

**ANÁLISIS HIDRODINÁMICO BIDIMENSIONAL
DEL EMPRENDIMIENTO AMARRAS DEL
GUALEGUAYCHÚ**

INFORME FINAL

JUNIO 2016

GRUPO GECRU

INFORME FINAL

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	4
2. ANÁLISIS DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS ANTECEDENTES	7
2.1 CAUDALES DEL RÍO GUALEGUAYCHÚ	7
2.1.1 Estudios de las consultoras BISA e INCOCIV	7
2.1.2 Análisis de las condiciones de caudal adoptadas en el estudio BISA.	11
2.1.3 Posible influencia del Cambio Climático	12
2.2 NIVELES DE AGUA	20
2.2.1 Estudios de las consultoras BISA e INCOCIV	20
2.2.2 Análisis de datos de nivel adoptados	23
3. MODELACIÓN HIDRÁULICA UNIDIMENSIONAL	24
3.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO Y ALCANCE DE LAS TAREAS	24
3.2 IMPLEMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO	25
3.3 CONDICIONES DE BORDE	29
3.3.1 Caudales aguas arriba	29
3.3.2 Niveles aguas abajo	32
3.4 ANÁLISIS DE LA INUNDABILIDAD ACTUAL DEL ÁREA	33
3.5 ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN CON PROYECTO	40
3.5.1 Resultados del estudio de BISA	40
3.5.2 Escenario Base (caudal promedio entre Escenarios 2 y 3 de precipitación)	41
3.5.3 Análisis de Sensibilidad A (“Tormenta perfecta” maximizada Escenario 3)	50
3.5.4 Análisis de Sensibilidad B (“Tormenta perfecta” más Cambio Climático)	51
3.5.5 Análisis de Sensibilidad C (“Tormenta perfecta” más Cambio Climático con nivel aguas abajo correspondiente al año 1959 - Sudestada y crecida del río Uruguay)	52
3.5.6 Análisis de Sensibilidad D (Condición similar a la ocurrida en el año 1959 – Crecida del río Gualeguaychú de 100 años de recurrencia, Sudestada y crecida del río Uruguay)	53

4. MODELACIÓN HIDRÁULICA BIDIMENSIONAL	55
4.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO	55
4.2 IMPLEMENTACIÓN	58
4.3 ESCENARIOS DE EXPLOTACIÓN Y SÍNTESIS DE RESULTADOS	63
4.4 RESULTADOS PARA CRECIDA BASE DE 20 AÑOS DE RECURRENCIA	66
4.5 RESULTADOS PARA CRECIDA BASE DE 100 AÑOS DE RECURRENCIA	70
4.6 RESULTADOS PARA CRECIDA BASE DE 500 AÑOS DE RECURRENCIA	74
4.7 RESULTADOS PARA CRECIDA DE 500 AÑOS DE RECURRENCIA SENSIBILIDAD A (TORMENTA PERFECTA)	78
4.8 RESULTADOS PARA CRECIDA DE 500 AÑOS DE RECURRENCIA SENSIBILIDAD C (TORMENTA PERFECTA + CAMBIO CLIMÁTICO + CRECIDA RÍO URUGUAY Y SUDESTADA)	82
4.9 RESULTADOS PARA CRECIDA DE 500 AÑOS DE RECURRENCIA, SENSIBILIDAD A CON Y SIN VARIACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE RUGOSIDAD	86
5. CONCLUSIONES GENERALES	88
5.1 CONCLUSIONES SOBRE LA VALIDACIÓN DE LOS ESTUDIOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS UNIDIMENSIONALES PREVIOS	88
5.2 CONCLUSIONES SOBRE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS VARIACIONES DE NIVEL Y VELOCIDAD GENERADAS POR EL EMPRENDIMIENTO	90

1. INTRODUCCIÓN

El emprendimiento denominado “Amarras del Gualeguaychú” es una urbanización que se desarrollará en la margen izquierda del río Gualeguaychú, localizado en el municipio de Pueblo General Belgrano. El mismo presenta diversos alteos del terreno natural, realizados sea para construir caminos de acceso como para la implantación de viviendas y servicios conexos, y la excavación de una laguna artificial, conectada con el río Gualeguaychú mediante un canal. La siguiente figura ilustra su ubicación general.

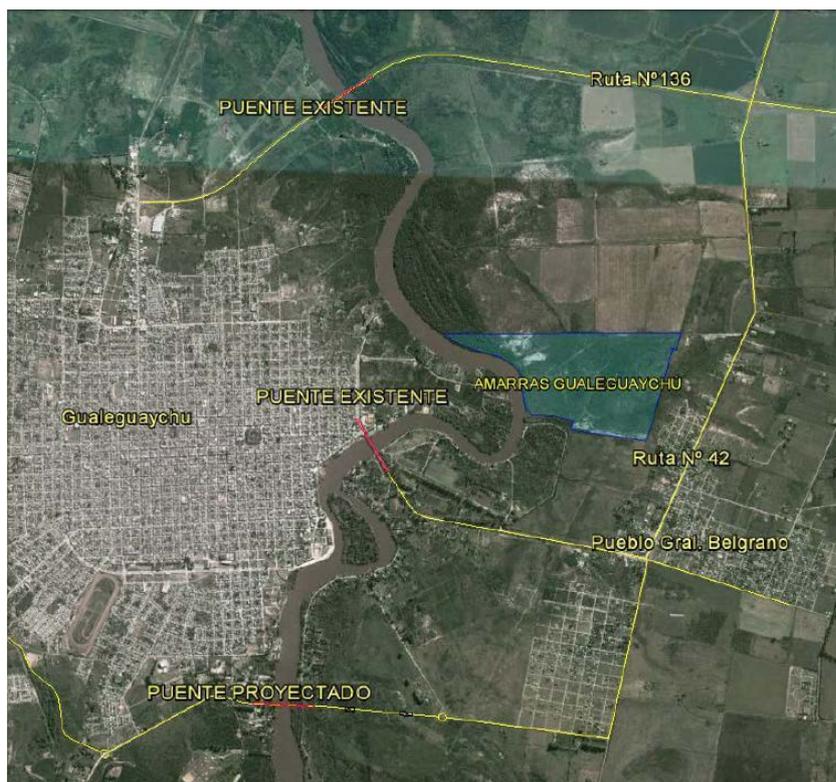


Figura Nº 1. Localización del emprendimiento Amarras del Gualeguaychú.

El emprendimiento que se denominará en lo sucesivo como “Amarras” por razones de brevedad, abarca parcialmente zonas inundables aledañas al cauce del río Gualeguaychú, en la zona que habitualmente se denomina como “Planicie de Inundación”, debido a que la misma resulta anegada en condiciones de crecida.

Se han realizado estudios hidrológicos e hidráulicos a través de la consultora Barbagelata Ingeniería S.A. (BISA), los cuales permitieron estimar los caudales conducidos por el río Gualeguaychú para diferentes recurrencias, y determinar las curvas de remanso en régimen permanente (caudal constante), para condiciones de nivel en la desembocadura en el río Uruguay (Estación Boca del Gualeguaychú) correspondientes a un 2% y 10% de frecuencia de superación, definidas por la Dirección de Hidráulica de Entre Ríos (DHER).

Estos estudios, que fueron realizados con el modelo unidimensional (1D) HEC-RAS, de uso estándar y ampliamente extendido y validado en el país y el exterior para evaluar problemas de hidráulica fluvial, indicaron que el predio no se inunda con recurrencia 2 años de caudal, mientras que se inunda parcialmente con recurrencia 5 años y superior.

Asimismo, a través de los estudios se estimaron las sobreelevaciones generadas por la ocupación que el emprendimiento genera en la planicie, las cuales resultaron ser de algunos centímetros aguas arriba del mismo, variando según la recurrencia del caudal. Se determinó además una reducción del nivel de agua a la altura del emprendimiento, debido al incremento de velocidades del agua en el cauce.

Debido a su concepción unidimensional y limitaciones intrínsecas, la modelización con HEC-RAS consideró que toda la zona ocupada por los límites del predio, se encuentra fuera del área de escurrimiento del río, lo cual es una simplificación conservativa (del lado de la seguridad), debido a que el emprendimiento no se encuentra polderizado, sino que es abierto para la penetración del flujo en su interior. Por otro lado, la modelización se realizó en forma estacionaria (caudal fijo), lo cual no permite evaluar los efectos de impermanencia de la onda de crecida, que se traducen en una reducción del caudal pico y del nivel debido al almacenamiento lateral en las zonas de planicie y en el propio cauce.

Los estudios hidrológicos tomados por BISA como base para el análisis, fueron generados por INCOCIV SRL para el Proyecto del “Nuevo Puente sobre el Río Gualeguaychú, entre Gualeguaychú y Pueblo Gral. Belgrano” desarrollado para el Consejo Federal de Inversiones (CFI), según consta en los estudios previos, y han sido validados por la Dirección de Hidráulica de Entre Ríos (DHER), la cual además solicitó por nota del 29 de julio de 2014, que el nivel en la desembocadura en el río Uruguay, se especificara como el superado 2% del tiempo en la Estación Boca del Gualeguaychú.

En cuanto a los caudales, evaluados para recurrencias entre 2 y 500 años, los mismos se corresponden con una situación promedio entre una crecida con distribución de lluvia uniforme en tiempo pero desfavorable espacialmente, y la peor condición posible (y menos probable), de una crecida desfavorable en tiempo y espacio, la cual presenta caudales aproximadamente un 15% superiores al valor promedio adoptado para cada recurrencia.

El objeto del presente estudio, es realizar una evaluación bidimensional más detallada de la afectación que provocaría la construcción de Amarras del Gualeguaychú considerando su implantación completa (en todas sus Etapas previstas), tanto desde el punto de vista del incremento de los niveles de agua (y de las superficies inundadas), como de las variaciones de velocidad del agua en el cauce fluvial incluyendo el entorno de la zona de obra y las zonas inundables de ambas márgenes del río.

Para ello se desarrolla y aplica un modelo matemático hidrodinámico bidimensional (2D) de un sector del cauce y planicie inundable del río Gualeguaychú tal que permita identificar los procesos hidráulicos que generan cambios en los niveles y velocidades del flujo de agua en condiciones de crecida. Para que dicho modelo pueda simular adecuadamente el sector bajo análisis, se requiere especificarle condiciones de borde aguas abajo (de nivel de agua) y aguas arriba (de caudal).

En una primera Etapa del estudio, se han identificado los parámetros de cálculo que luego se especifican como condiciones de borde del modelo 2D, a partir de un análisis de los resultados previos del modelo 1D, y se presentan los resultados de simulaciones adicionales que fueron realizadas con dicho modelo, las cuales permitieron ampliar el rango de escenarios de caudal y niveles considerados, a modo de análisis de sensibilidad.

El documento de referencia que sirve de base a la presente evaluación, es el Informe “Estudios Hidrológicos e Hidráulicos”, elaborado por BISA, de fecha 15/08/2014, para la empresa promotora (Amarras del Gualeguaychú) y la Consultora responsable de los estudios ambientales (Ambiente y Territorio S.A.).

Los aspectos principales abarcados por dicho Informe son los siguientes:

Estudios hidrológicos

- i. Caudales del río Gualeguaychú
- ii. Análisis de alturas (niveles de agua)
 - a) Puerto Gualeguaychú
 - b) Estación Boca Gualeguaychú

Modelación hidráulica

- i. Objetivos y Descripción del modelo
- ii. Calibración
- iii. Condiciones de borde
- iv. Metodología para el análisis del impacto por la intrusión en el valle
- v. Análisis de la inundabilidad del terreno en la situación actual
- vi. Análisis de la situación con proyecto

Se desarrolla entonces en primer lugar el análisis y verificación de estos aspectos.

Luego se presenta la implementación del modelo bidimensional y los resultados obtenidos que permiten ilustrar más detalladamente la magnitud y distribución espacial de las modificaciones del nivel y velocidad del agua producidas por la presencia del emprendimiento Amarras del Gualeguaychú.

Finalmente, se presentan las conclusiones obtenidas.

2. ANÁLISIS DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS ANTECEDENTES

2.1 CAUDALES DEL RÍO GUALEGUAYCHÚ

2.1.1 Estudios de las consultoras BISA e INCOCIV

Los estudios hidrológicos empleados por BISA para establecer los caudales con los cuales se verificó el impacto del emprendimiento en los niveles de agua, son los previamente realizados por la firma INCOCIV Consultora para el Consejo Federal de Inversiones (CFI), y que constan en el Informe “Estudios de Ingeniería, Socio-Económico y Ambiental, y Proyecto del Nuevo Puente sobre el Río Guauguaychú, entre Guauguaychú y Pueblo Gral. Belgrano – Provincia de Entre Ríos“. A continuación se referenciará dicho informe como “estudio del Nuevo Puente“.

La selección de los parámetros de diseño adoptados por BISA, correspondientes al caudal pico del río Guauguaychú para cada recurrencia, y los niveles del río Uruguay en la estación Boca del Guauguaychú, es la misma que la efectuada en el estudio del Nuevo Puente. En particular, la selección del nivel de agua en el río Uruguay por parte de BISA, correspondiente al nivel superado o igualado el 2% del tiempo, fue establecida por la Dirección de Hidráulica de Entre Ríos (DHER) en su nota del 29 de julio de 2014.

Con respecto a la determinación de caudales para diferentes recurrencias, el Informe del Nuevo Puente presenta un detallado estudio hidrológico, el cual se describe brevemente a continuación, incluyendo copias textuales de fragmentos del mismo.

La cuenca del río Guauguaychú comprende una superficie total de 6.982 Km² en su desembocadura, y la estación de aforos de Ruta Prov. Nro 39 se ubica en su parte superior, comprendiendo una superficie de 1980 km². Esta estación no está influenciada por la curva de remanso del río Uruguay y es representativa del régimen hidrológico del río Guauguaychú sin influencias del río Uruguay. Los datos de niveles y caudales medios diarios fueron proporcionados por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (período 1987/2011 con años faltantes).

Se realizaron diversas tareas a los efectos de completar la serie de datos y poder estimar una ley de ajuste altura – caudal en la estación, así como evaluar caudales extremos para diferentes recurrencias, en base a los datos de caudales medios diarios (cuyo máximo para el período analizado alcanzó los 631 m³/s).

Se adoptó como distribución de mejor ajuste la de Pearson, lo cual resulta razonable en función de los gráficos presentados, con lo cual el caudal medio diario para la recurrencia máxima solicitada por la DHER de 500 años, resultó igual a 787 m³/s, correspondiente a un nivel de 9,43 m calculado con la curva altura – caudal para caudales medios diarios. Con dicho nivel, se estimó un caudal pico (instantáneo) igual a 981 m³/s, para esta recurrencia, empleando una función de ajuste exponencial estimada como la envolvente de los máximos caudales medios diarios, lo cual se juzgó más adecuado que emplear los datos de aforos disponibles, que sólo abarca datos con caudales inferiores a 200 m³/s y alturas inferiores a 8 metros, y que presenta una dispersión relevante.

La evaluación hidrológica se basó en dos etapas:

- Etapa 1 - Caracterización de la cuenca de aportes y delimitación de subcuencas. Generación del modelo de cuenca aplicando la extensión Hec-GeoHms para ArcView.
- Etapa 2 – Determinación de tormentas de diseño, calibración del modelo para la parte superior de la cuenca con los datos de la estación de aforos de Ruta Prov. Nro 39 y ajuste de parámetros en forma similar para toda la cuenca.

Se realizó en primer lugar un detallado estudio del uso de suelo en la cuenca, basado en el procesamiento y clasificación supervisada de imágenes satelitales, clasificando los siguientes usos: 1 Agua, 2 Suelo, 3 Cultivo – Pastizal, 4 Pradera, 5 Monte cerrado, 6 Forestación, 7 Bañado – anegadizo, 8 Pradera arbolada, 9 Urbano – Antropizado.

A cada pixel o fracción de pixel según su uso se le asignó un valor de número de curva CN, de acuerdo al Grupo Hidrológico, determinado empleando los datos de suelos del INTA. El mapa de usos de suelo se unió al mapa de suelos del INTA y se calculó el valor del CN del Soil Conservation Service para cada polígono de la cuenca que tiene un uso de suelo y tipo de suelo particular, asociado a un grupo hidrológico o fraccionado en función de estos. Se determinaron luego las subcuencas y se asignaron a cada una de ellas los valores de CN promedio correspondientes, además de calcular sus parámetros fisiográficos, necesarios para la modelización hidrológica, que fue realizada con el modelo HEC-HMS, de uso libre y muy extendido.

Las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) empleadas, fueron desarrolladas por la Facultad Regional Concordia de la Universidad Tecnológica Nacional, para la localidad de Concepción del Uruguay ("Procedimientos para la Estimación de Tormentas de Diseño para la provincia de Entre Ríos", E. Zamanillo y otros, 2009). No obstante, como estas curvas abarcan sólo hasta 24 horas, y el tamaño de la cuenca requiere emplear tormentas de diseño de mayor duración, se ampliaron las mismas a través de los análisis de los datos históricos máximos precipitados en la estación INTA de C. del Uruguay, ajustados apropiadamente para considerar la diferencia entre la precipitación máxima del día calendario y la media móvil de 24 horas. Se realizó un ajuste de extremos definiendo así las curvas IDF para duraciones de 1, 2, 3, 4, 6, 8 y 10 días.

Empleando curvas de atenuación areal y en base a los estudios de precipitaciones de más de 1 día de duración de la Estación del INTA de Concepción del Uruguay se diseñaron tormentas, que luego de calibrado el modelo se aplicaron a la cuenca superior del río Gualeguaychú, logrando un adecuado ajuste con los caudales evaluados para la estación de aforos de la Ruta Prov. Nro. 39 para distintas recurrencias.

Un análisis similar se realizó con las precipitaciones diarias de la estación meteorológica del Aeropuerto de Gualeguaychú del Servicio Meteorológico Nacional, con una serie más larga. También se estudiaron tormentas mayores a 24hs de duración, llegando hasta 12 días de duración. Comparando con las curvas obtenidas de la Estación INTA de Concepción del Uruguay, las curvas IDF de la estación del SMN Gualeguaychú resultaron de mayor intensidad que las del INTA Concepción del Uruguay, con mayor diferencia para la curva de 500 años de recurrencia, según se ilustra en la siguiente figura.

