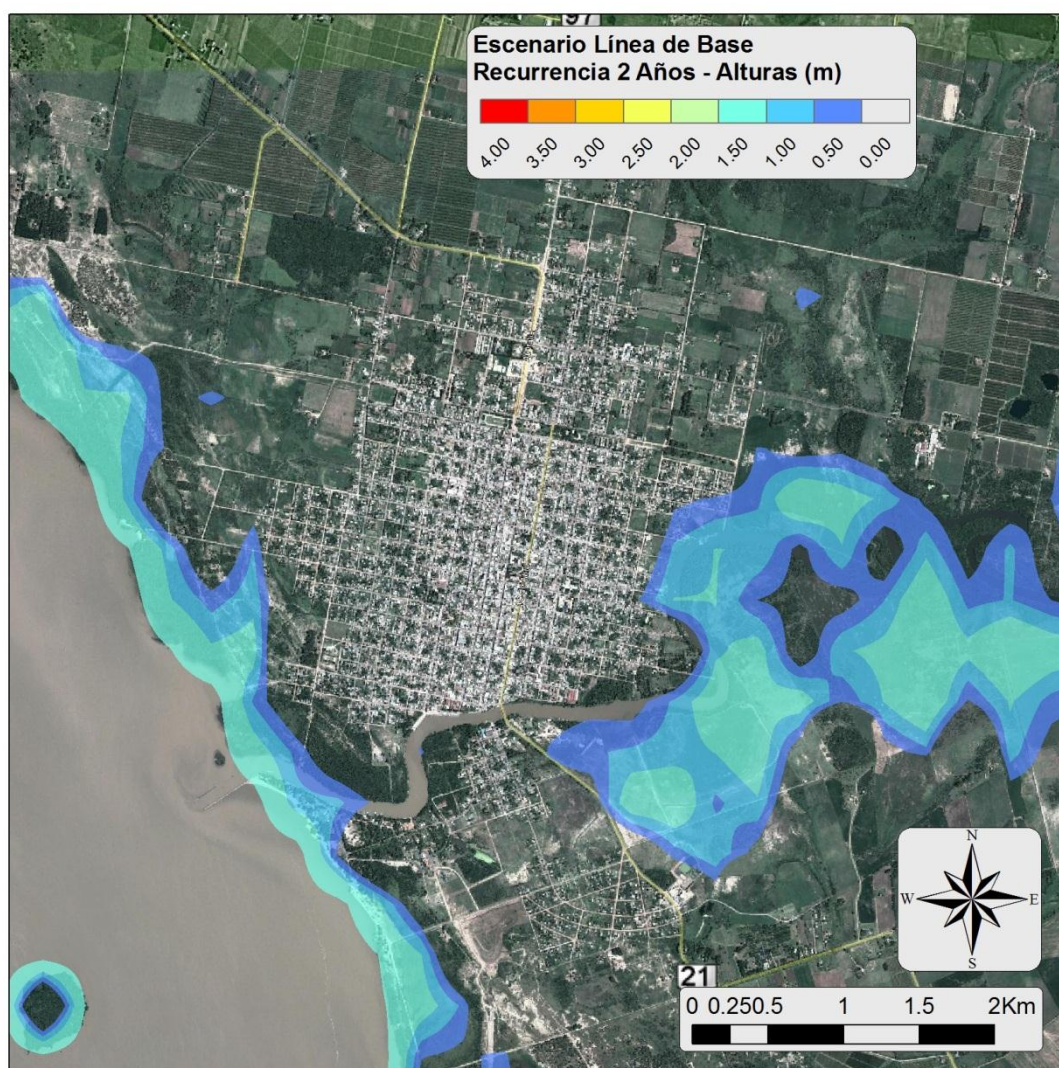


a) 2 años

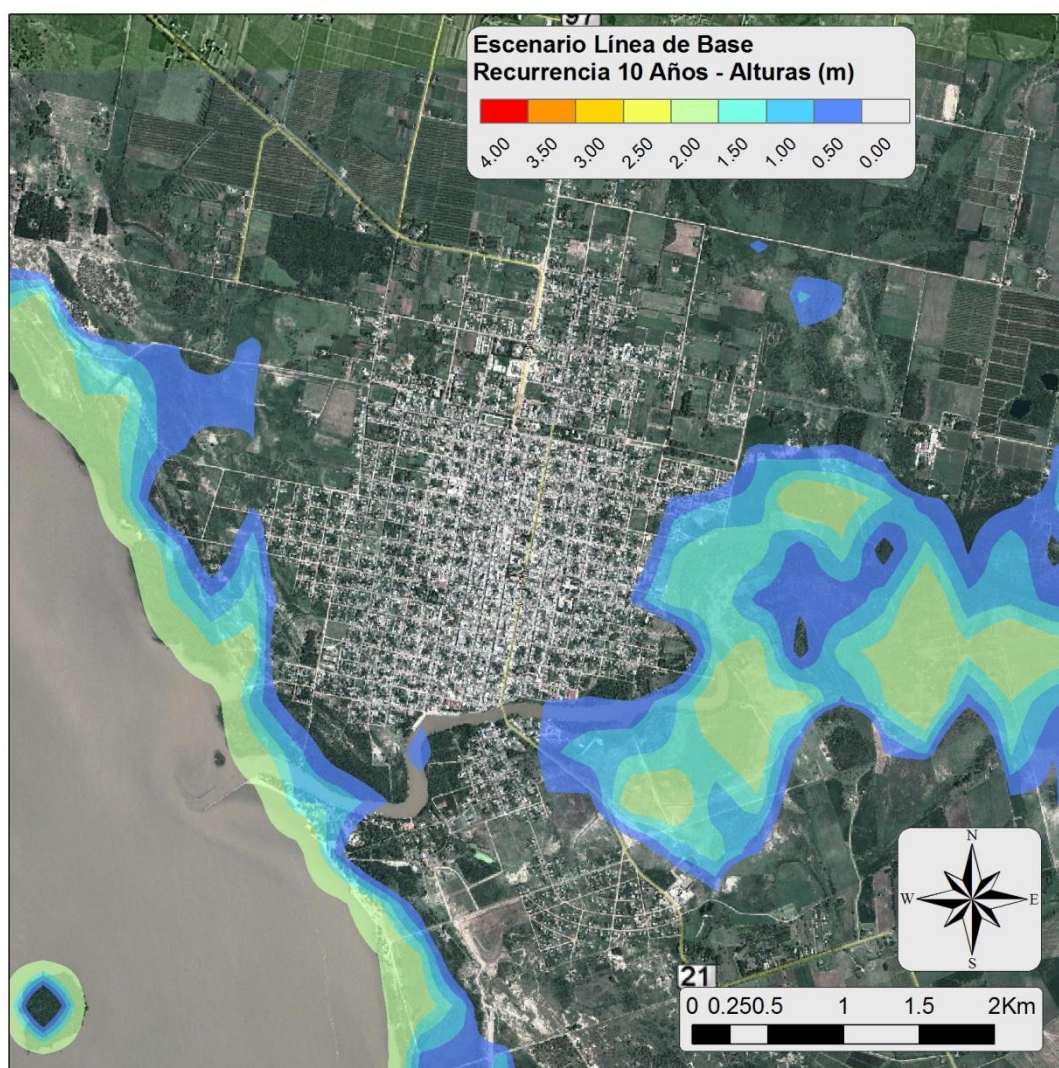


b) 10 años

Figura 4.4.1. Mapas de área de inundación para el escenario de Línea de Base y distintas recurrencias. Carmelo.