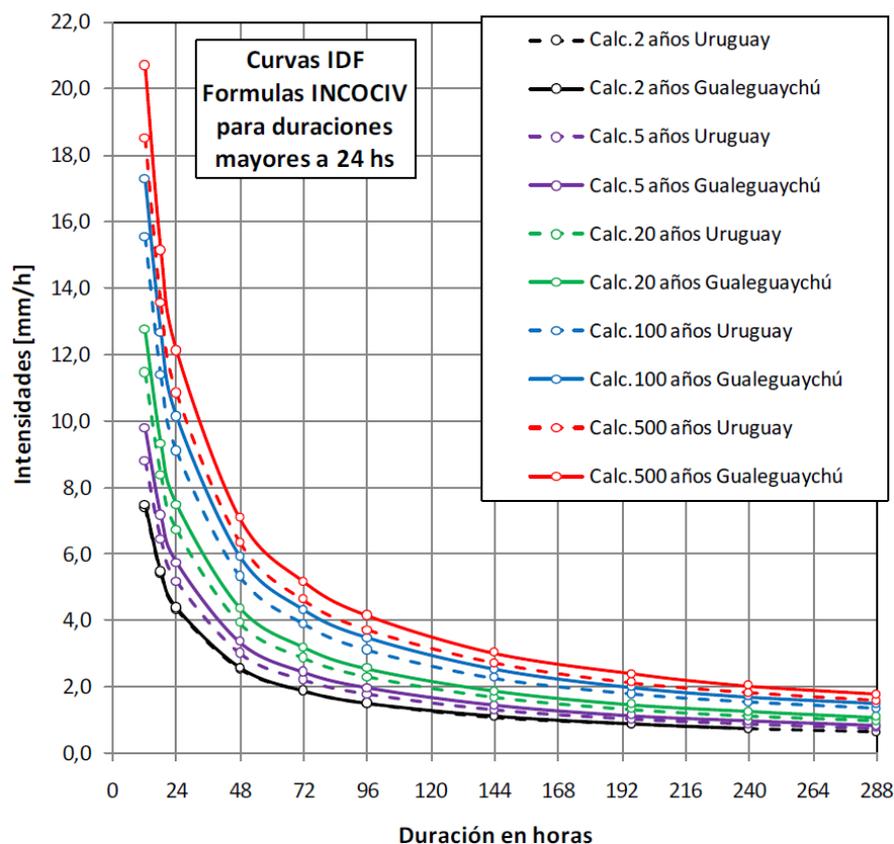


Figura 2-1: Curvas Intensidad - Duración - Frecuencia

A modo de síntesis, se puede estimar que las intensidades en Gualeguaychú son de un orden del 10% superior a las intensidades en Concepción del Uruguay para precipitaciones de 24 horas de duración.

Una vez implementado el modelo hidrológico de la cuenca se realizó la calibración del mismo utilizando los datos de caudales de la cuenca superior, disponibles en la Ruta Prov. Nro. 39 y los datos de lluvia de la red de pluviómetros. El proceso de calibración consistió en el ajuste de los parámetros del modelo, principalmente los valores de CN que definen la infiltración y el volumen de escorrentía directa, y los coeficientes de Manning de los cursos para evaluar el tránsito de avenidas y los tiempos de tránsito de los hidrogramas. En base a un evento conocido de precipitación y datos de caudales para la cuenca superior correspondiente al 20/01/2010, se ajustaron los parámetros para la parte superior de la cuenca hasta obtener un hidrograma calculado por el modelo similar al observado (caudal pico del orden de 350 m³/s) y luego se realizaron en el mismo modo ajustes de los parámetros para el resto de la cuenca, media e inferior.

De acuerdo a los ajustes de los valores de CN realizados en la calibración se generó nuevamente el mapa de CN para cada polígono que tiene un uso de suelo y tipo de suelo particular asociado a un grupo hidrológico.

En base a una duración de tormenta de 12 días se calcularon los caudales máximos del río Gualeguaychú para distintas recurrencia en coincidencia con el cruce de la Ruta Prov. Nro. 39. Estos se compararon con la estadística de caudales medios diarios y la correlación con máximos instantáneos adoptada fue buena para recurrencias de hasta 20 años.

Pero para recurrencias mayores los caudales calculados con el modelo superan a los hallados por estadísticas de las mediciones. Como estas corresponden a una serie corta que tiene cierta incertidumbre para extrapolaciones mayores a 30 años, se consideró que los resultados del modelo HEC-HMS pueden ser más adecuados para crecidas de carácter extraordinario, y están del lado de la seguridad. A modo de ejemplo, los 981 m³/s calculados para una recurrencia de 500 años mediante la estadística, resultan 1448 m³/s calculados con el modelo, lo cual implica prácticamente un caudal 50% superior.

Los resultados obtenidos para 100 años de recurrencia, se resumen junto con las abstracciones iniciales en la siguiente figura.

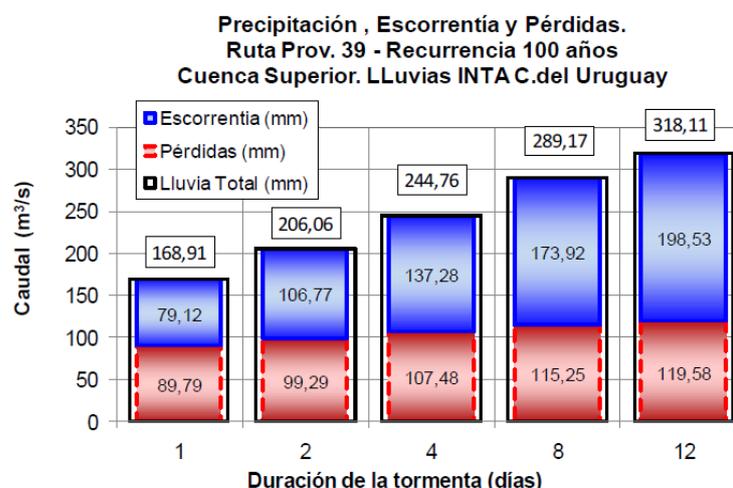


Figura 2-2: Resultados de la Calibración del Modelo HEC-HMS

Se puede apreciar que la intercepción inicial es del orden de más del 50% para 24 horas de duración, decayendo para duraciones mayores (por ejemplo, es un 44% para 4 días).

Con la verificación de resultados del modelo en Ruta Prov. Nro. 39, involucrando las curvas de decaimiento areal de la precipitación, se realizó la modelación de toda la cuenca, con una superficie 3,53 veces superior, considerando distintos escenarios de precipitaciones. Para la distribución temporal se aplicó el conocido método de bloques alternos.

- Como Escenario 1 se consideró una precipitación uniforme espacial y temporalmente, tomando un valor medio entre las curvas IDF calculadas para la estación INTA de Concepción del Uruguay y la estación Gualeguaychú Aero del SMN.
- Como Escenario 2 se trabajó con una precipitación uniforme temporalmente pero no espacialmente. Para ello se dividió la cuenca en dos, una parte superior al norte de la Ruta Prov. Nro. 39, considerando la cuenca superior del Gualeguaychú y el Gena con una lluvia uniforme en base a las curvas IDF calculadas para la estación INTA Concepción del Uruguay. Para la parte inferior de la cuenca, incluyendo las subcuencas al sur de la Ruta Prov. Nro. 39 se consideraron lluvias a partir de las curvas IDF calculadas para la estación Gualeguaychú Aero del SMN, con intensidades variables con epicentro en la cuenca inmediatamente ubicada aguas arriba del cruce previsto del Nuevo Puente al sur de la ciudad, y desde allí cuatro intensidades decrecientes.

- Por último como Escenario 3 se consideró una distribución espacial y temporal no uniforme. Para la distribución espacial se consideraron los mismos intervalos y valores que en el caso anterior, pero para la distribución espacial se consideró como situación extrema la ocurrencia de un pico del hietograma en forma muy anticipada en la cuenca superior, seguido de un pico de hietograma en forma anticipada intermedia para el intervalo medio y los picos al medio de los hietogramas para las cuencas inferiores como se considera por el método de los bloques alternos. De este modo se logra que los hidrogramas de las subcuencas superiores e intermedias se sumen con los picos en fase a las de las subcuencas inferiores, maximizando el caudal pico para la sección de cruce.

Los resultados de caudal pico en la sección del nuevo puente para los distintos escenarios y distintas recurrencias se muestran en la siguiente tabla:

Sección de control al sur de Gualeguaychú				
Recurrencia [años]	Caudal con lluvia uniforme en tiempo y espacio [m ³ /s]	Caudal con lluvia uniforme en tiempo pero no en espacio [m ³ /s]	Caudal con lluvia no uniforme en tiempo y espacio [m ³ /s]	Caudal Adoptado [m ³ /s]
2	848,90	859,30	1.124,80	992,05
5	1.035,60	1.198,00	1.615,80	1.406,90
20	1.508,90	1.706,50	2.395,60	2.051,05
100	2.555,40	2.717,20	3.851,50	3.284,35
500	3.233,60	3.586,20	5.098,40	4.342,30

Tabla 2-1: Caudales para diferentes recurrencias

La situación del Escenario 3 se consideró poco probable que suceda, esto es que en las confluencias más importantes de la cuenca todos los hidrogramas se sumen con los picos en fase. Pero debido a que esta situación puede darse en algunas confluencias generando un pico mayor que el que produce una lluvia con distribución temporal uniforme pero no espacialmente, se adoptó el valor intermedio entre estos dos últimos escenarios para los caudales en la sección de cruce del nuevo puente, indicado en la tabla precedente para cada recurrencia.

Cabe aclarar que los hidrogramas para los diferentes escenarios no presentan sus picos en el mismo momento, razón por la cual el promedio de los caudales picos es un artificio matemático que no representa el caudal pico promedio de los hidrogramas, el cual es menor, a menos que se desplacen temporalmente los hidrogramas para que el pico ocurra a la misma hora.

2.1.2 Análisis de las condiciones de caudal adoptadas en el estudio BISA.

Considerando que el caudal pico de 500 años de recurrencia en la sección de la RP 39 es igual a 1448 m³/s, una transposición lineal simple de este valor según la relación de superficie hasta ese punto con la de la cuenca global (3,53) resultaría en un caudal igual a 5100 m³/s. Si bien este no es un método correcto de estimación de un caudal, brinda una idea de que el orden de magnitud evaluado para la zona del nuevo puente es razonable.

Sin embargo, la adopción de un caudal intermedio entre los Escenarios 2 y 3 de lluvia, implica una reducción del caudal máximo posible para 500 años de recurrencia, en un 15%. Si bien esta hipótesis fue validada por la DHER y se considera razonable, lo cierto es que las “tormentas perfectas” con una trayectoria en fase con el avance de la crecida, pueden ocurrir y de hecho hay evidencias de que han ocurrido en otras cuencas, razón por lo cual se considera conveniente realizar un análisis de sensibilidad, adoptando el hidrograma calculado para el Escenario 3, para recurrencia de 500 años. Se denominará al mismo como “Sensibilidad A”.

Asimismo, se considera conveniente tener en cuenta la posible influencia del Cambio Climático, también a modo de análisis de sensibilidad, lo cual se desarrolla en el siguiente apartado.

2.1.3 Posible influencia del Cambio Climático

Durante el último siglo el Sudeste de América del Sur ha experimentado importantes cambios en su régimen de precipitación, y como consecuencia se ha afectado el balance hidrológico de la región, particularmente sobre la cuenca del Plata. Según Barros et al. (2006), se han observado cambios en varias regiones del mundo, pero en América del Sur se han encontrado los de mayor magnitud.

Además las tendencias se han intensificado en los últimos 30 a 40 años debido a los cambios en la circulación atmosférica y probablemente también por el cambio de uso de suelo.

La evaluación de los procesos hidrológicos en estudios de recursos hídricos se basa, entre otros aspectos, en el estudio estadístico de series hidrológicas homogéneas, es decir, en series cuyos estadísticos fundamentales no se alteran con el tiempo. Según Barros et al. (2006)¹, la hipótesis de que las series climáticas o de sus derivados son estacionarias aparece como poco apropiada. Esta tesitura es apoyada en el hecho de que actualmente es frecuente encontrar series estadísticas de comportamiento temporal no homogéneo.

Al respecto es preciso destacar que, en realidad, suele observarse procesos no homogéneos debido a diferentes causas. Entre ellas cabe citar:

- la falta de representatividad de las series históricas para identificar la variabilidad climática, entendida como las variaciones del clima en función de los condicionantes naturales del globo terrestre y de sus interacciones, y especialmente en relación con la variación de la irradiación solar.
- el cambio climático, entendido como las alteraciones de la variabilidad climática debido a las acciones antrópicas:
- las alteraciones de las características físicas, químicas y/o biológicas de las cuencas hidrográficas debido a procesos naturales y antrópicos.

¹ Barros, V., et. Al. 2006. El Cambio Climático en la Cuenca del Plata. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – CONICET. Buenos Aires.

- Los escenarios climáticos describen cómo dadas ciertas actividades humanas, se modificará la composición de la atmósfera y en consecuencia el clima global. Con esta información se trata de estimar como se afectarán los sistemas naturales y las actividades humanas.

A través del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) se elaboraron los escenarios de emisiones, basados en suposiciones acerca de las posibles evoluciones socioeconómicas del mundo, dando lugar a proyecciones de concentraciones de GEI (Gases de Efecto Invernadero). Estos constituyen la base sobre la que se elaboran la mayoría de los escenarios del clima futuro.

Los escenarios climáticos pueden clasificarse en tres tipos principales: sintéticos, análogos y basados en salidas de modelos climáticos globales (MCG). Éstos representan los procesos físicos de la atmósfera, océanos, criósfera y la superficie terrestre y en forma muy simplificada de la biosfera, y aun cuando presentan serias imprecisiones, constituyen a la fecha la herramienta más confiable disponible para simular la respuesta del sistema climático global al incremento de las concentraciones de los GEI.

El uso de Modelos Globales de Circulación (MCG) para el desarrollo de escenarios de cambio climático global permite estimar los impactos globales de los cambios en los gases de invernadero, y otros procesos.

Son capaces de simular las características globales del clima y de sus cambios en el pasado reciente y por lo tanto cuentan con un consenso de credibilidad como herramienta para el desarrollo de escenarios climáticos globales futuros. Los escenarios se construyen con diferentes hipótesis sobre las futuras concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI). Se cuenta con un conjunto de escenarios climáticos conocido como CMIP5 (Taylor y otros, 2012)².

Para el presente estudio se empleó información provista por el informe “Cambio climático en Argentina; tendencias y proyecciones” elaborado por el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA, 2015), como contribución al Proyecto Tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (SAyDS), con el objeto de presentar una evaluación de las tendencias del clima del pasado reciente (desde la segunda mitad del siglo XX) y una proyección del clima futuro (siglo XXI) de la Argentina. Gran parte de los comentarios generales presentados a continuación proceden de dicho informe.

Este informe presenta además la documentación de base, incluyendo la interfaz web y los metadatos, que permite hacer accesible por Internet la base de datos con información relevante para los estudios de impacto del cambio climático, tanto del clima observado como del proyectado, desarrollada por el CIMA.

La información relevante para el presente estudio es la correspondiente a la Región Húmeda, que abarca Misiones, Corrientes, Santa Fe, Entre Ríos y Buenos Aires.

² Taylor, KE, Stouffer RJ, Meehl GA. 2012. An Overview of CMIP5 and the experiment design. Bulletin of the American Meteorological Society 93: 485–498. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1.

Los datos utilizados son promedios o totales mensuales de bases internacionales que se han basado en los datos del Servicio Meteorológico Nacional. Estos datos han pasado un doble proceso de consistencia, primero por este organismo y luego en la elaboración de las bases. Para los campos medios observados de las temperaturas (media, mínima y máxima) y de la precipitación, así como para la validación de los modelos climáticos se utilizó la base CRU 3.20³

Los índices de extremos de datos observados se tomaron del conjunto CLIMDEX (Donat et al. 2013)⁴.

Los índices extremos relacionados con la precipitación que fueron usados para el presente estudio son la precipitación diaria máxima del año y la precipitación máxima anual de 5 días consecutivos.

Una de las mayores limitaciones de los MCG es que no siempre hacen una representación adecuada del clima a nivel regional. En particular, si bien los modelos son capaces de reproducir los elementos climáticos fundamentales que describen cualitativamente el campo de precipitación en el clima regional del sur de América del Sur, sus errores en la cuantificación de la precipitación son importantes (CIMA, 2015).

Los escenarios climáticos del siglo XXI fueron calculados sobre dos horizontes temporales: clima futuro cercano (2015-2039), de interés para las políticas de adaptación, y clima futuro lejano (2075-2099), que se considera de carácter informativo sobre el largo plazo.

Los resultados de los MCGs del CMIP5 se basan en escenarios representativos de trayectorias de concentración (sigla en inglés, RCP). Estos escenarios de concentración se distinguen por el forzamiento radiactivo en watts por metro cuadrado al que llegan en el año 2100. Se elaboraron escenarios climáticos de dos escenarios RCP 4.5 y 8.5. El primero corresponde a emisiones moderadas y el escenario RCP8.5 al caso en que las emisiones continuarán creciendo con las tendencias actuales hasta fin de siglo, es decir, el mismo es más conservativo en cuanto a la predicción de los impactos del efecto invernadero.

La confianza en los modelos climáticos para el desarrollo de escenarios climáticos futuros se debe basar en la evaluación de su desempeño para representar el clima presente. Para ello se hizo un proceso de validación de los MCGs y de los modelos climáticos regionales disponibles (MCRs) tomando como referencia para el cálculo de los indicadores de error, el clima observado según los datos de temperatura y precipitación mensual de la base de datos CRU en el período comprendido entre 1961 y 1990.

³ http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk__ATOM__dataent_1256223773328276

⁴ Donat M. G., L. V. Alexander, H. Yang, Durre, R. Vose, R. J. H. Dunn, K. M. Willett, E. Aguilar, M. Brunet, J. Caesar, B. Hewitson, C. Jack, A. M. G. Klein Tank, A. C. Kruger, J. Marengo, T. C. Peterson, M. Renom, C. Oria Rojas, M. Rusticucci, J. Salinger, A. S. Elrayah, S. S. Sekele, A. K. Srivastava, B. Trewin, C. Villarroel, L. A. Vincent, P. Zhai, X. Zhang, and S. Kitching. 2013. Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 J. of Geophysical Research 118, 2098–2118.

Con el índice único de validación de modelos (IUVM), basado en 10 indicadores de error, se pudieron rankear los modelos y hacer una selección objetiva de los que fueron finalmente utilizados en el desarrollo de los escenarios climáticos del siglo XXI.

En general, los modelos globales tuvieron una mejor representación del clima observado que los modelos regionales, lo que puede atribuirse a que los modelos globales son de una generación de modelos más nueva. A partir del índice IUVM, la evaluación experta de una serie de elementos como la distribución de errores dentro de cada región y los errores en los índices extremos se seleccionaron para cada región los 4 primeros modelos del ranking. Ningún modelo estuvo entre los 4 seleccionados en las cuatro regiones, reflejando la diversidad de los forzamientos geográficos del clima, propios de un país muy extenso. En el caso de la Provincia de Entre Ríos (región Húmeda), los modelos seleccionados son: CCSM4, CMCC-CM y NorESM1-M, mientras que el modelo MRI-CGCM3 fue considerado pero luego no utilizado en los promedios generales.

Los datos de los mismos son los siguientes:

Modelo	Institución	Resolución Horizontal (lat x lon)
CCSM4 (2010)	NCAR, ESTADOS UNIDOS	0.9° x 1.25°
CMCC-CM (2009)	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici, ITALIA	0.75° x 0.75°
NorESM1-M (2011)	Norwegian Climate Centre, NORUEGA	1.8° x 2.5°
MRI-CGCM3 (2011)	Meteorological Research Institute, JAPON	1.1° x 1.2°

Tabla 2-2: Identificación de los modelos empleados

Las fuentes de incerteza sobre los escenarios climáticos regionales del futuro provienen de la falta de habilidad de los modelos climáticos para representar con exactitud el clima regional, de los escenarios de emisiones y de la variabilidad interdecadal del clima que por el momento no es captada adecuadamente por los modelos climáticos.

No obstante lo señalado, en el futuro lejano, como el cambio por el aumento de las concentraciones de GEIs es grande, se puede suponer que la variabilidad interdecadal será menor en relación a aquella y por consiguiente para este futuro, la incerteza queda circunscripta a los errores de los modelos y a los posibles escenarios de emisiones.

En el futuro cercano, la incertidumbre ocasionada por diferentes escenarios de concentración de GEI posibles es muy reducida, mientras que las contribuciones de las otras dos fuentes de la incertidumbre son grandes.

De acuerdo a la Figura siguiente extraída del reciente trabajo “Cambio climático en Argentina; tendencias y proyecciones” (CIMA, 2015), la precipitación anual no se vería alterada en forma muy significativa: *”En el caso de la precipitación, los cambios proyectados por el promedio de los 42 modelos de la base CMIP5 no son importantes, Figura 3.4.2. Excepto para el escenario RCP8.5 en el futuro lejano, los cambios proyectados están entre menos diez y más diez por ciento. Si se considera que este podría ser el rango de las posibles fuentes de error, estas señales de cambio serían poco relevantes. Por ello, se podría asumir que no habría mayores cambios en la precipitación en todo el país en el futuro cercano, ni tampoco en el caso del escenario RCP4.5 en el futuro lejano. Esto se confirma con los escenarios regionales, calculados con solo los modelos elegidos como más representativos del clima observado.”*

Las conclusiones del Capítulo 5 dedicado a la Región Húmeda, indican lo siguiente:

“La temperatura y la precipitación media anual han aumentado en toda la región Húmeda desde el comienzo de la segunda mitad del siglo pasado. (Confianza media)..

La precipitación media anual aumentó en casi toda la región y en muchas zonas en forma estadísticamente significativa. La significancia de este aumento crece con el agregado de los datos por subregiones, de modo que en las tres subregiones consideradas en este estudio los resultados son significativos al 95% (confianza alta). El aumento se produjo en todas las estaciones del año, excepto en el invierno en el que prácticamente hubo una disminución de la precipitación, que en el promedio regional fue estadísticamente significativo. Los indicadores de extremos que se asocian con potenciales desastres por inundaciones cambiaron consistentemente con las mayores precipitaciones lo que se evidenció más claramente con los valores acumulados; esto es en 5 días en el caso aquí presentado y en un mes (Doyle y otros 2012). Otros indicadores de extremos mostraron aumentos en las lluvias extremas y una disminución de la duración de los períodos secos máximos anuales....

En el futuro cercano, la precipitación media regional no tendría mayores cambios y con bastante certeza no se revertiría el aumento registrado entre 1960-2010 (confianza alta). Para el futuro lejano y en el escenario RCP8.5 habría un aumento del orden del 10%, pero existe un grado de incerteza asociado con los modelos, por lo que no habría que descartar aumentos aún mayores. (Confianza media)

Los índices calculados indican que habrá una tendencia a que las precipitaciones extremas aumenten con el tiempo y en forma más pronunciada con el escenario RCP8.5. Para el futuro cercano, aunque también habría una tendencia general hacia mayores precipitaciones extremas en casi todos los modelos y escenarios, en algunos casos las diferencias con respecto al presente son casi nulas o incluso negativas.

Resumiendo, el calentamiento regional observado entre 1960 y 2010 se aceleraría en el siglo XXI y el aumento de la precipitación registrado en ese periodo no se revertiría y por el contrario habría una tendencia hacia mayores precipitaciones extremas, aunque todavía con cierta incerteza en cuanto a la magnitud del cambio. (Confianza media)”

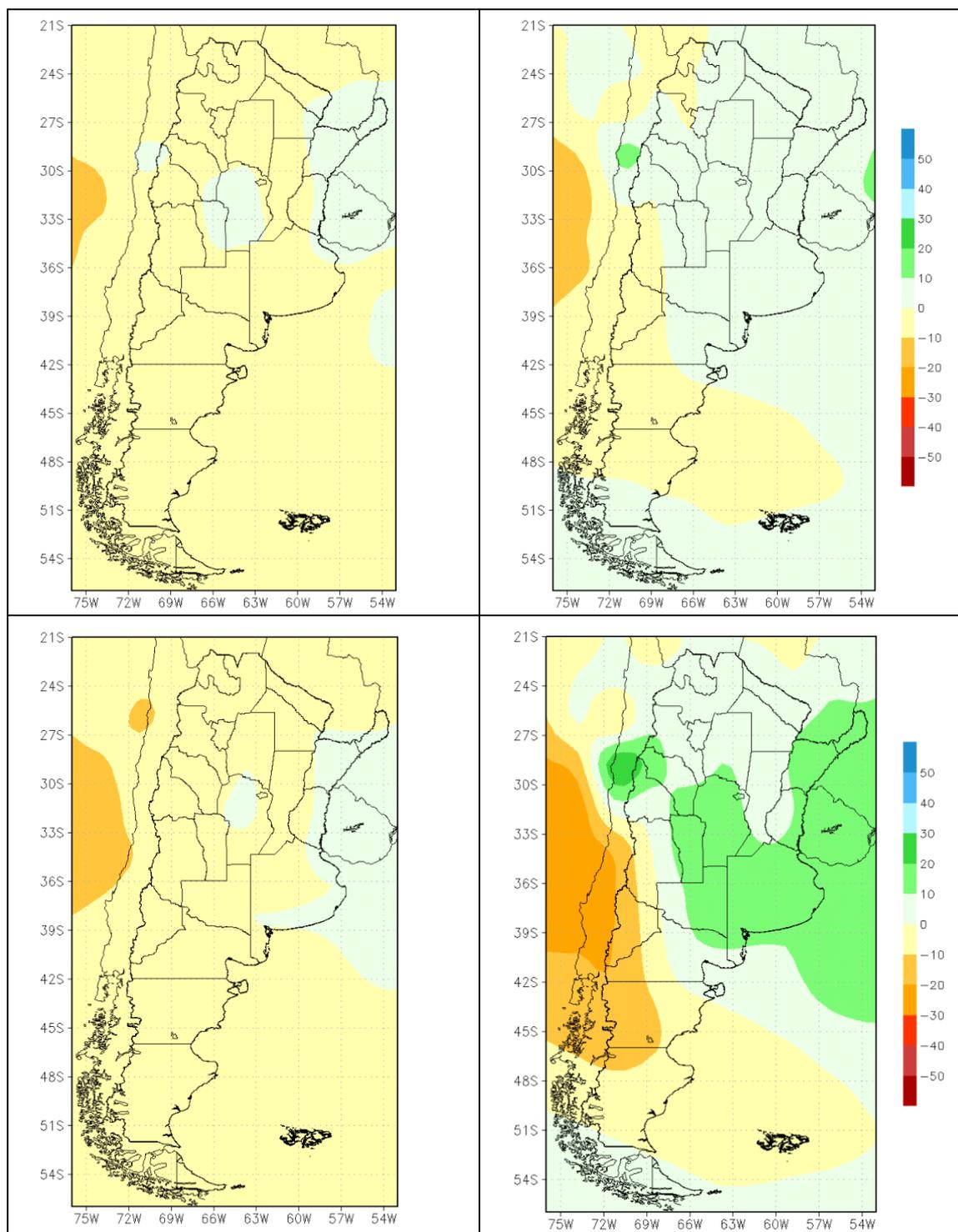


Figura 2-3: Cambio porcentual en la precipitación anual con respecto al periodo 1981-2005. Promedios de 42 modelos de la base CMIP5. Panel superior escenario, RCP4.5 y panel inferior, RCP8.5. Izquierda, futuro cercano (2015-2039) y derecha, futuro lejano (2075-2099). Fuente: CIMA (2015), Figura 3.4.2

La figura siguiente (Figura 5.4.2.3 del Informe CIMA) indica que como resultado del cambio climático habría una tendencia en toda la región hacia mayores valores de la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa. Esto mismo fue encontrado para precipitaciones acumuladas mensuales por Barros y otros (2013)⁵ para dos grandes zonas de esta región. Para la zona que abarca la cuenca del río Gualeguaychú, el incremento de precipitación diaria máxima anual en el escenario de emisiones moderadas RCP 4.5, es del orden de 0 a 4 mm en el futuro cercano y de 8 a 12 mm en el futuro lejano. Para el escenario de emisiones conservativo RCP 8.5, los valores son de 2 a 4 mm para el futuro cercano, y de 12 a 16 mm para el futuro lejano.

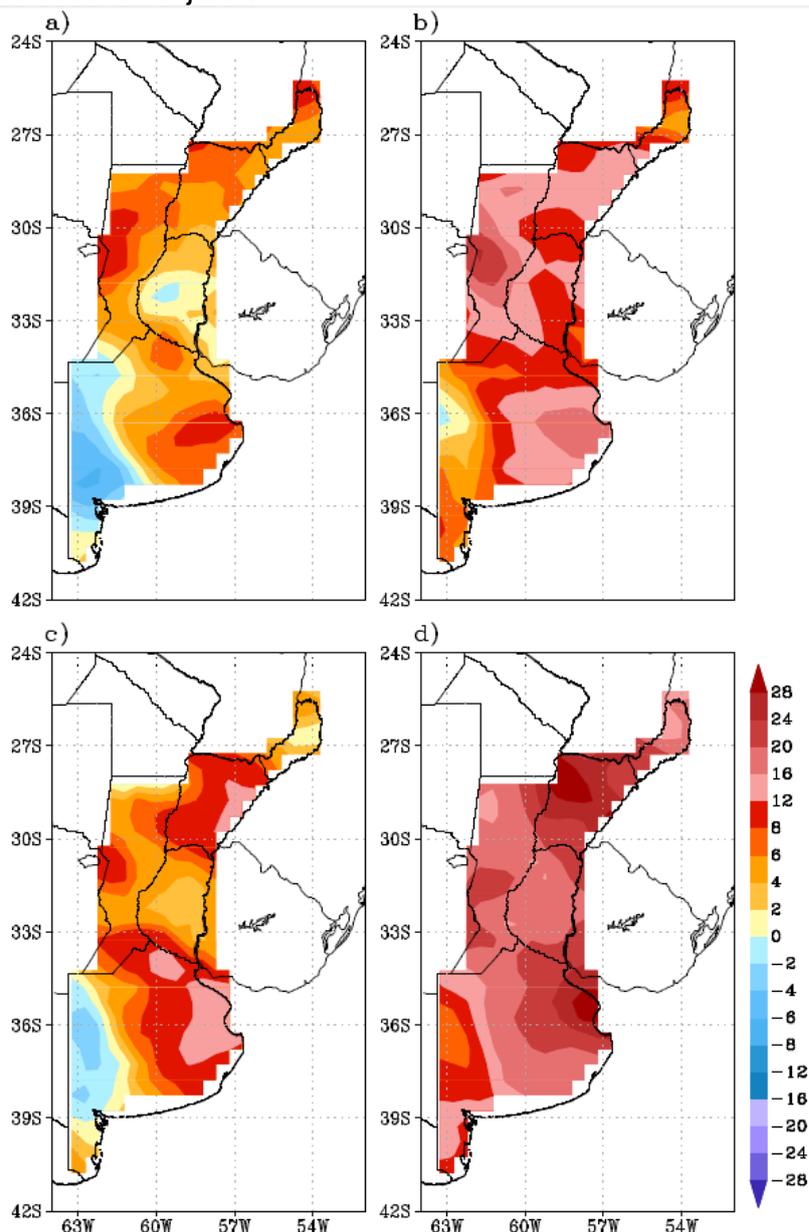


Figura 2-4: Cambios en la precipitación diaria máxima del año (mm) con respecto al periodo 1981-2005. Promedio de los modelos CCSM4, CMCC-CM y NorESMI-M. a) escenario RCP 4.5, futuro cercano (2015-2039), b) escenario RCP 4.5, futuro lejano (2075-2099), c) escenario RCP 8.5, futuro cercano y d) escenario RCP 8.5, futuro lejano. Fuente: CIMA (2015), Figura 5.4.2.3

⁵ Barros, V., C. Garavaglia and M. Doyle. 2013: Twenty First century Projections of Extreme Precipitations in the Plata basin. *International Journal of River Basin Management*, 11. 373-381.

La siguiente figura ilustra la misma información para la precipitación acumulada durante 5 días, con valores de un orden de magnitud similar que los correspondientes a la precipitación máxima diaria. Para la zona que abarca la cuenca del río Gualeguaychú, el incremento de precipitación diaria máxima anual en el escenario de emisiones moderadas RCP 4.5, es del orden de 8 a 12 mm en el futuro cercano y de 18 a 24 mm en el futuro lejano. Para el escenario de emisiones conservativo RCP 8.5, los valores son de 6 a 8 mm para el futuro cercano, y de 18 a 32 mm para el futuro lejano.

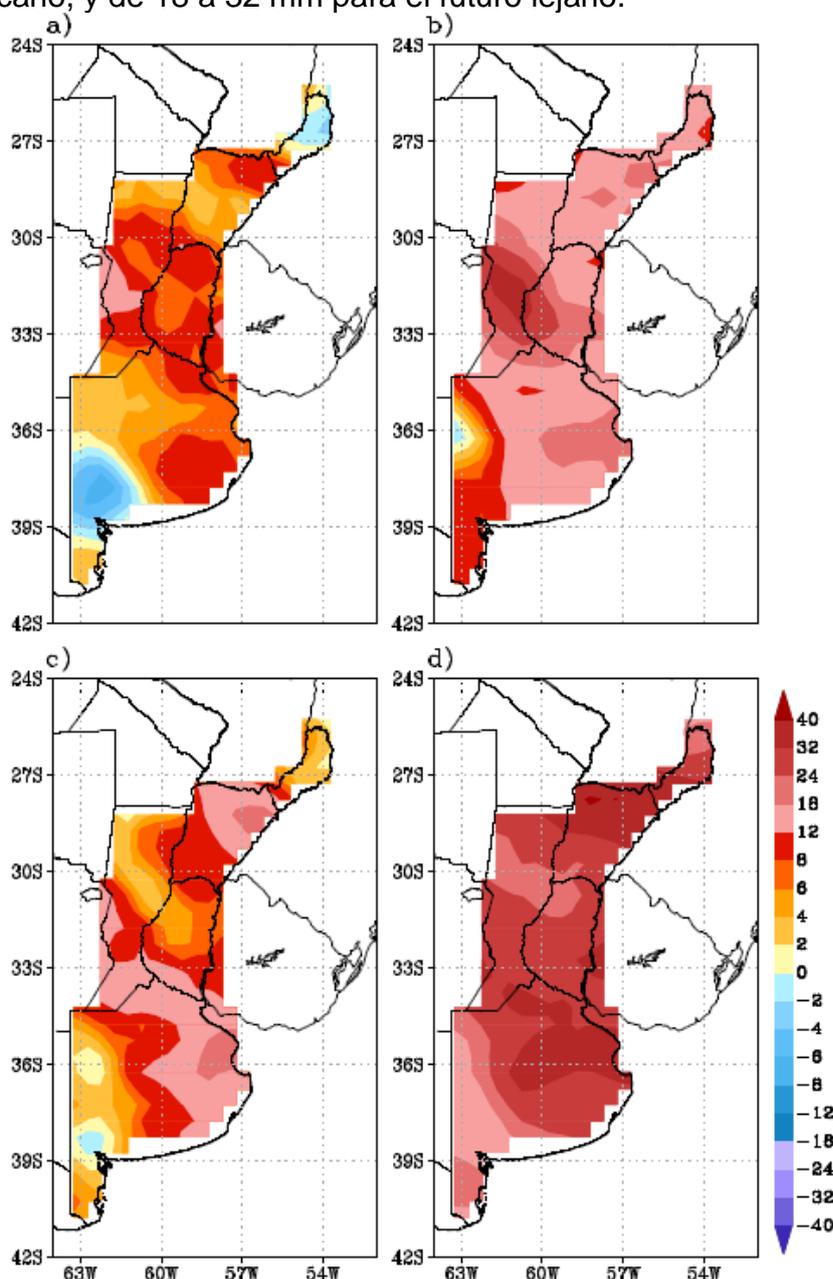


Figura 5.4.2.4: Ídem Figura 5.4.2.3, pero para la precipitación máxima anual acumulada en 5 días (mm)

Figura 2-5: Cambios en la precipitación máxima anual acumulada en 5 días (mm) con respecto al periodo 1981-2005. Promedio de los modelos CCSM4, CMCC-CM y NorESMI-M. a) escenario RCP 4.5, futuro cercano (2015-2039), b) escenario RCP 4.5, futuro lejano (2075-2099), c) escenario RCP 8.5, futuro cercano y d) escenario RCP 8.5, futuro lejano. Fuente: CIMA (2015), Figura 5.4.2.4

A los efectos prácticos, y dado que no se dispone del modelo HEC-HMS originalmente empleado para el estudio de INCOCIV, se realiza a continuación una estimación expeditiva conceptual y conservativa de la influencia que los posibles incrementos de precipitación pueden tener en los caudales del río de diseño calculados en Gualeguaychú.

Tomando como indicador la precipitación caída en la cuenca alta del río (representada por la Estación Concepción del Uruguay) para una recurrencia de 100 años, que es igual a unos 170 mm, se tiene que el incremento esperable en la precipitación máxima diaria de hasta 12 mm en el futuro lejano (años 2075-2099) para el escenario de emisiones moderado y de 16 mm para el escenario de emisiones más desfavorable, equivalen a un 7% y 9,5%, aproximadamente. No obstante, considerando que para la duración de 24 horas la interceptación inicial es del orden del 50% de la precipitación, la influencia del exceso de precipitación debido al Cambio Climático debería considerarse sobre la precipitación que efectivamente escurre, resultando entonces factores de incremento de la precipitación efectiva diaria del orden del 14% y 19%, según el escenario de emisiones considerado. Para la duración de 5 días los órdenes de magnitud de estos factores resultan similares.

Si bien como se comentó, estos son sólo indicadores orientativos, se puede estimar que hacia fin del siglo XXI podría producirse un incremento del caudal pico de las crecidas de recurrencias elevadas con un orden de magnitud similar a estos factores.