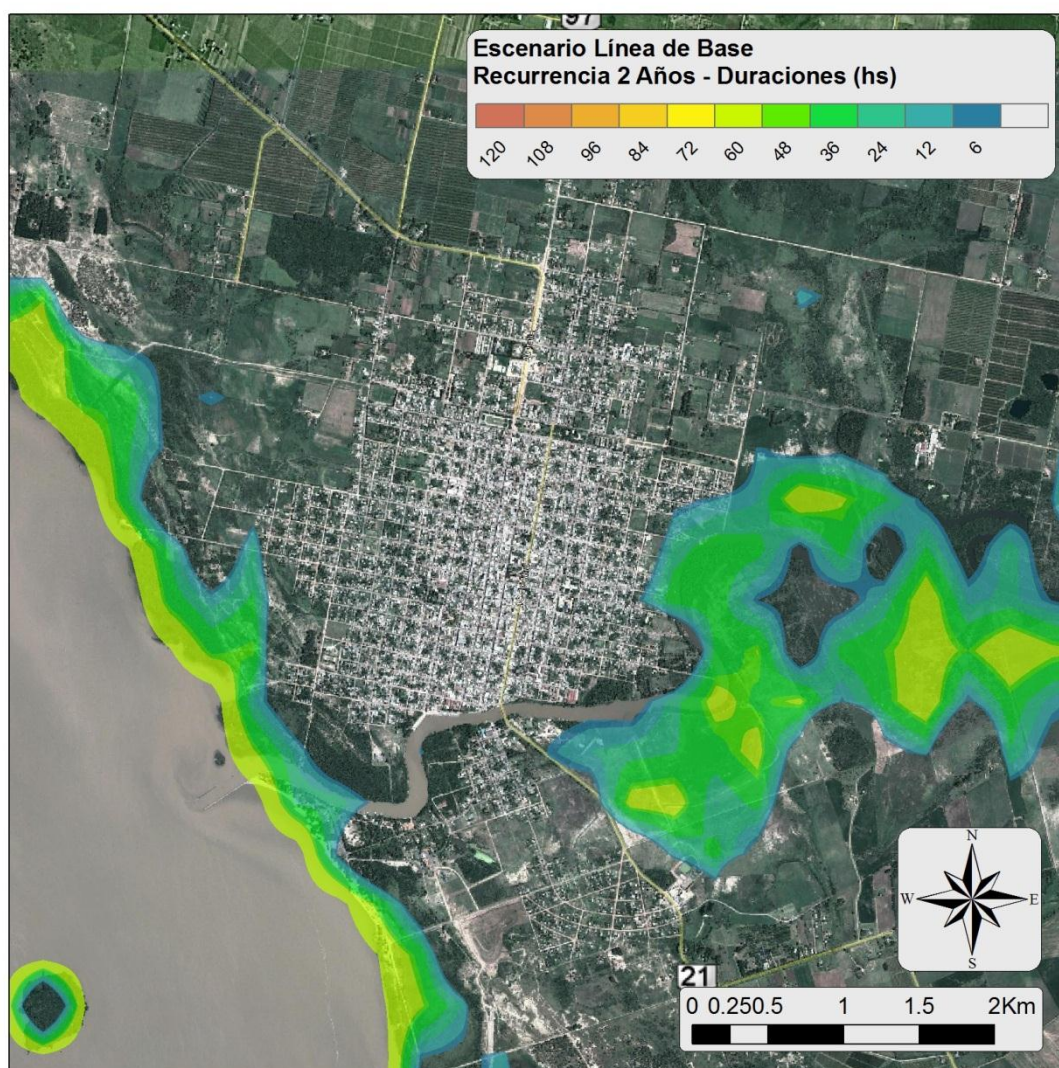


a) 2 años

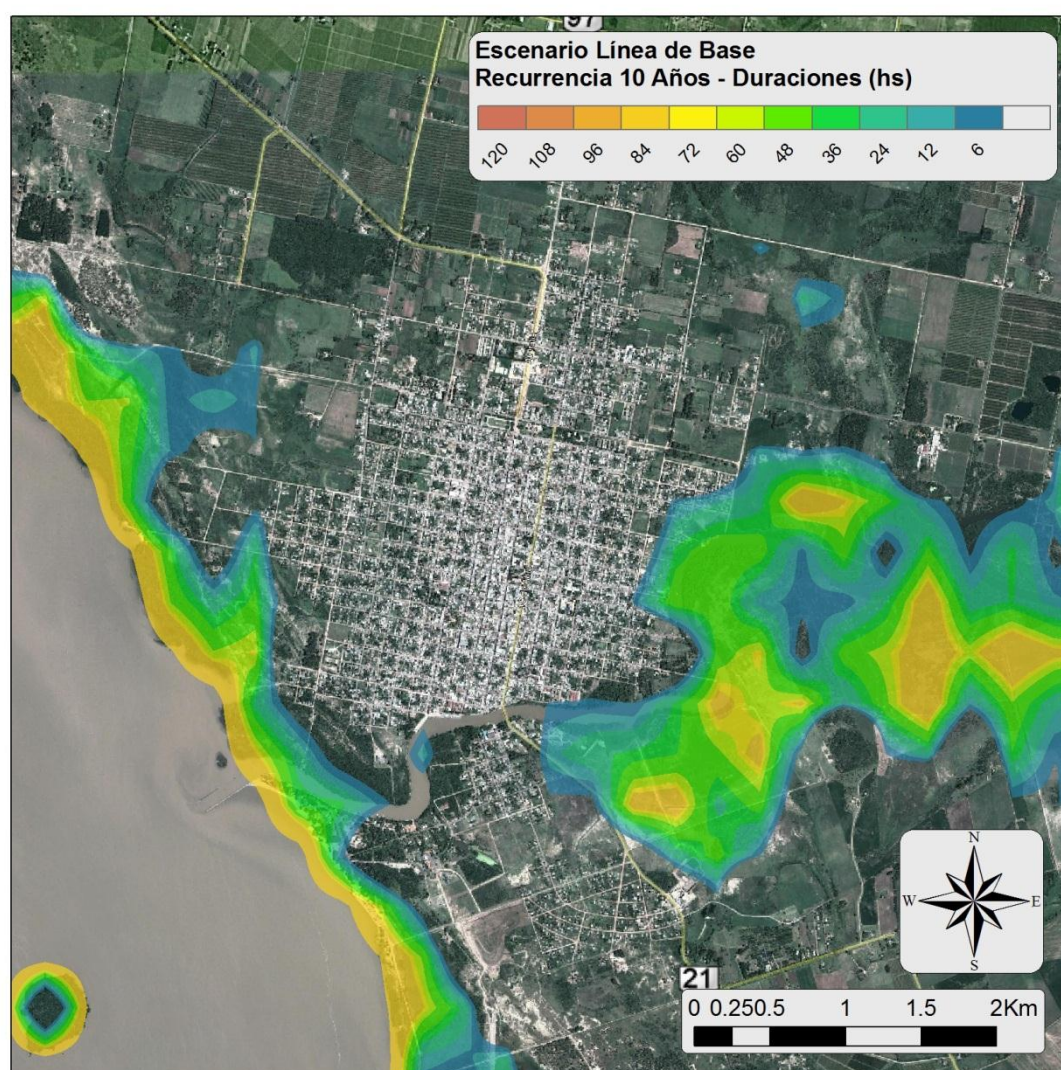


b) 10 años

Figura 4.4.2. Mapas de alturas de inundación para el escenario de Línea de Base y distintas recurrencias. Carmelo.



a) 2 años



b) 10 años

Figura 4.4.3. Mapas de duración de inundación para el escenario de Línea de Base y distintas recurrencias. Carmelo.