Dado que anteriormente se ha considerado realizar un análisis de sensibilidad para una “tormenta perfecta” lo cual implica un incremento de los caudales pico considerados previamente del orden del 15%, aplicar el máximo incremento correspondiente al fin del siglo para el escenario más conservativo del Cambio Climático a este caudal se considera que puede ser excesivamente conservativo y poco realista. De hecho, el incremento por Cambio Climático resulta del mismo orden que el que se obtiene maximizando la tormenta de diseño para que recorra la cuenca en fase con la onda de crecida.

Se realizará no obstante una simulación de sensibilidad considerando la combinación extrema de ambos efectos (“tormenta perfecta” + Cambio Climático conservativo hasta fin de siglo), para una crecida extraordinaria de 500 años de recurrencia, al sólo efecto de verificar el impacto sobre los niveles y velocidades de agua que tendría el emprendimiento Amarras, en una condición de inundación futura que podría calificarse como “catastrófica” y extremadamente improbable. Se denominará al análisis como “Sensibilidad B”. Esto implica aplicar un factor de incremento del 20% a los caudales del Escenario 3 de precipitación.

2.2 NIVELES DE AGUA

2.2.1 Estudios de las consultoras BISA e INCOCIV

En el estudio de INCOCIV se realiza un análisis de niveles extremos en las escalas de Boca del Gualeguaychú y Puerto Gualeguaychú, el cual contempla diversas consideraciones en cuanto a la representatividad de las series de datos empleadas, y en particular con respecto a la consideración de la crecida de 1978, que tuvo incidencia de factores humanos:

- Serie moderna: abarca los últimos 32 años, 1980 a 2011.
- Serie completa: comprende desde el inicio de las mediciones 1904 hasta el 2011, sin considerar la creciente de 1978

La crecida de 1978 alcanzó un nivel de 7,28 m en la estación Puerto Gualeguaychú, y se debió a la rotura del terraplén de avance de la Ruta Nac. 14 para la construcción del puente sobre el río Gualeguachú⁶, lo cual produjo una onda aluvional que avanzó sobre la ciudad.

Otra crecida extraordinaria ocurrida fue la de 1959, la cual se produjo por una coincidencia de factores naturales (lluvias extraordinarias persistentes, crecidas de los ríos Uruguay y Paraná y sudestada⁷) más la posible influencia en el río Uruguay de la dinamitación del dique lateral de tierra de la represa Rincón Bonete sobre el Río Negro en la República Oriental del Uruguay, alcanzándose niveles iguales a 6,25 m (5,73 m IGN) en Boca Gualeguaychú y 7,00 m (6,50 m IGN) en Puerto Gualeguaychú, constituyéndose en la mayor catástrofe hídrica de la zona entrerriana en el Siglo XX (incluso fue afectada toda la costa bonaerense aledaña a la ciudad de Buenos Aires y provocó inundaciones intensas en la cuenca Matanza – Riachuelo).

El análisis estadístico fue efectuado empleando el programa AFMULTI (FICH, UNL); para la serie moderna se adoptó la distribución GEV y para la serie completa LogPearson.

De acuerdo a BISA: *“En los resultados se observa que en el análisis de la serie completa se obtienen valores muy superiores de alturas para las mayores recurrencias, que superan el metro de altura para recurrencia de 100 o más años. Como se mencionó las series largas no representan la realidad actual del río Uruguay y su influencia sobre el río Gualeguaychú y sobreestiman los valores de altura pero por otro lado existe incertidumbre sobre la validez de las series cortas para el caso de estudio donde el Río Gualeguaychú presenta varios registros de crecientes anteriores a 1980 en las que se podría descartar influencias del río Uruguay que superan las previsiones de la serie corta. En función de esto en el estudio antecedente se consideró como criterio que las series cortas representan un límite inferior y las series largas un límite superior, adoptándose como resultado final un valor intermedio del análisis de frecuencia de ambas series.”*

Frecuencia de Alturas Máximas medias diarias anuales
Escala Puerto de Gualeguaychú - Alturas Hidrométricas (m)

Probabili- dad de ocurrencia	Recu- rrencia Años	Serie 1980-2011	Serie 1904-2011 s/1978	Valor medio Adoptado
0,50	2	3,47	3,34	3,40
0,20	5	4,09	4,09	4,09
0,10	10	4,46	4,62	4,54
0,05	20	4,78	5,15	4,97
0,020	50	5,16	5,88	5,52
0,010	100	5,42	6,45	5,93
0,005	200	5,65	7,06	6,35
0,002	500	5,93	7,66	6,80

Tabla 2-3: Frecuencia de alturas máximas medias diarias para las series corta y larga y valor promedio

Se adoptaron en consecuencia los niveles que se presentan en las tablas siguientes.

⁶ <http://mangueraerecta.blogspot.com.ar/2008/03/18-de-marzo-de-1978-las-aguas-bajan.html>

⁷ <http://www.mundoagrario.unlp.edu.ar/article/view/v08n16a11/969>

TABLA 6: FRECUENCIA ALTURAS MÁXIMAS. ESTACIÓN PUERTO GUALEGUAYCHÚ. VALORES ADOPTADOS

Probabilidad	Recurrencia	Altura	Nivel
	años	m	m IGN
50.0%	2	3.40	2.90
20.0%	5	4.09	3.59
10.0%	10	4.54	4.04
5.0%	20	4.97	4.47
2.0%	50	5.52	5.02
1.0%	100	5.93	5.43
0.5%	200	6.35	5.85
0.2%	500	6.80	6.30

TABLA 9: FRECUENCIA ALTURAS MÁXIMAS. ESTACIÓN BOCA DEL GUALEGUAYCHÚ. VALORES ADOPTADOS

Probabilidad	Recurrencia	Altura	Nivel
	años	m	m IGN
50.0%	2	3.11	2.59
20.0%	5	3.65	3.13
10.0%	10	4.01	3.49
5.0%	20	4.36	3.84
2.0%	50	4.81	4.29
1.0%	100	5.16	4.64
0.5%	200	5.51	4.99
0.2%	500	5.88	5.36

Tabla 2-4: Alturas máximas para diferentes recurrencias en Puerto y Boca Gualeguaychú

La cota IGN del cero de la Estación Puerto Gualeguaychú es -0,50 m, y la de Boca del Gualeguaychú es -0,52 m.

Por Nota del 29/07/2015, la Dirección de Hidráulica de Entre Ríos (DHER), indicó a BISA que se debe adoptar como condición de borde del modelo del río, el nivel superado con una frecuencia del 2%, que se corresponde con una altura de 3,38 m en la escala hidrométrica, criterio idéntico al especificado a INCOCIV previamente.

La estadística de niveles en la desembocadura del río Gualeguaychú en el río Uruguay se presenta en la figura siguiente.

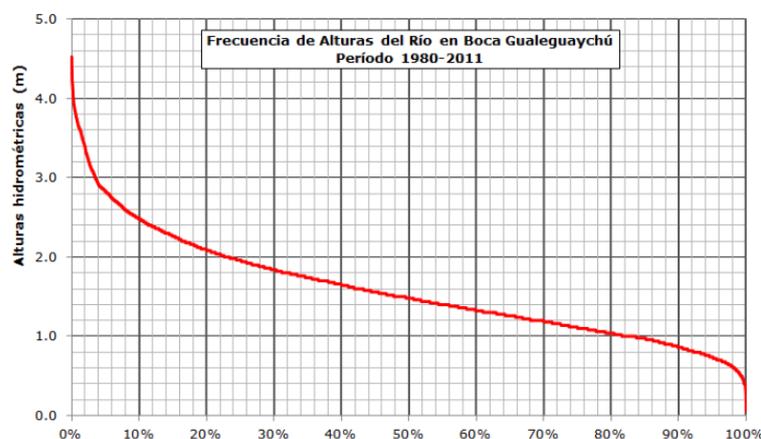


Figura 2-6: Curva de Permanencia de Alturas en Boca del Gualeguaychú

2.2.2 Análisis de datos de nivel adoptados

La dispersión de niveles con cada recurrencia para las series corta (1980-2011) y larga (1904-2011) ha resultado muy significativa. Por ejemplo para la recurrencia de 500 años se tiene un nivel de 5,93 m para la serie corta y 7,66 m para la larga en Puerto Gualeguaychú (1,73 m de diferencia), y se adopta el valor promedio 6,80 m (6,30 m IGN). Cabe mencionar que con dicha adopción, se está asignando al nivel de la crecida extraordinaria de 1959 (7,00 m en la escala, 6,50 m IGN) una recurrencia mayor a 500 años, mientras que considerando la serie larga, su recurrencia resultaría menor a 200 años.

En el caso de Boca Gualeguaychú, para la recurrencia de 500 años se tiene un nivel de 5,47 m para la serie corta y 6,29 m para la larga (0,82 m de diferencia), y se adopta el valor promedio 5,88 m (5,36 m IGN), con lo cual se está asignando a la crecida extraordinaria de 1959 (6,25 m en la escala, 5,73 m IGN) una recurrencia mucho mayor a 500 años, mientras que considerando la serie larga, su recurrencia resultaría algo menor a 500 años.

El hecho de que la diferencia entre los niveles para las series corta y larga sea prácticamente del doble en Puerto Gualeguaychú con respecto a Boca Gualeguaychú, se debe a que la primera no sólo está influenciada por el nivel del río Uruguay, sino lógicamente por los caudales del río Gualeguaychú que incrementan la pendiente del pelo de agua.

La adopción de una serie u otra (o el promedio) en cuanto a los niveles extraordinarios no es muy relevante a la hora de analizar el impacto del emprendimiento Amarras, dado que en definitiva sólo se usan como un parámetro de comparación con los resultados de la modelación, la cual se ha realizado considerando caudales extraordinarios en combinación con niveles del río Uruguay altos pero no extraordinarios (superados 2% del tiempo).

Las evidencias históricas muestran que la crecida de 1959 ha sido catastrófica porque coincidió un evento de sudestada con lluvias intensas, lo cual explica también porque la cota del pelo de agua en Puerto Gualeguaychú (6,50 m IGN) es superior en 77 cm al nivel en Boca (5,73 m IGN), lo cual responde a la pendiente fluvial causada por el caudal del río.

En tal sentido, se considera que resulta conveniente realizar un análisis de sensibilidad del impacto de Amarras para una crecida extraordinaria causada por la conjunción de caudales extremos con 100 y 500 años de recurrencia en el río Gualeguaychú (con los caudales promedio entre los Escenarios 2 y 3 adoptados por BISA), con una sudestada y crecida del río Uruguay tales que provoquen un nivel en Boca del Gualeguaychú igual al ocurrido durante crecida 1959. Se denominará al análisis como "Sensibilidad C".

3. MODELACIÓN HIDRÁULICA UNIDIMENSIONAL

3.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO Y ALCANCE DE LAS TAREAS

La modelación matemática de la influencia del emprendimiento Amarras sobre los niveles y velocidades del río Gualeguaychú, fue realizada por BISA. Según lo indicado en el documento “Estudios Hidrológicos e Hidráulicos”, fue empleado el modelo unidimensional HEC-RAS⁸, en su versión 4.0, igual que lo que previamente realizó INCOCIV. Este modelo es un software de uso libre empleado en forma generalizada por instituciones educativas, consultoras y estudios de ingeniería, para resolver problemas de escurrimiento en régimen subcrítico y supercrítico. El mismo se encuentra dentro del estado del arte actual de la hidráulica fluvial, siendo sus prestaciones comparables a las de otros modelos comerciales.

No obstante, la versión vigente del HEC-RAS en la época de realización de ambos estudios es la 4.1 (a partir de marzo 2010), la cual corregía algunos problemas de la versión 4.0, y es la que correspondería haber utilizado (si bien no es esperable que ello haya provocado errores en los resultados). La versión actual es la 5.0 (a partir de febrero de 2016), y dado que ha reemplazado a la 4.1, es la que se utilizará para la presente verificación.

Se ha revisado el modelo HEC-RAS, a los efectos de validar su empleo para generar condiciones de borde para un modelo hidrodinámico bidimensional, consistentes en caudales en la sección de la Ruta 136 (aguas arriba), y niveles líquidos en la sección correspondiente al nuevo Puente proyectado (aguas abajo).

Se ha considerado que la información geométrica correspondiente a todas las secciones del río ingresadas en el modelo HEC-RAS es correcta por surgir de relevamientos topográficos y batimétricos que han sido aprobados por el CFI y considerados válidos por la DHER, si bien se ha verificado que no existan inconsistencias evidentes.

En el marco de esta revisión, se han realizado simulaciones impermanentes considerando los hidrogramas generados para diferentes recurrencias, en el marco de los estudios hidrológicos realizados por INCOCIV, los cuales han sido provistos por BISA. El objeto de estas simulaciones ha sido analizar globalmente la influencia del almacenamiento en la planicie de inundación, a los efectos de verificar las variaciones que pudieran ocurrir respecto a las simulaciones en régimen permanente realizadas por BISA. Se considera que un modelo unidimensional como el empleado puede permitir valorizar en forma conservativa si la pérdida de almacenamiento lateral causada por el emprendimiento es significativa o no, aunque no permita evaluar con gran detalle los niveles de agua en la zona cercana al área intervenida.

Asimismo, habida cuenta de que la crecida de abril de 1959 fue un evento singular muy destacado y grave por la confluencia de una crecida por sudestada y caudal extraordinario del río Uruguay, con una precipitación que habría sido muy significativa en la cuenca del río Gualeguaychú, se han analizado a modo de sensibilidad escenarios compatibles con dicho evento, imponiendo como condición de contorno aguas abajo del modelo HEC-RAS en Boca del Gualeguaychú, el nivel máximo registrado ese año en dicha estación.

⁸ Hydrologic Engineering Center's (CEIWR-HEC) River Analysis System (HEC-RAS), del U.S. Army Corps of Engineers. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

Como resultado de estos análisis, se definieron las condiciones de contorno a ser empleadas en el modelo bidimensional, para diferentes escenarios representativos de condiciones de inundación significativas para las cuales el emprendimiento afecte el escurrimiento, con recurrencias de caudal de 5, 20, 100 y 500 años considerando no sólo los caudales pico definidos en el estudio de INCOCIV, con nivel en Boca del Gualeguaychú superado el 2% del tiempo, sino además a modo de análisis de sensibilidad, imponiendo valores de caudal y nivel aguas abajo incrementados para condiciones más conservativas correspondientes a:

- una “tormenta perfecta” que recorriera la cuenca al mismo ritmo que el avance de la onda de crecida (Sensibilidad A),
- un escenario de incremento de precipitaciones a fin del siglo XXI considerando el Cambio Climático provocado por una hipótesis pesimista en cuanto a las emisiones de gases de efecto invernadero (Sensibilidad B),
- un escenario de incremento de precipitaciones a fin del siglo XXI considerando el Cambio Climático provocado por una hipótesis pesimista en cuanto a las emisiones de gases de efecto invernadero en conjunto con una sudestada y crecida del río Uruguay como la ocurrida en el año 1959 (Sensibilidad C) y,
- un escenario compatible con la inundación extraordinaria ocurrida en el año 1959 (Sensibilidad D), que resultó coincidir con el resultante de una precipitación de 100 años de recurrencia, con el caudal promedio de las tormentas correspondientes a los Escenarios 2 y 3 (criterio de INCOCIV).

3.2 IMPLEMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO

De acuerdo al estudio de INCOCIV para la implementación del modelo se elaboró primeramente un modelo topobatimétrico del terreno en el tramo de estudio utilizando distintas fuentes de información, como las curvas de nivel del PAPCUS para la zona urbana de Gualeguaychú y curvas de nivel de las planchetas del IGN para todo el tramo, las cuales fueron ajustadas con los relevamientos realizados para la traza de la obra y otros puntos relevados específicamente para la modelación hidráulica, así como relevamientos detallados de puentes y rutas existentes.

Der acuerdo al estudio de BISA, con toda esta información se levantaron 49 perfiles transversales en una longitud del tramo de estudio de 23.664 m en la dirección del cauce del río que se indican en plano adjunto (Esquema Modelo Hidráulico). Dos de estos perfiles coinciden con la traza de la Ruta Nac. Nro. 136 (prog. 23+143) y de la Ruta Prov. Nro. 42 (prog. 17+626) y otros dos con la ubicación de las escalas del Puerto de Gualeguaychú (progr. 16+749) y Boca del Gualeguaychú (progr. 3+203) y otro con la ubicación del nuevo puente (prog. 14+948). En particular para el análisis del impacto de la obra que se estudia (Amarras de Gualeguaychú) se agregaron al modelo original perfiles en el sector de estudio que fueron levantados integrando al relevamiento antecedente los puntos relevados por el Cliente en el predio del proyecto. En particular el perfil de progresiva 19+254 coincide con el acceso al predio y límite sur lindante con Parque Unzue y el perfil 20+242 se ubica en el límite norte.

Se reproducen a continuación en sendas figuras, los planos general y de detalle del esquema de perfiles del modelo.

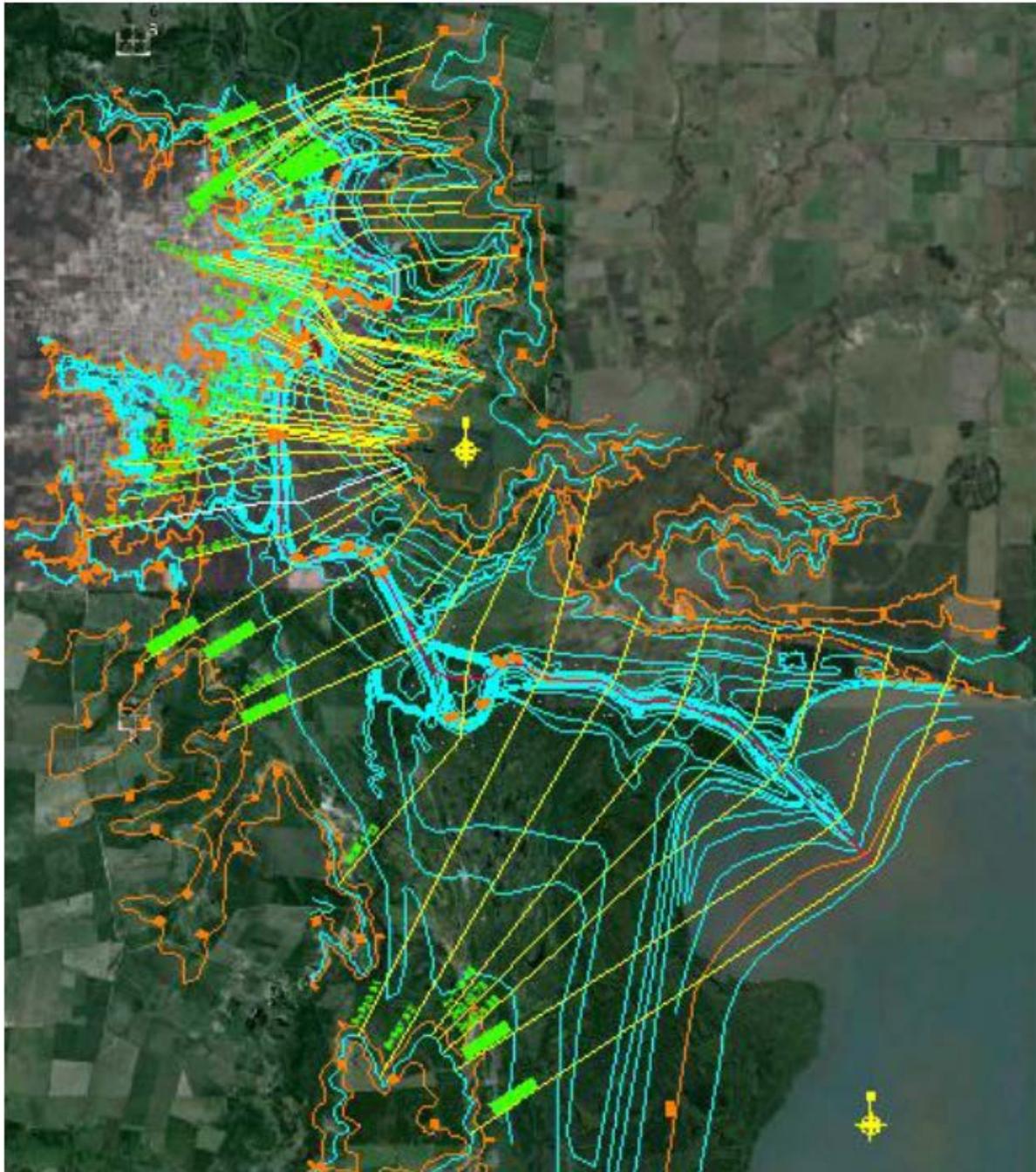


Figura 3-1: Vista general de perfiles del modelo HEC-RAS (INCOCIV)

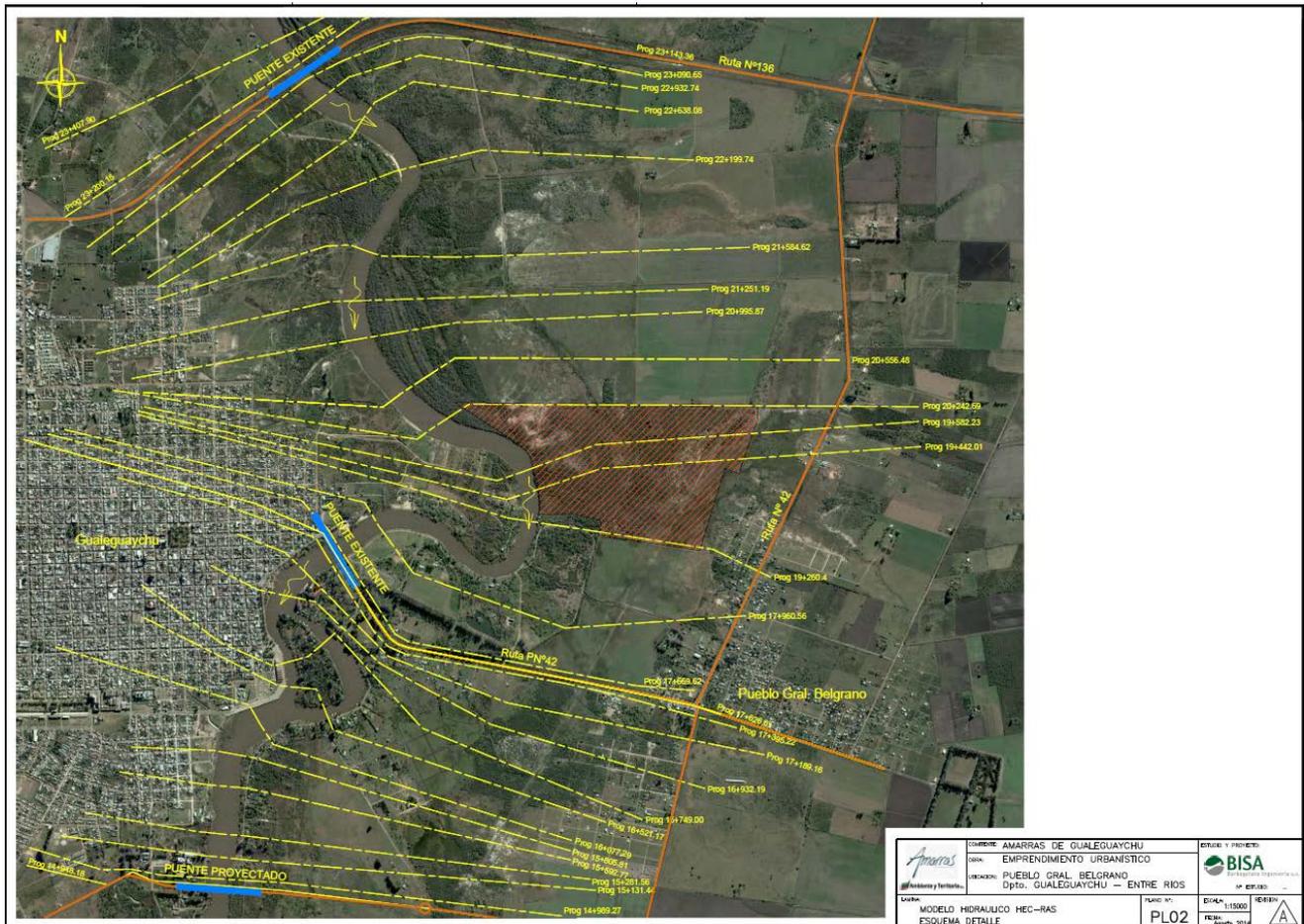


Figura 3-2: Vista detallada de perfiles del modelo HEC-RAS en inmediaciones del área de estudio (BISA)

De acuerdo a INCOCIV, los coeficientes de rugosidad del cauce y las márgenes inundables se ajustaron en función de la altura de las crecidas en la escala del Puerto de Gualeguaychú, haciendo coincidir la estadística de alturas y con los niveles producidos por los caudales calculados para similares recurrencias (promedio entre los Escenarios 2 y 3 de precipitación). Si bien en la realidad no existe una correlación directa entre alturas y caudales, la consultora adoptó este criterio como punto de partida por no existir aforos ni una curva altura-caudal en el tramo de estudio. Se comenta que muchas de las crecientes de mediana importancia se deben al efecto de curva de remanso del río Uruguay, y que aún en crecidas del río Gualeguaychú parte de las inundaciones pueden estar afectadas por este fenómeno, por lo que la suposición adoptada podría dar niveles de inundación un poco mayores a los reales. Como resultado del ajuste realizado se obtuvieron coeficientes de rugosidad de Manning de 0,023 para el cauce y 0,08 para el valle de inundación. En coincidencia con las líneas de flujos interrumpidas por construcciones, terraplenes y obstrucciones se ingresaron áreas de flujo inefectivas aguas arriba y aguas abajo de las mismas, en estos sitios el modelo considera que el agua mantiene el nivel del resto del perfil pero no tiene velocidad.

En Tabla siguiente se presentan para las distintas recurrencias los niveles del Puerto según análisis de frecuencia y los simulados con el modelo HEC-RAS con dos condiciones del río Uruguay, correspondientes a niveles superados el 2% (2,86 m IGN) y el 10% (1,96 m IGN) del tiempo.

De los resultados se deduce que para crecidas de 5 o menos años de recurrencia existe correspondencia entre recurrencia de alturas y caudales cuando se modela con un nivel del río Uruguay superado el 10% del tiempo. Para recurrencias superiores a 20 años, la altura del río Uruguay tiene menor influencia pudiendo considerarse los resultados de una u otra simulación indistintamente.

Análisis Frecuencia		HEC-RAS Niveles en el Puerto (RS 16749)		
R alturas	Nivel	R caudales	Huru 2%	Huru 10%
años	m IGN	años	m IGN	m IGN
2	2.90	2	3.46	2.97
5	3.59	5	3.89	3.58
20	4.47	20	4.51	4.39
100	5.43	100	5.47	5.44
500	6.30	500	6.08	6.06

Tabla 3-1: Comparación de niveles para diferentes recurrencias obtenidos mediante análisis de frecuencia y mediante la modelización HEC-RAS con dos diferentes niveles en el río Uruguay

Considerando la falta de información existente debido a que el Estado no realiza mediciones sistemáticas de caudal del río en la zona de la ciudad de Gualeguaychú, similares a las que se efectúan en la Ruta Prov. 39, y las incertezas en cuanto a la selección del ajuste estadístico de niveles extremos en Puerto Gualeguaychú ya comentadas, el procedimiento seguido por INCOCIV se considera razonable.

Por otro lado, si bien no resulta relevante para la presente verificación del modelo unidimensional, cuando se implemente la modelización bidimensional se ha previsto realizar análisis de sensibilidad con respecto a los coeficientes de rugosidad, dado que los mismos influyen decisivamente en la distribución de caudales entre el cauce principal y la planicie de inundación, y pueden tener una influencia no despreciable en la estimación del impacto hidráulico del emprendimiento Amarras.

3.3 CONDICIONES DE BORDE

3.3.1 Caudales aguas arriba

La condición de borde de caudal ha sido establecida por INCOCIV y BISA como el promedio de los caudales pico de los Escenarios 2 y 3 de precipitación.

Las corridas del modelo fueron realizadas en ambos casos en forma estacionaria, es decir, con caudal permanente igual al valor pico, empleando los valores de la Tabla 2-1.

Este procedimiento resulta adecuado para el análisis del nuevo puente efectuado por INCOCIV, dado que el mismo genera una obstrucción al escurrimiento prácticamente "lineal" (no hay pérdida sensible de volumen de almacenamiento en la planicie inundable).

En cambio, para el estudio de Amarras, el área de implantación ha sido modelizada en los perfiles del HEC-RAS considerando que la misma no almacena agua, como si fuera un polder (predio rodeado por un terraplén que lo aísla del flujo fluvial). Si bien el emprendimiento incluye áreas sobreelevadas que implican una merma en la capacidad de almacenamiento de la planicie, las mismas sólo representan una fracción de la superficie del predio, dado que importantes extensiones del mismo quedarán con la cota del terreno natural o por debajo de ella (como sucederá con la laguna y el canal de acceso).

Por lo tanto, el criterio seguido por BISA para representar en el HEC-RAS el predio de Amarras es conservativo (seguro), pero al correr el modelo en forma estacionaria, los efectos de atenuación de la crecida por almacenamiento lateral no son simulados. Cuando ocurre una crecida, mientras que el caudal y el nivel se encuentran en ascenso, se deriva agua desde el cauce hacia la planicie, ocupando el volumen de almacenamiento lateral disponible, lo cual reduce el caudal erogado por el río, y por lo tanto contribuye a que el ascenso del nivel sea más moderado. Al eliminar una parte de ese volumen elevando la cota del terreno, el caudal en el cauce del río se incrementa, con el asociado aumento de nivel de agua. Ahora bien, la influencia real de este efecto puede ser o no significativa, según cuanto sea el volumen que se resta a la planicie por causa de la obra.

Existe entonces un efecto de la implantación de Amarras que no se estimó con la aplicación del modelo HEC-RAS en modo permanente, y que se puede estimar en forma conservativa, efectuando simulaciones impermanentes, para las cuales se comparen los niveles máximos en la situación actual, con los niveles obtenidos utilizando las secciones "polderizadas" del predio de Amarras definidas por BISA, determinando así las sobreelevaciones resultantes.

Los hidrogramas correspondientes al río Gualeguaychú en la zona del Nuevo Puente estudiado por INCOCIV, provistos por BISA, para los Escenarios de precipitación 2 y 3, así como para el promedio, se presentan en las siguientes figuras.

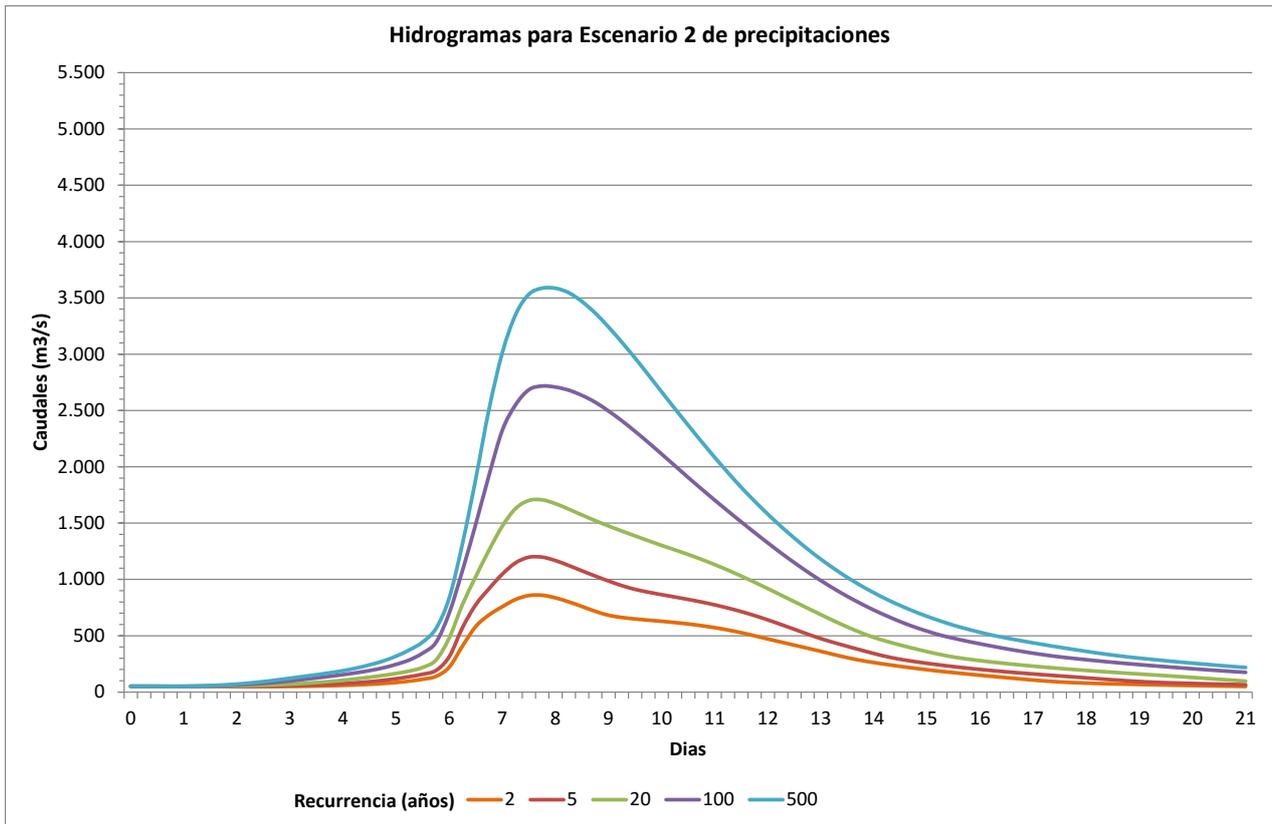


Figura 3-3: Hidrogramas para una precipitación uniforme en tiempo pero no en el espacio

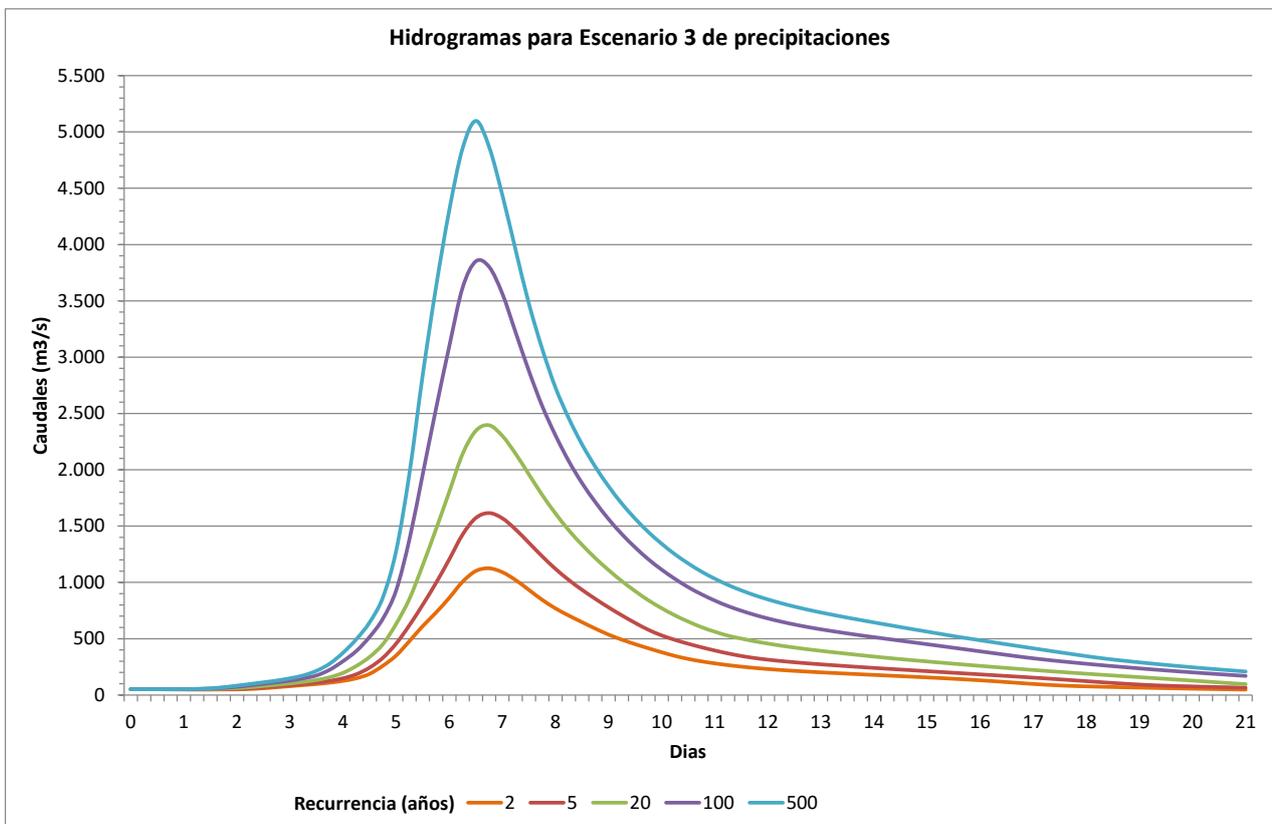


Figura 3-4: Hidrogramas para precipitaciones no uniformes en tiempo y en el espacio