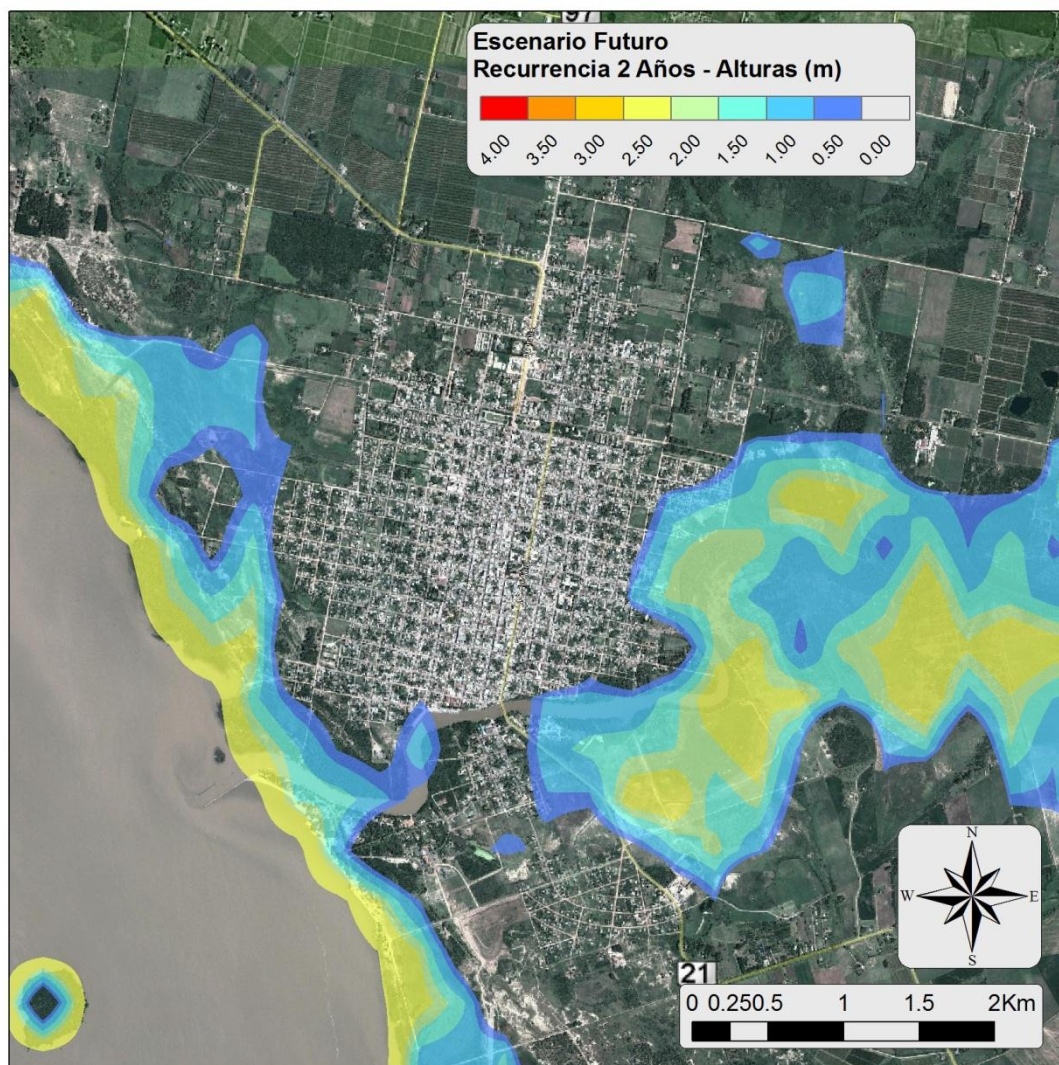


a) 2 años

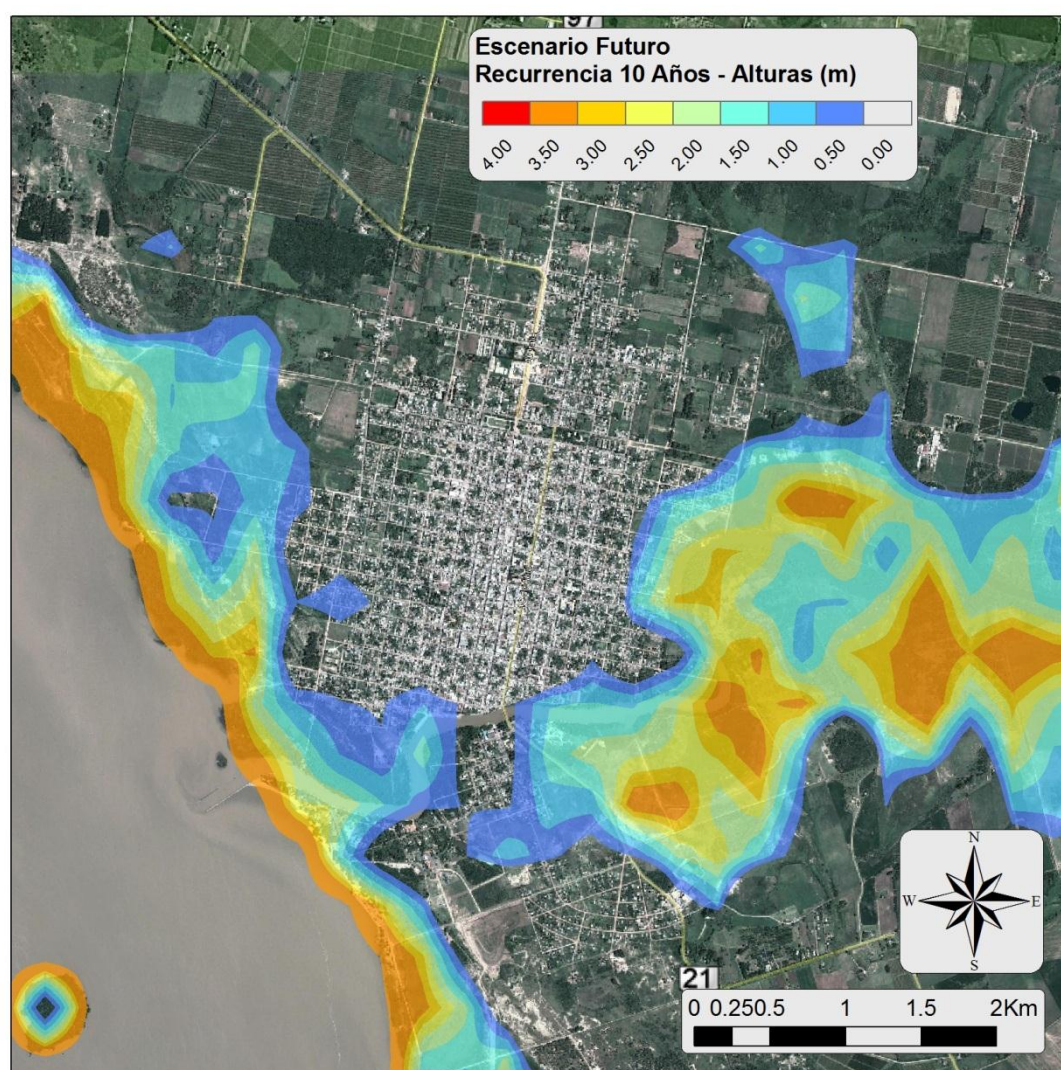


b) 10 años

Figura 4.4.4. Mapas de área de inundación para el escenario Futuro y distintas recurrencias. Carmelo.