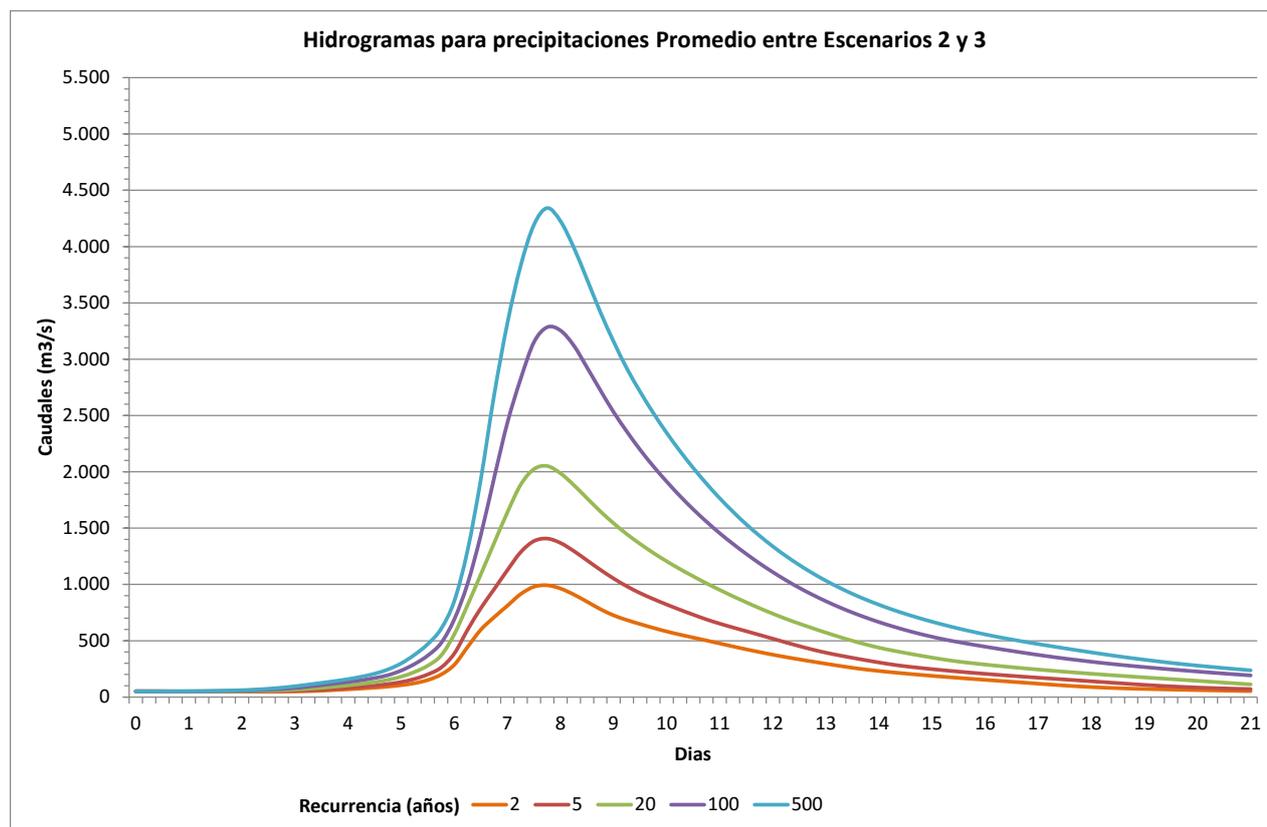


Figura 3-5: Hidrogramas promediado según el criterio aplicado por INCOCIV y BISA

En esta etapa inicial del estudio se emplearán los hidrogramas con recurrencias de 5, 20, 100 y 500 años, para las cuales las obras de Amarras provocan obstrucciones al flujo, correspondientes al Escenario Promedio (criterio de INCOCIV y BISA).

También se realizará el análisis de Sensibilidad A, simulando las condiciones de caudal calculadas para el Escenario 3 de precipitación con recurrencias extraordinarias de 100 y 500 años, y el análisis de Sensibilidad B, considerando estos hidrogramas de caudales pero maximizados con un factor 1,2, a los efectos de representar aproximadamente y de manera conceptual el impacto del incremento de precipitación que podría llegar a ocurrir hacia fin del presente siglo, según los pronósticos de modelos globales climáticos operados para la hipótesis más desfavorable de emisiones de gases de efecto invernadero (CIMA, 2015).

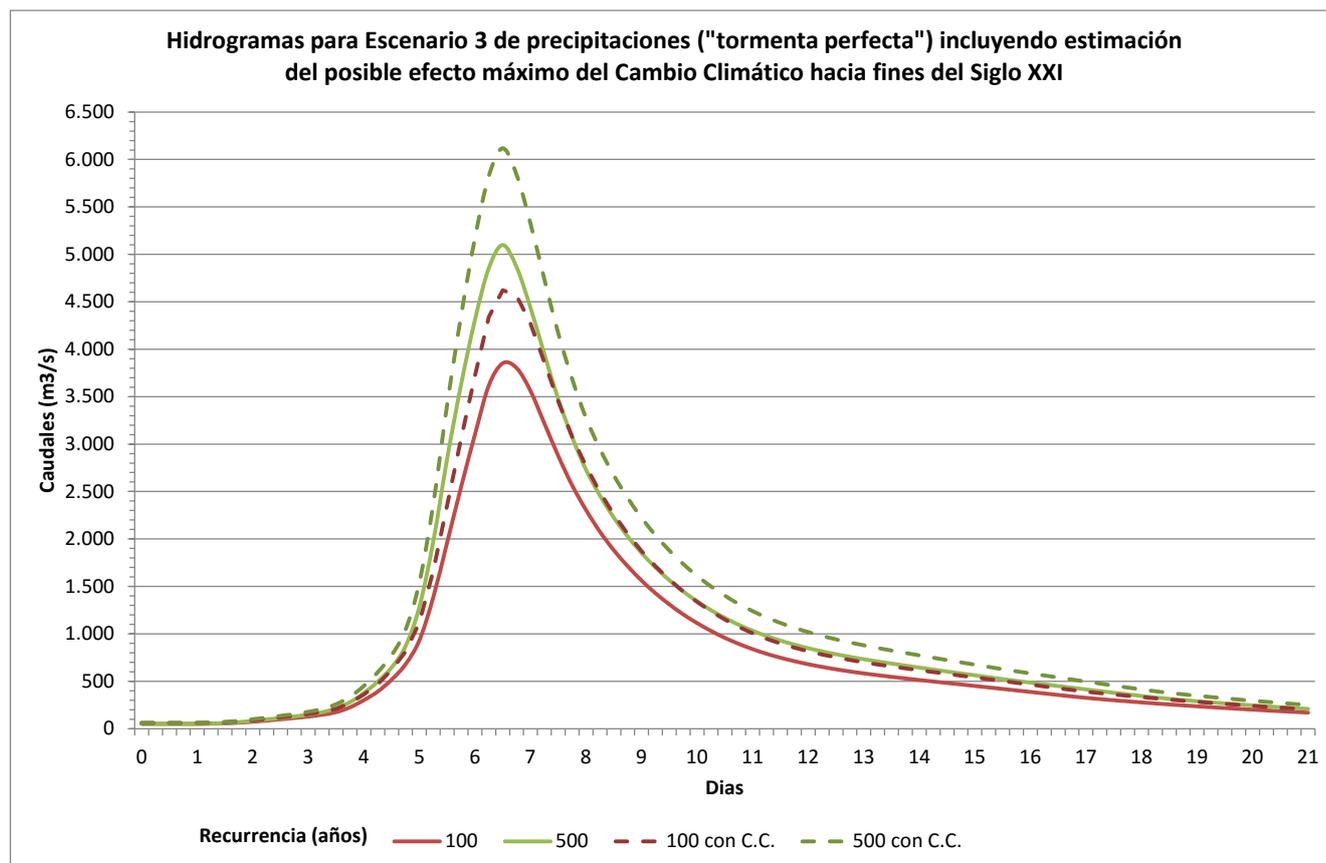


Figura 3-6: Hidrogramas para precipitaciones no uniformes en tiempo y en el espacio con consideración del posible efecto del Cambio Climático

3.3.2 Niveles aguas abajo

Si bien las condiciones de nivel en la desembocadura empleadas para la calibración del modelo HEC-RAS han sido requeridas y validadas por la DHER y se consideran razonables como criterio de evaluación, cabe recordar que la crecida de 1959 alcanzó una cota de 6,50 m IGN en Puerto Gualeguaychú, superior en más de 40 cm a la que resulta de la modelización HEC-RAS efectuada para la recurrencia de 500 años y con nivel superado el 2% del tiempo en la desembocadura.

Por esta razón y tal como se comentó previamente, se considera conveniente efectuar una modelización adicional que tenga en cuenta la cota del pelo de agua en la desembocadura correspondiente a la crecida de 1959 (5,73 m IGN). Esta condición se denomina "Sensibilidad C" y se combinará con la condición correspondiente a una "Tormenta perfecta" de 500 años de recurrencia más la influencia del Cambio Climático, correspondiente a la "Sensibilidad B" de caudal.

Asimismo, se combinó la situación con una condición de borde aguas abajo correspondiente a la crecida de 1959, con una condición de caudal para la cual el modelo calcula un nivel del río en Puerto Gualeguaychú similar al ocurrido en dicha crecida (6,50 m IGN), y se la denominó Sensibilidad D.

3.4 ANÁLISIS DE LA INUNDABILIDAD ACTUAL DEL ÁREA

El estudio de INCOCIV presenta un detallado análisis de la inundabilidad de la zona y su comparación con los resultados del modelo HEC-RAS y de las fotografías aéreas que brindó la Secretaría de Planeamiento de la Municipalidad de Gualeguaychú con la crecida de agosto de 2012, que llegó a un pico de 3,98 m de altura en el hidrómetro del puerto local, el cual corresponde a una recurrencia de 4 a 5 años y una cota IGN de 3,48 m.

La siguiente imagen ilustra la condición de inundación del área comprendida entre la Ruta Nac. 136 y el Puente La Balsa, quedando comprendida en la misma toda la zona de implantación del emprendimiento Amarras.

El informe de INCOCIV indica que para estas recurrencias bajas la zona urbana de la ciudad no se inunda, pero sí el Parque Unzué y la península ubicada al norte del Puente de la Balsa, frente al área de implantación de Amarras.

Además se producen sobreelevaciones en el flujo producto de la presencia de los puentes que no tienen la suficiente sección para dejar pasar las crecientes más importantes. Este efecto es un poco más importante en el puente de la Balsa que en el de la Ruta Nac. N° 136 para crecientes menores, pero para creciente de más de 100 años de recurrencia es mayor en el puente de la Ruta Nac. N° 136 que en el Puente de la Balsa, porque en estos casos se produce el sobrepaso de los terraplenes de acceso en este último.

Para analizar el efecto de las obstrucciones al flujo se modeló una situación sin los puentes ni los terraplenes de accesos y sin edificaciones que obstruyan el flujo.

Como resultados se obtuvieron incrementos de 8 a 55 cm para el caso del Puente de la Balsa y de 8 a 74 cm para el puente de la Ruta Nac. N° 136, para crecidas de 2 a 500 años de recurrencia.

Resulta muy relevante el hecho la conclusión que se desprende del estudio de INCOCIV, de que se podrían reducir los niveles de inundación en las ciudades de Gualeguaychú y Pueblo General Belgrano en algunas decenas de centímetros según la recurrencia, si el terraplén de acceso al Puente de la Balsa (Ruta Prov. N° 42) se modificara agregando mayor cantidad de puentes aliviadores de modo de aumentar su transparencia al flujo, que actualmente es muy reducida.



Figura 3-7: Fotografías aéreas de las condiciones de inundación ocurridas en agosto de 2012

Por otro lado, resulta de interés para el presente estudio, analizar los efectos del Nuevo Puente estudiado por INCOCIV, dado que se prevé que su traza sea aproximadamente coincidente con el borde de aguas abajo del modelo bidimensional, y por lo tanto resulta necesario identificar si el terraplén de acceso al mismo provocará sobreelevaciones del nivel de agua, aguas arriba del mismo.

La zona de implantación del Nuevo Puente se ilustra en las siguientes fotografías, extraídas del estudio de INCOCIV, correspondientes a la inundación moderada de agosto de 2012, y de otra de recurrencia aproximada 30 años, ocurrida en el año 2007 con un nivel pico de 5,22 m en la escala del Puerto. Las condiciones de caudal y nivel simuladas consideraron que a medida que el caudal se incrementa, es menos probable que el nivel aguas abajo sea elevado. Se realizó además una estimación del nivel que tendría el río Uruguay descontando la pendiente desde la escala Boca Gualeguaychú hasta la finalización del cauce del río en un tramo de 2,2 km de longitud.

Se ensayaron diferentes configuraciones de puente principal y aliviaderos en la planicie con la premisa fundamental de no provocar incremento en los niveles de inundación que ya se producen en la situación actual, tratando simultáneamente de minimizar la inversión para cumplir con este objetivo, evitando sobredimensionamientos que tienen repercusiones hidráulicas insignificantes aunque tienen costos muy importantes.



Crecida año 2012



Crecida año 2007

Figura 3-8: Fotografías aéreas de las condiciones de inundación ocurridas en 2012 y 2007 en la zona de implantación del Nuevo Puente

Las alternativas consideradas fueron:

1. Alternativa con 510 m de luz total de puentes (puente principal de 390 m de luz, puente de 30 m de luz para cruce bajo nivel de la calle de ingreso al predio del Frigorífico, un aliviador de 30m de luz en la zona baja al este del camino de la costa, y otro de 60 m en el valle de inundación antes de llegar al camino sur del límite de Pueblo Belgrano). Produce importantes incrementos en los niveles aguas arriba del nuevo puente, de 40 cm para la creciente de 2 años de recurrencia, hasta 52 cm para la creciente de 500 años de recurrencia.
2. Alternativa con 510 m de luz total de puentes y excavaciones de las salientes presentes en las márgenes en la zona del cruce del puente principal, en la margen del frigorífico de unos 15 m de ancho, por unos 120 m de longitud, y del lado de la margen Este junto al camino de la costa en unos 520 m de longitud y hasta en unos 70 m de ancho, quedando unos 40 m desde el camino de la costa a la nueva margen. De esta forma se logra no producir incrementos de niveles con la obra, obteniéndose en cambio reducciones de menos de 10 cm aguas arriba (debido al efecto del dragado). Aunque estos valores resultan aceptables, debido a la sensibilidad a la respuesta hidráulica por tratarse de una obra que afecta un área urbanizada, se planteó otra alternativa que sea más holgada en cuanto a las secciones de paso, mejore el funcionamiento de los aliviadores y optimice la ubicación del puente principal.
3. Alternativa con 570 m de luz total de puentes, excavaciones y desplazamiento, similar a la anterior, pero incrementando los aliviaderos en una luz de 30 m cada uno, con lo que el primero pasa a 60 m y el segundo a 90 m, y se prevén futuras canalizaciones de ingreso a los mismos.

En la siguiente figura se ilustra la configuración resultante.



Figura 3-9: Esquema final de diseño hidráulico para la implantación del Nuevo Puente

La primera conclusión que puede obtenerse del análisis, es que la eventual construcción del Nuevo Puente y sus accesos no empeoraría la situación en cuanto a los niveles del río en crecidas, por lo que no será necesario contemplarlo en la modelización bidimensional. Resulta destacable además, que el planteo de la excavación del cauce sea la llave que soluciona el problema de la sobreelevación del nivel de agua hacia aguas arriba que causa la interposición del terraplén en el flujo del río.

Como primer paso para el análisis de la situación con proyecto, se verificó la simulación de la condición actual. Se encontró que la modelación efectuada por BISA considera como situación "Actual", la geometría final del estudio del CFI (INCOCIV) incluyendo el nuevo Puente. Teniendo en cuenta que el Nuevo Puente junto con sus canales aliviadores y la excavación y rectificación del estrechamiento del cauce del río Gualeguaychú generan una leve disminución de los niveles aguas arriba, se consideró más apropiado representar la situación Actual (así como la situación con el emprendimiento Amarras), sin las obras asociadas al Nuevo Puente.

En consecuencia se modificó la geometría y las áreas inefectivas de flujo en todos los perfiles afectados por estas obras alrededor de la progresiva del Nuevo Puente, restableciendo las condiciones originales, que se encontraban incluidas en la geometría "Rio Gchu Sit Actual" del estudio de INCOCIV, pero manteniendo los nuevos perfiles relevados en la zona de Amarras.

Se encontró que en la situación actual el estrechamiento del cauce existente en la zona de posible implantación del Nuevo Puente, genera un incremento localizado de velocidades del flujo, con un leve descenso del nivel de agua, y una "pérdida de carga" que implica un aumento del nivel hacia aguas arriba, con respecto a la situación con Nuevo Puente (y excavación más aliviadores).

La reducción de nivel obtenida en la simulación originalmente efectuada con estas obras (modelada con HEC-RAS 4.0), respecto a la situación actual modelada con HEC-RAS 5.0), para la crecida de recurrencia 500 años con nivel superado 2% en el río Uruguay, es de unos 10 cm inmediatamente aguas arriba de la zona del estrechamiento, reduciéndose rápidamente a un orden de magnitud de 5 cm, que a la altura de la zona del emprendimiento Amarras es de sólo 1 cm. Queda en evidencia que considerar, o no, el Nuevo Puente, resulta prácticamente irrelevante a los efectos del análisis del impacto de Amarras.

La siguiente figura permite visualizar los resultados de las simulaciones efectuadas. Las condiciones indicadas como Plan “Actual-EscP-Perm”, son las que se han simulado para el presente estudio, no incluyen el Nuevo Puente, y consideran el Escenario de precipitaciones Promedio y un caudal Permanente (igual que lo realizado en los estudios previos).