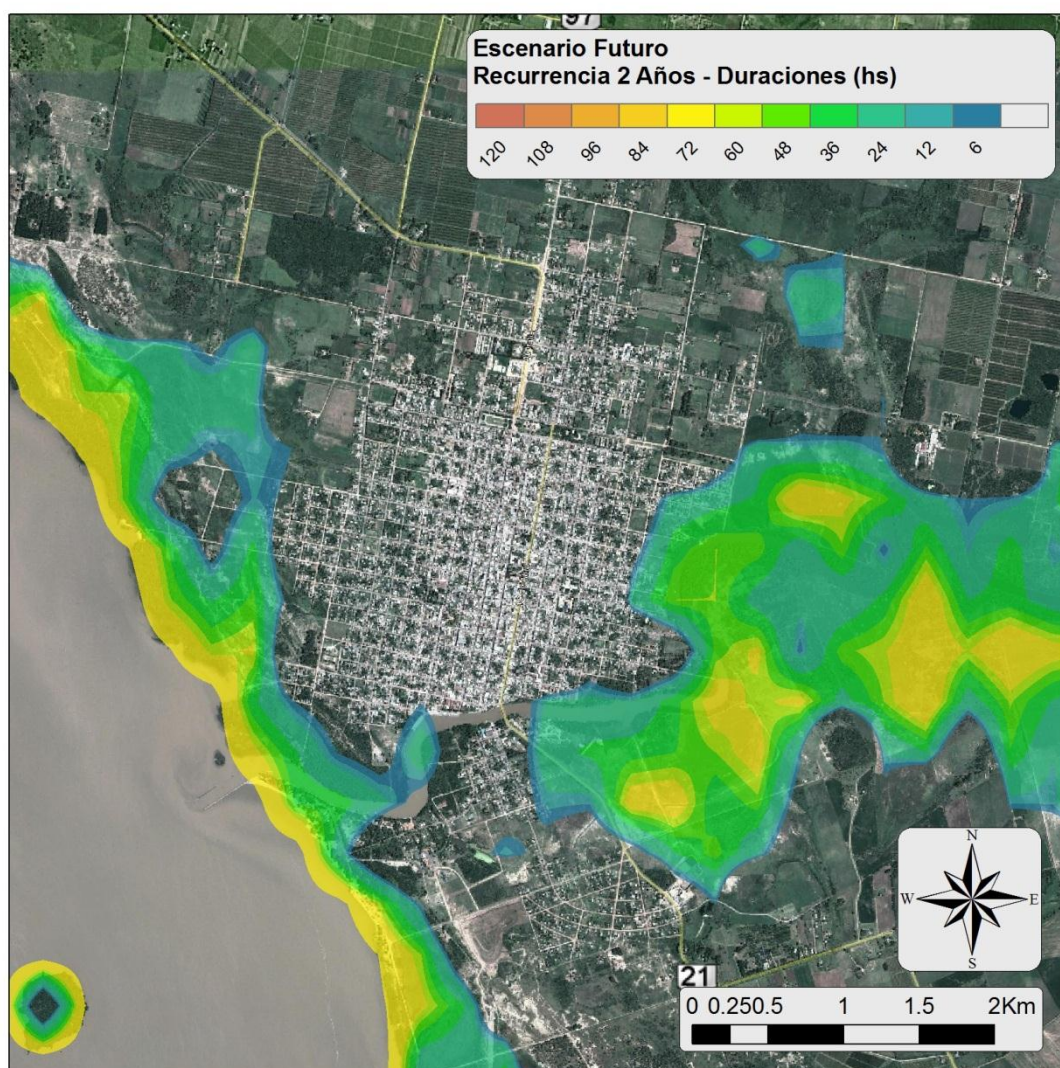


a) 2 años

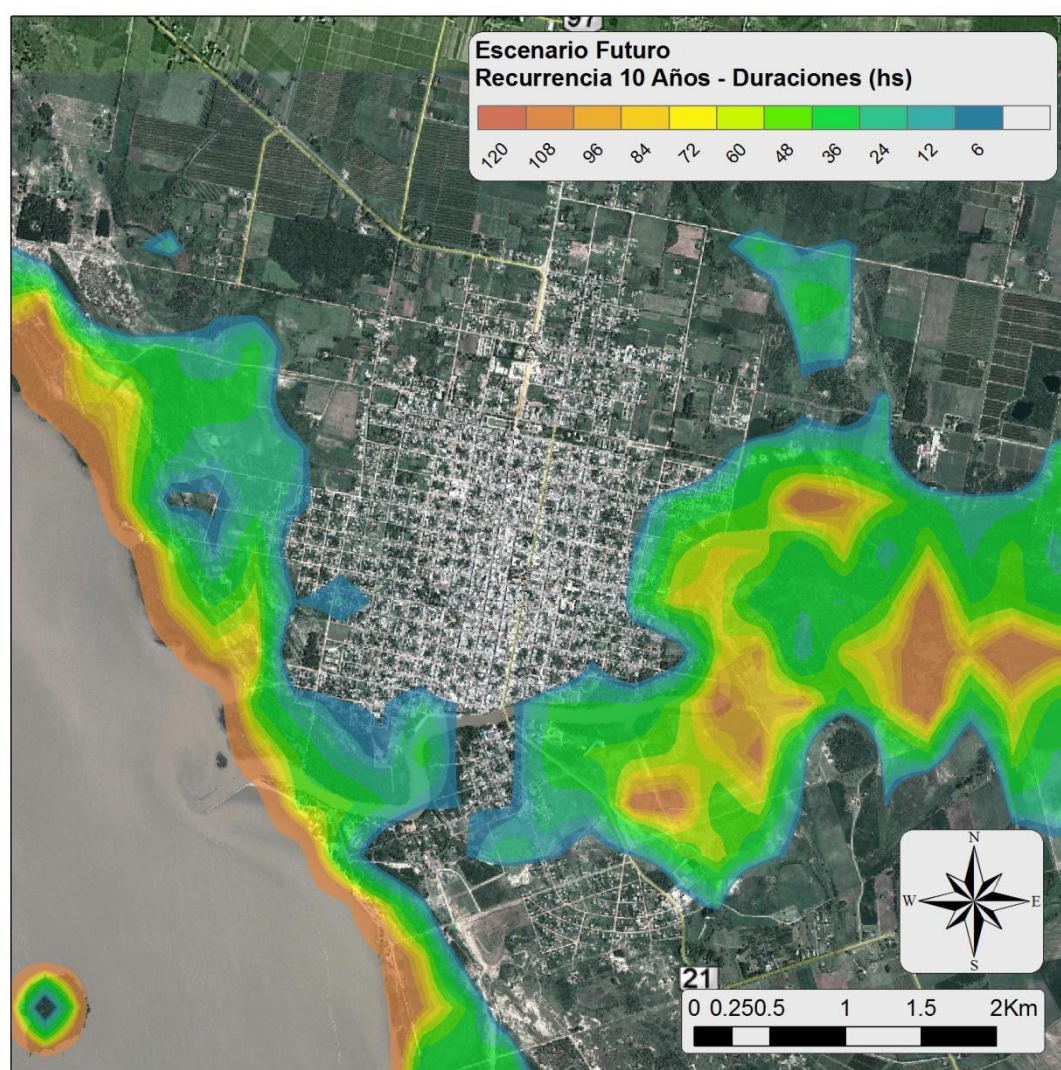


b) 10 años

Figura 4.4.5. Mapas de alturas de inundación para el escenario Futuro y distintas recurrencias. Carmelo.



a) 2 años



b) 10 años

Figura 4.4.6. Mapas de duración de inundación para el escenario Futuro y distintas recurrencias. Carmelo.