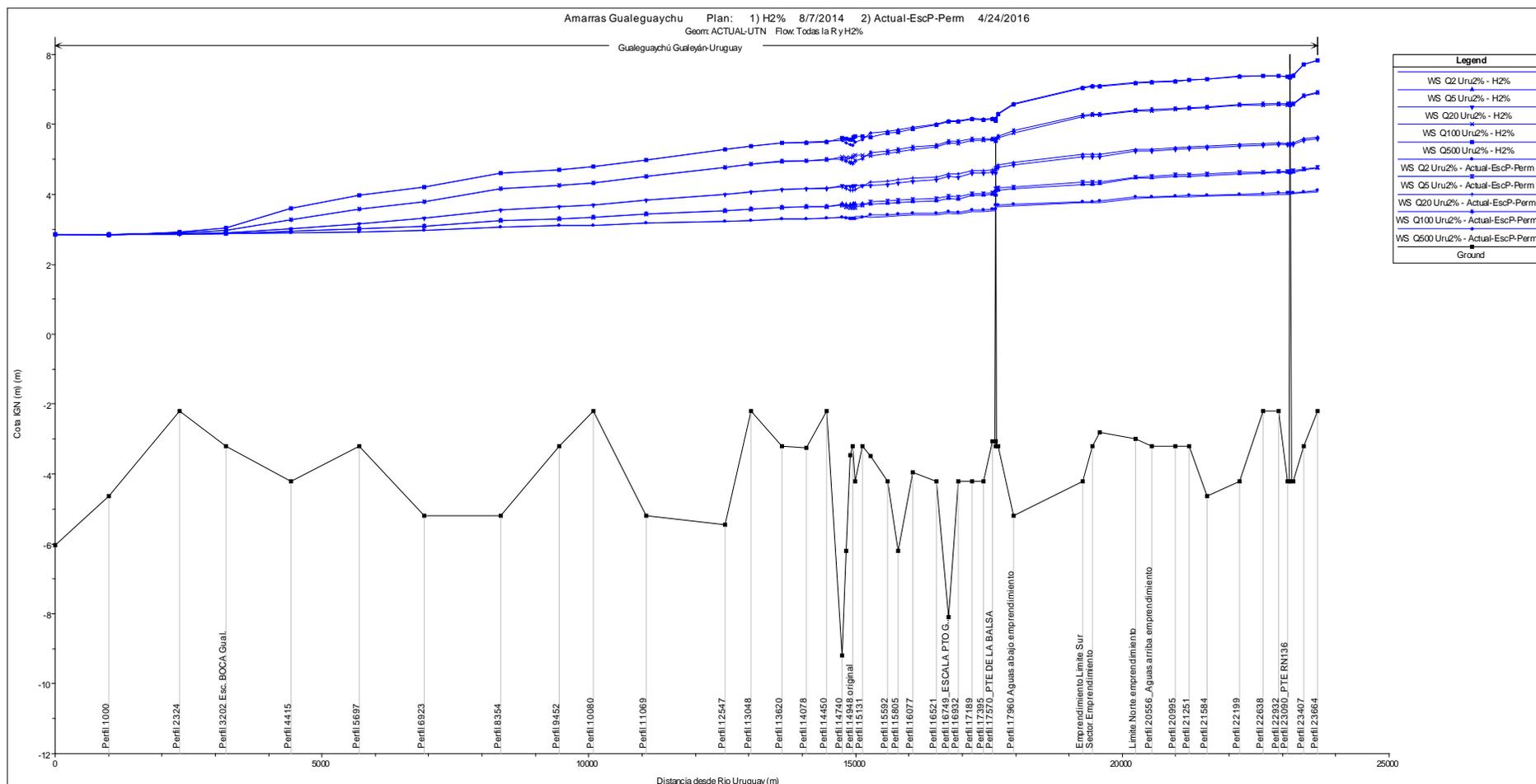


Figura 3-10: Comparación de resultados para la situación Actual y considerando el Nuevo Puente (estudio del CFI – INCOCIV)

3.5 ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN CON PROYECTO

3.5.1 Resultados del estudio de BISA

Los resultados obtenidos a través del estudio de BISA, se resumen a continuación:

TABLA 13: NIVELES CRECIDA PARA LA SITUACIÓN ACTUAL EN SECTOR EMPRENDIMIENTO PARA UNA ALTURA DEL RÍO URUGUAY DE 2% DE PERMANENCIA

PERFIL	Recurrencias caudales río Gualeguaychú				
	R=2 años	R=5 años	R=20 años	R=100 años	R=500 años
	m IGN	m IGN	m IGN	m IGN	m IGN
20+242	3.88	4.46	5.23	6.38	7.19
19+582	3.76	4.30	5.08	6.26	7.09
19+442	3.76	4.29	5.08	6.26	7.09
19+254	3.76	4.29	5.07	6.23	7.05

TABLA 14: NIVELES CRECIDA PARA LA SITUACIÓN CON OBRA EN SECTOR EMPRENDIMIENTO PARA UNA ALTURA DEL RÍO URUGUAY DE 2% DE PERMANENCIA

PERFIL	Recurrencias caudales río Gualeguaychú				
	R=2 años	R=5 años	R=20 años	R=100 años	R=500 años
	m IGN	m IGN	m IGN	m IGN	m IGN
20+242	3.89	4.46	5.25	6.41	7.22
19+582	3.76	4.30	5.06	6.23	7.04
19+442	3.75	4.29	5.06	6.23	7.04
19+254	3.76	4.29	5.05	6.19	7.00

Tabla 3-2: Resultados obtenidos por BISA con y sin Amarras para diferentes recurrencias

En la sección ubicada más aguas arriba (20+242), la sobreelevación resultante es la siguiente:

Recurrencia de Caudal (años)	Escenario de Precipitación	Nivel en Boca Gual. (m IGN)	Nivel "Actual" en zona Amarras (Perf. 20+242) (m IGN)	Sobreelevación máxima en Zona Amarras (Perf. 20+242) (m)	Sobreelevación máxima Aguas Arriba Amarras (Perf. 20+556) (cm)
5	Promedio	2%	4.5	0.00	0
20	Promedio	2%	5.2	0.02	2
100	Promedio	2%	6.4	0.03	5
500	Promedio	2%	7.2	0.03	7

Tabla 3-3: Resultados de sobreelevación obtenidos por BISA con y sin la Obra de Amarras para diferentes recurrencias de caudal, simulado en forma estacionaria (Caudal Permanente)

3.5.2 Escenario Base (caudal promedio entre Escenarios 2 y 3 de precipitación)

Para analizar la situación con proyecto, se consideró la afectación generada por las obras del emprendimiento Amarras, bloqueando el ingreso de agua a la totalidad del predio, de la misma manera que lo realizado en el estudio de BISA, sobre la base de la geometría del río sin Nuevo Puente. Cabe recordar que esta es una hipótesis conservadora ligada a las características de un modelo unidimensional, dado que en realidad la zona ocupada por Amarras no es un polder cerrado y por lo tanto, la porción de la planicie inundable que se elimina al almacenamiento de agua, es menor.

En primer lugar, se repitió la simulación realizada previamente por BISA, considerando el caudal pico Promedio entre los Escenarios 2 y 3 en forma estacionaria.

El resultado se presenta en las figuras siguientes, donde puede apreciarse que la influencia global de Amarras resulta similar a la prevista por BISA, es decir, se produce un leve descenso de los niveles frente al predio, y una sobreelevación de unos 2 cm para recurrencia de caudal 20 años, 6 cm para 100 años, y 7 cm para 500 años.

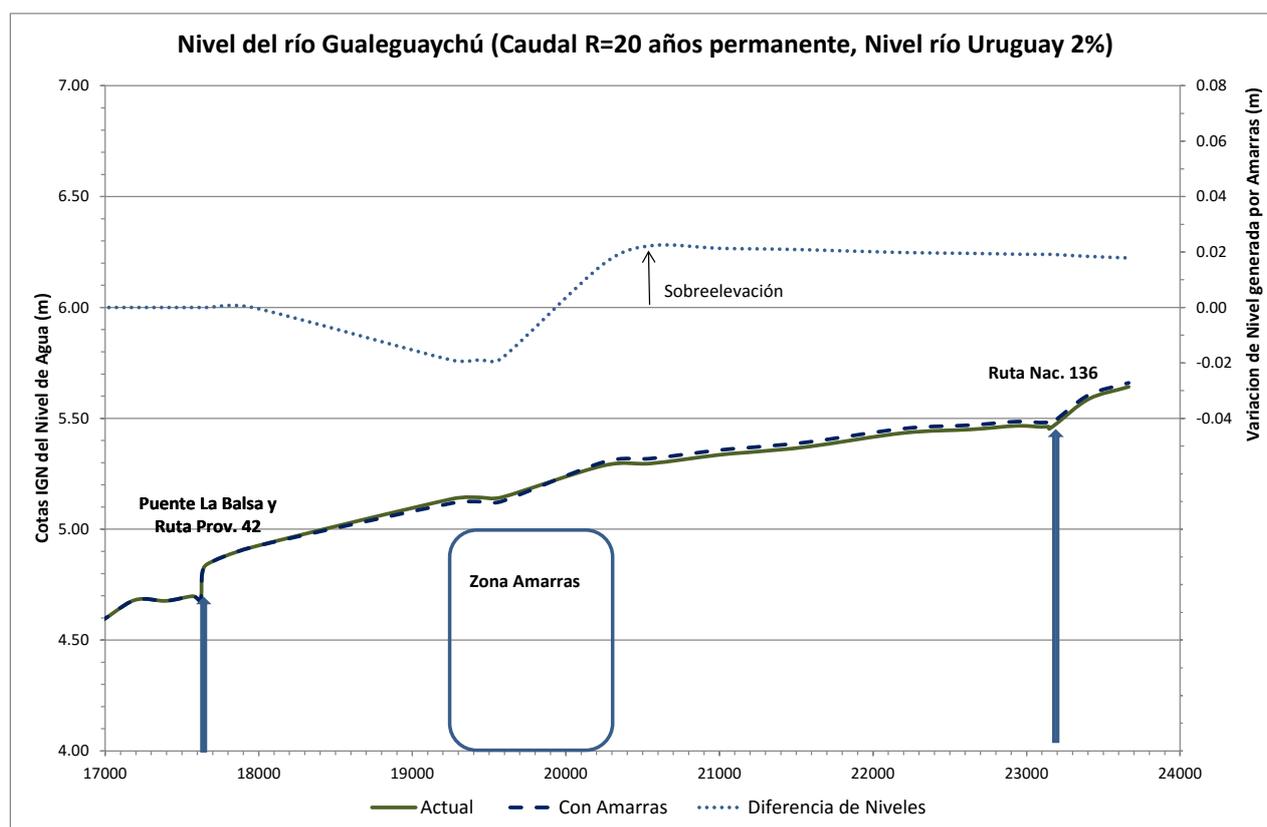


Figura 3-11: Influencia de Amarras en los niveles del río para recurrencia 20 años (Caudal Permanente)

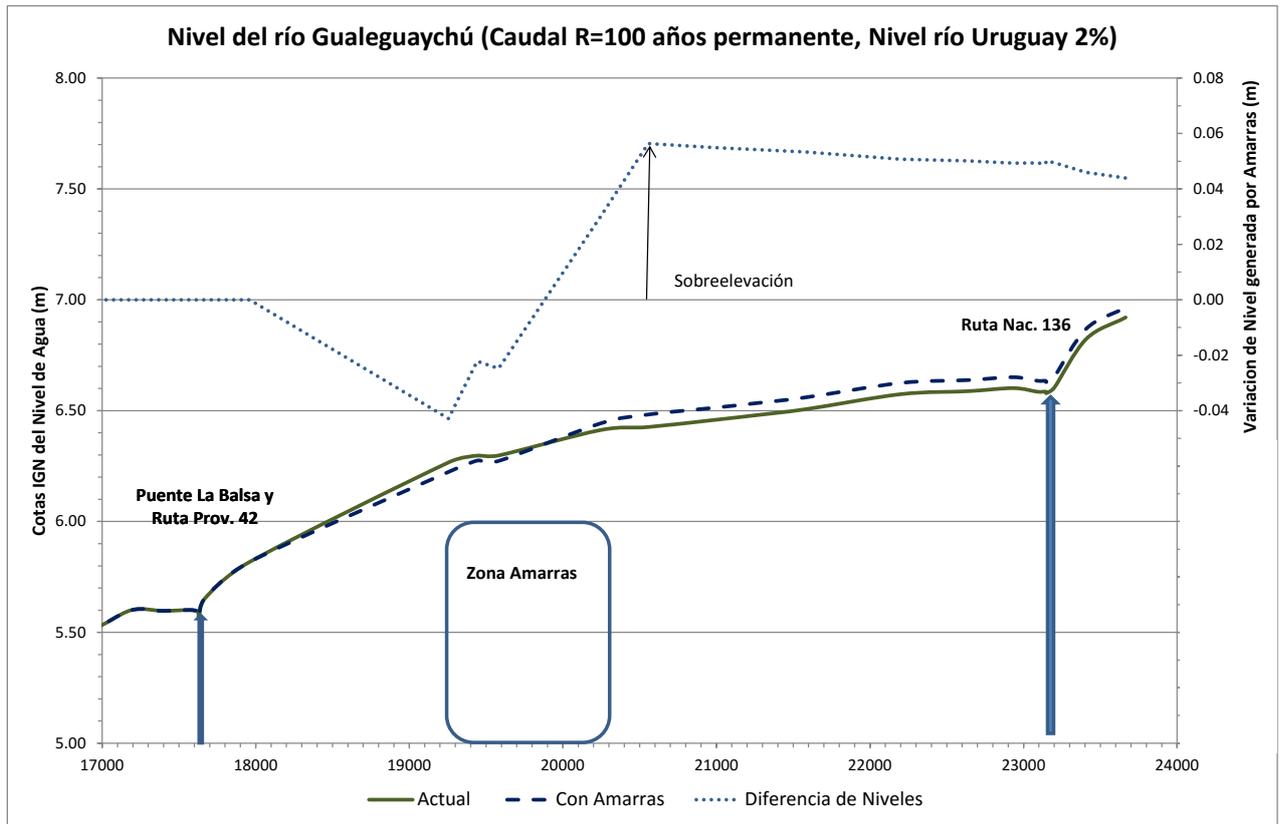


Figura 3-12: Influencia de Amarras en los niveles del río para recurrencia 100 años (Caudal Permanente)

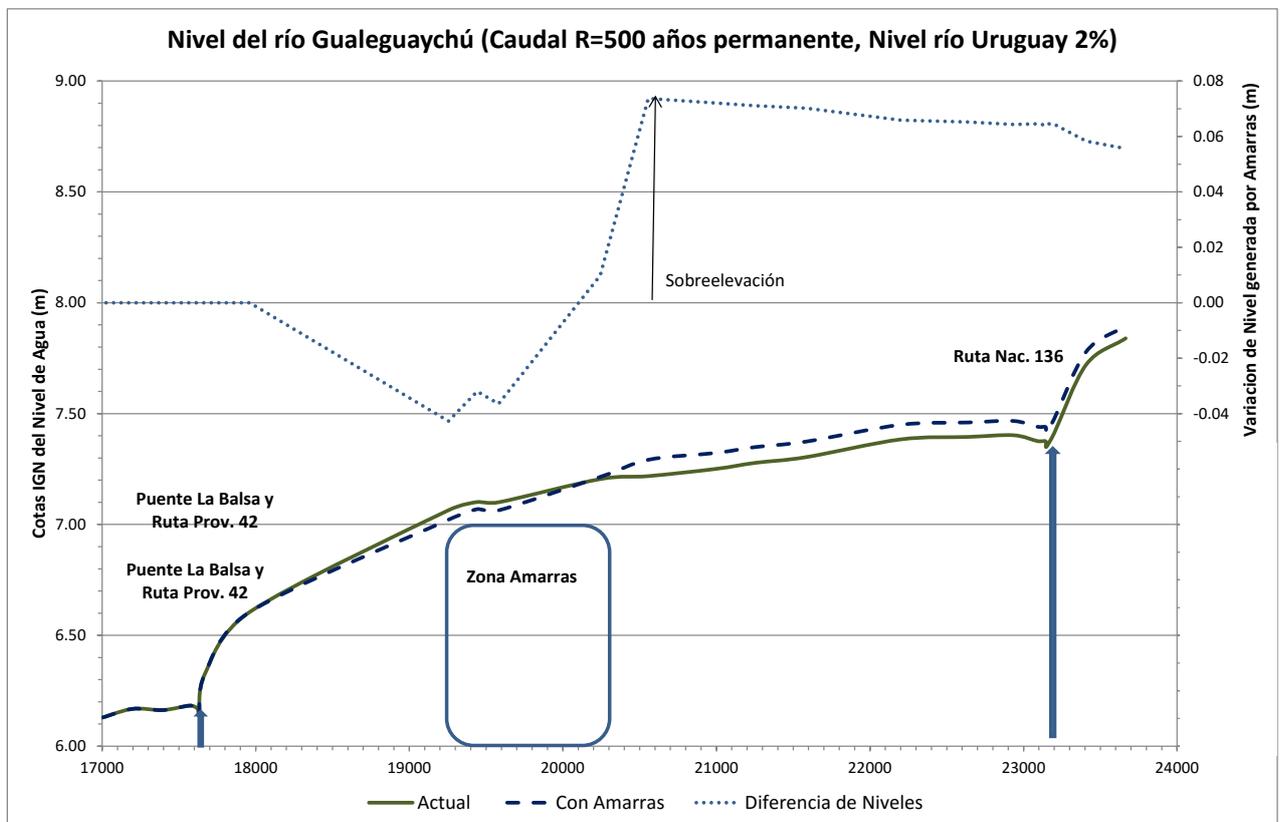


Figura 3-13: Influencia de Amarras en los niveles del río para recurrencia 500 años (Caudal Permanente)

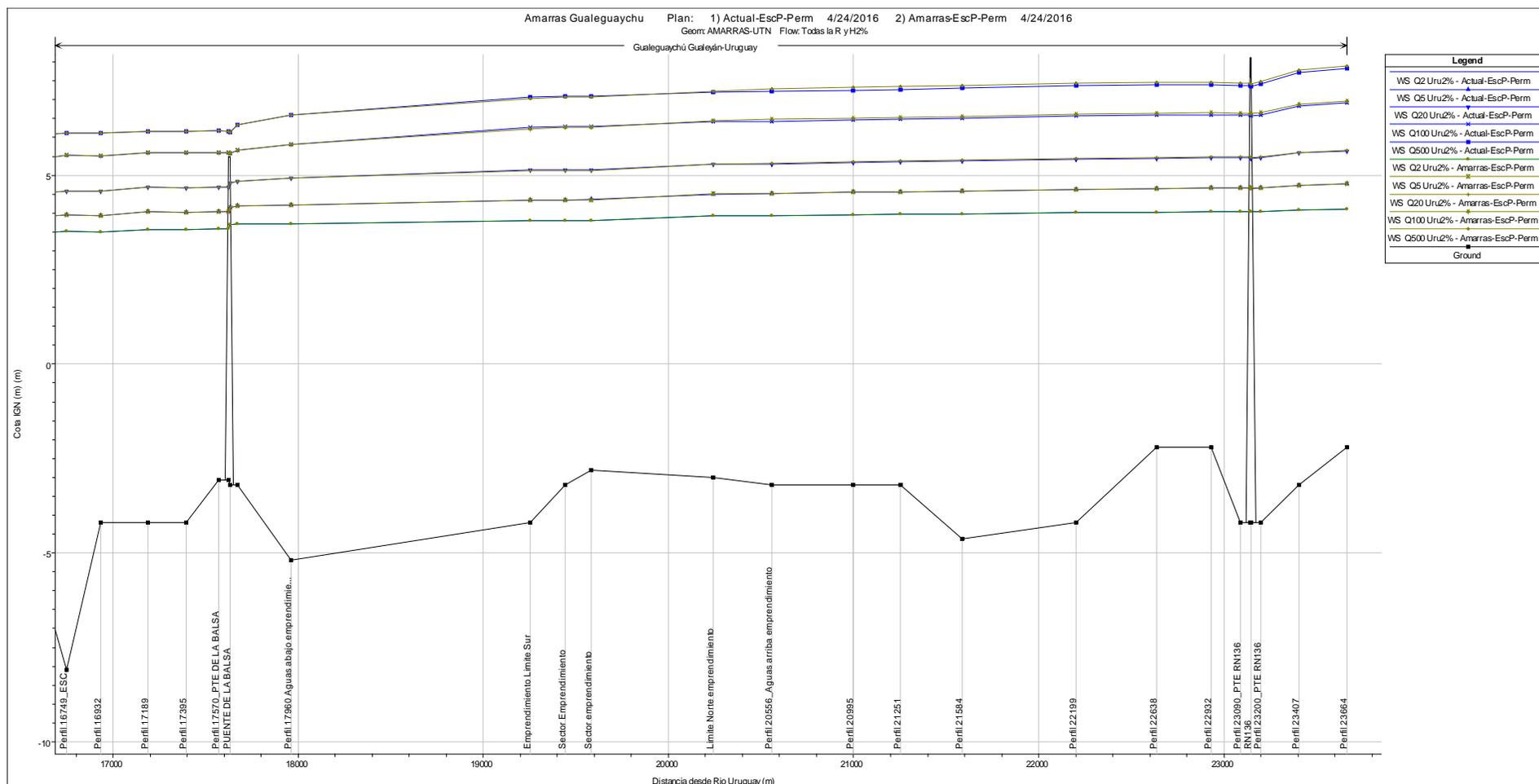


Figura 3-14: Comparación de resultados para la situación Actual y con Amarras (Caudal Permanente)

A continuación se realizó la misma evaluación, pero en forma impermanente, considerando un hidrograma ingresante en la sección de la Ruta Nac. N° 13, igual al estimado por INCOCIV para la sección del Nuevo Puente, para cada recurrencia, de tal forma de poder detectar el efecto de almacenamiento en la planicie, tanto en relación con los caudales y niveles en la condición actual, como con el emprendimiento Amarras.