5 CONCLUSIONES

Las principales conclusiones del estudio son las siguientes:

- Se han producido mapas de riesgo de inundación para cuatro localidades costeras del Río de la Plata: San Fernando y Tigre, sobre la margen argentina, y Carmelo y Juan Lacaze, sobre la margen uruguaya.
- Los mapas de niveles de inundación muestran el área inundada para el pico de la crecida. Los mapas de altura de inundación indican la distribución espacial de alturas máximas de agua esperables sobre el área inundada. Los mapas de duración de inundación indican la distribución espacial de tiempos de duración de la inundación sobre el área inundada.
- Se presentan mapas para un Escenario de Línea de Base, que corresponde a la década de 1990, y para un Escenario Futuro, que corresponde a la década de 2030. Para cada escenario, se muestran mapas para períodos de retorno de 2 y 10 años.
- En el caso de las dos localidades argentinas, se observa que la inundación ocupa toda el área baja de Tigre y el valle de inundación del río Reconquista. Los mapas no tienen en cuenta que en esta última zona, algunas áreas podrían estar protegidas por obras efectuadas como parte del proyecto de sistematización de la cuenca. Algo similar podría ocurrir en la zona baja de Tigre donde se efectuaron grandes desarrollos urbanos. Para el Escenario de Línea de Base, las alturas máximas de inundación resultan mayores a 1,50 m para 2 años de recurrencia, y mayores a 2,00 m para 10 años de recurrencia; por su parte, las duraciones máximas son mayores a 2 días para 2 años de recurrencia, y mayores a 2,5 días para 10 años de recurrencia.
- En el caso de la localidad de Juan Lacaze, se observa que la zona de afectación es una franja costera. Para el Escenario de Línea de Base, en las zonas urbanizadas se observan alturas máximas mayores a 0,50 m para 2 años de recurrencia, y mayores a 1,00 m para 10 años de recurrencia; por su parte las duraciones máximas son

mayores a 1 día para 2 años de recurrencia, y mayores a 1,5 días para 10 años de recurrencia.

- En el caso de la localidad de Carmelo, se observa que, además de una franja costera, aparece como afectada una amplia zona interior, poco urbanizada. Para el Escenario de Línea de Base, en las zonas urbanizadas se observan alturas máximas menores a 0,50 m para 2 años de recurrencia, y menores a 1,00 m para 10 años de recurrencia; por su parte las duraciones máximas son mayores a 12 horas para 2 años de recurrencia, y mayores a 24 horas para 10 años de recurrencia.
- El Escenario Futuro indica incrementos significativos en el área inundada, las alturas de agua sobre el terreno y la duración de la inundación respecto del de Línea de Base, lo cual responde a la severidad del cambio incorporada en los forzantes del modelo. En efecto, el escenario de Cambio Climático utilizado es conservativo, tanto en lo que respecta a la elevación del nivel medio del mar, como a la variación del patrón de vientos. Los mapas de inundación para el Escenario Futuro se consideran, entonces, indicativos de tendencias y orden de magnitud de los cambios, aunque resultaría recomendable encarar proyecciones con escenarios menos exigentes.
- Las lluvias torrenciales que precipitan sobre la parte continental también pueden provocar inundaciones en la zona costera. Este fenómeno, cuya oportunidad de ocurrencia correlaciona muy débilmente con las Sudestadas, no es considerado en este estudio.
- El modelo no tiene en cuenta la existencia de eventuales zonas ‘polderizadas’, es decir, defendidas de la inundación mediante terraplenes. De existir, ellas deberían ser explícitamente excluidas.
- Para mejorar la precisión de los mapas de alturas de inundación es necesario mejorar la precisión de los MDE, contruidos exclusivamente en base a observaciones satelitales de acceso público. Para ello se recomienda encarar un ajuste a datos topográficos locales en las zonas de inundación.
- Los contornos costeros que surgen de los resultados del modelo muestran desajustes con la línea de costa local debido a la escala de resolución del MDE (270 metros).

REFERENCIAS

1. Fiore, M., D'Onofrio, E., Di Biase, F., Stadelmann, M. (2001). "Statistical analysis of storm surges in Buenos Aires". Join Assemblies of the International Association for the Physical Sciences of the Oceans and International Association for Biological Oceanography, Mar del Plata, Argentina.
2. Lecertúa, E.A. (2010) "Análisis de riesgo de duración de inundaciones en las áreas costeras del Río de la Plata considerando el Cambio Climático", tesis de graduación, Facultad de Ingeniería, UBA.
3. 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).
4. Re, M., Menéndez, A.N. (2003). "Modelo Numérico del Río de la Plata y su Frente Marítimo para la Predicción de los Efectos del Cambio Climático", XIII Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones, ENIEF'2003, Bahía Blanca, Argentina.
5. Re, M., Menéndez, A.N. (2007). "Impacto del Cambio Climático en las Costas del Río de la Plata", Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, 7 (1).
6. Yue, S. (2001). "The Gumbel logistic model for representing a multivariate storm event", Advances in Water Resources, vol. 24, pp. 179 – 185.