Se simuló la situación más exigente desde el punto de vista del caudal y la sobreelevación, correspondiente a la recurrencia de 500 años, y se seleccionó el instante en el cual se encuentra el pico de nivel en el hidrograma. El perfil del río y el hidrograma de niveles en la zona del emprendimiento, se pueden apreciar en las figuras siguientes.

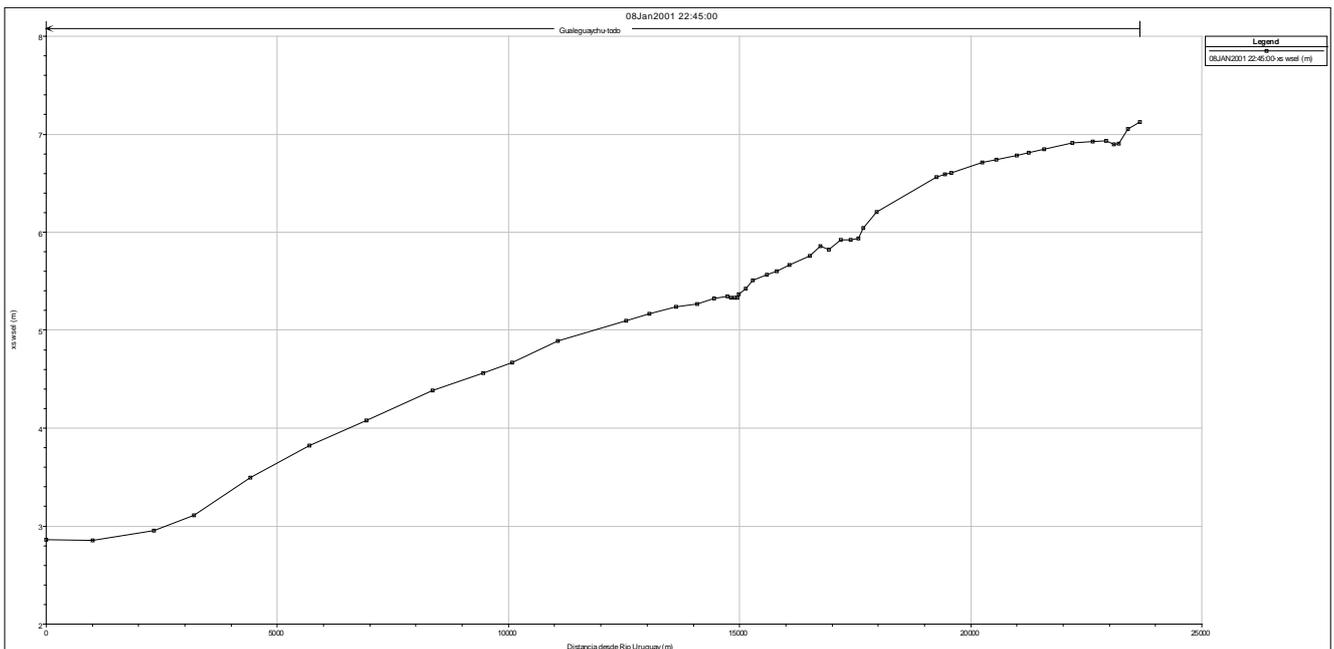


Figura 3-15: Niveles Máximos en la zona de Amarras para la situación Actual (Caudal Impermanente)

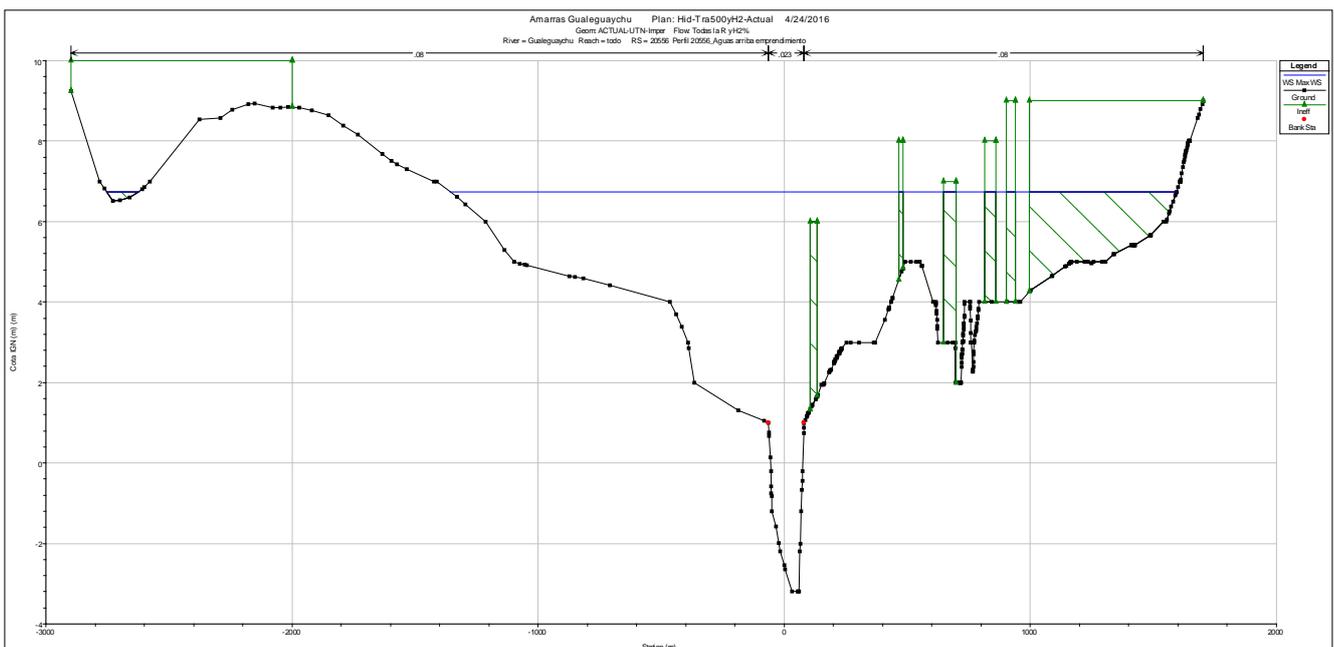


Figura 3-16: Nivel Máximo unos 100 m aguas arriba de Amarras para la situación Actual (Progresiva 20556)

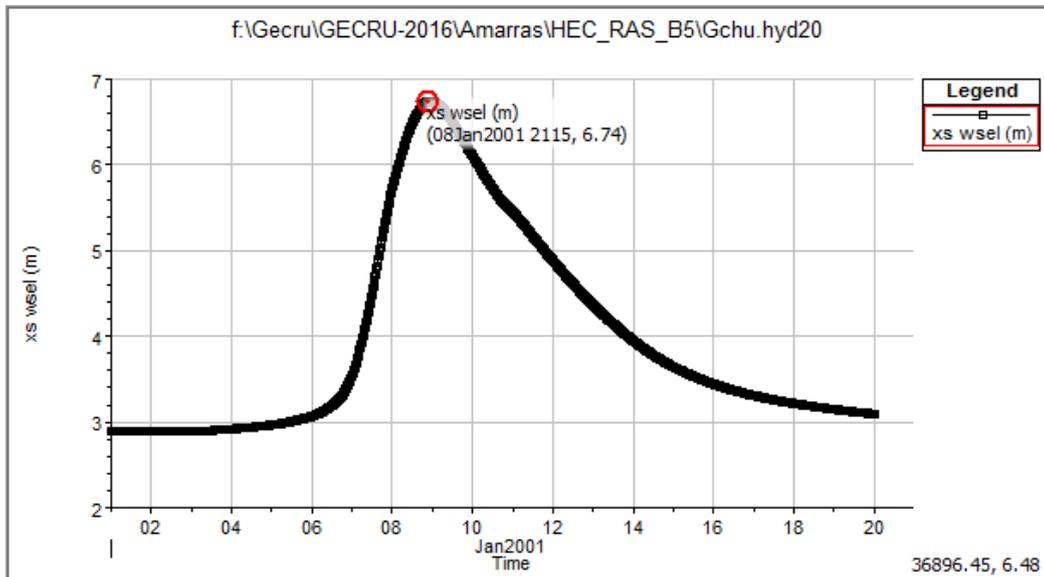


Figura 3-17: hidrograma de Niveles aguas arriba de Amarras para la situación Actual (Prog. 20.556)

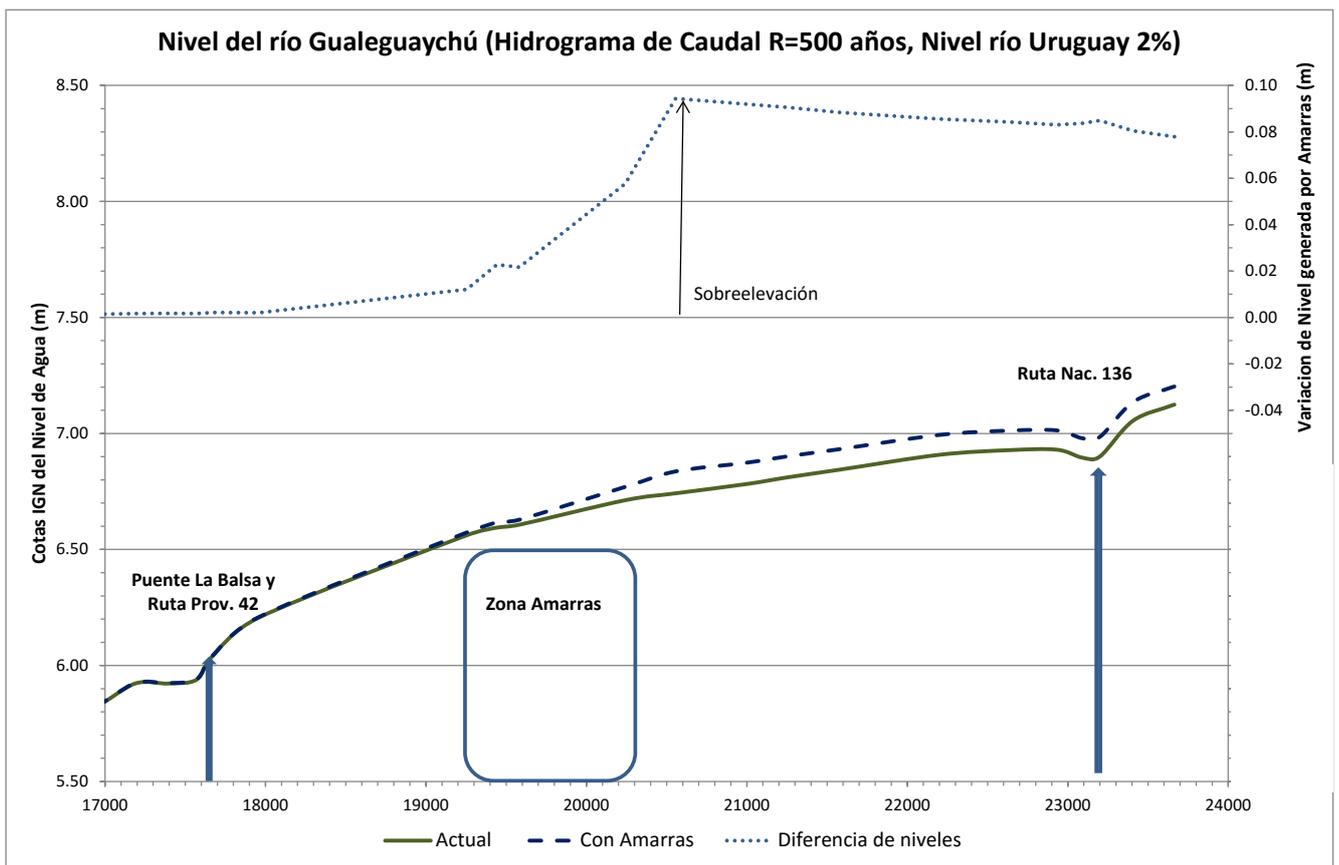


Figura 3-18: Influencia de Amarras en el perfil de nivel del río para recurrencia 500 años (Caudal Impermanente)

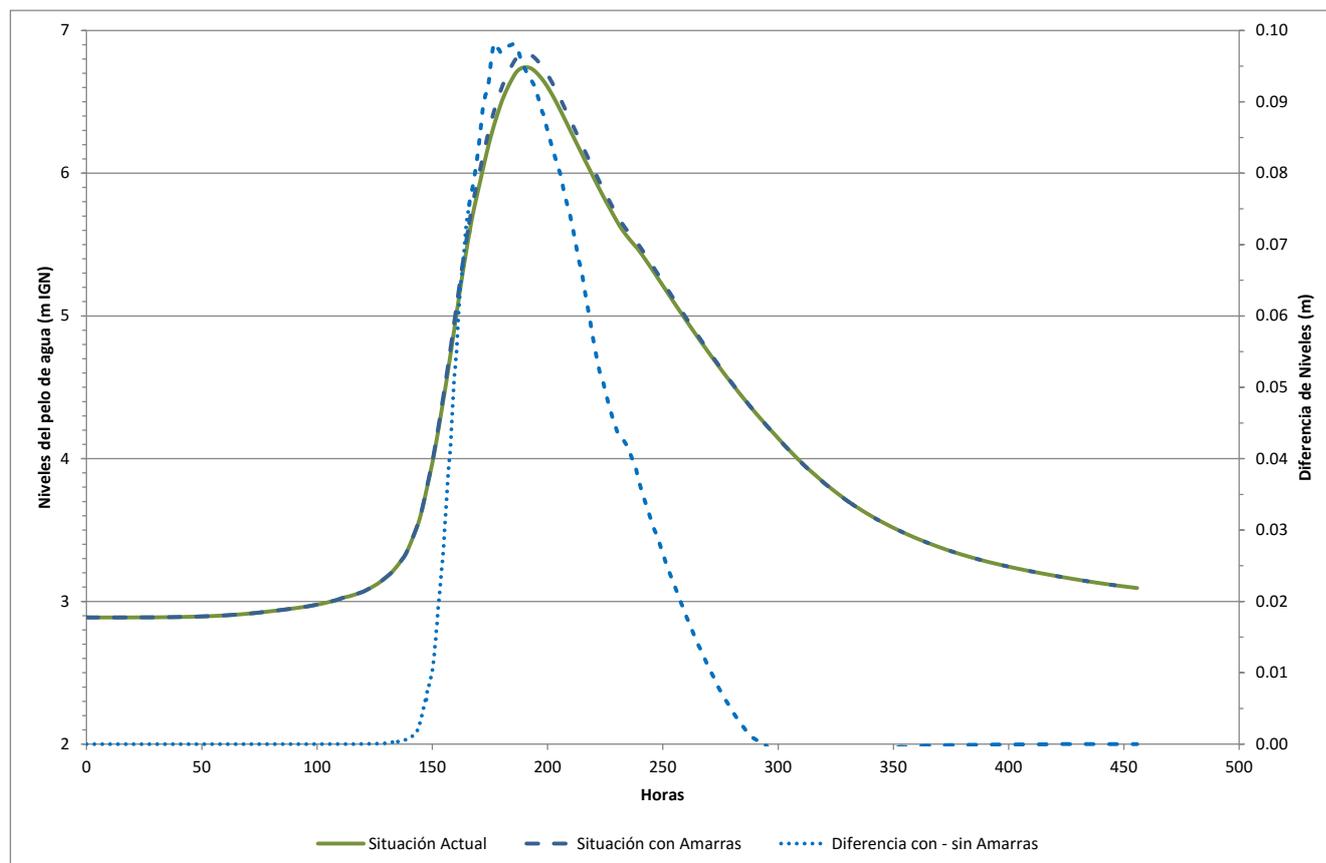


Figura 3-19: Influencia de Amarras en el nivel del río inmediatamente aguas arriba de Amarras para recurrencia 500 años (Caudal Impermanente)

La primer cuestión que se puede apreciar, es que los niveles del río en la zona de Amarras para la condición Actual del río (es decir, sin el emprendimiento), son aproximadamente 25 cm más bajos en el caso impermanente, que en el permanente en la escala de Puerto Gualeguaychú, y 50 cm más bajos a la altura de Amarras. Este hecho se puede deber al diferente manejo de las ecuaciones de cantidad de movimiento que el programa realiza en cada caso, y podría corregirse rehaciendo la calibración del modelo, pero utilizando hidrogramas en vez de emplear caudales constantes, con lo cual probablemente los coeficientes de rugosidad de Manning resultarían algo superiores, para alcanzar los mismos niveles de agua en el punto de control de la escala de Puerto Gualeguaychú.

No obstante ello, se considera válido el resultado obtenido en cuanto a la sobreelevación máxima de niveles causada por Amarras, la cual ya no presenta una depresión en la zona frente al predio, y alcanza un valor máximo de unos 10 cm, es decir, unos 3 cm más que lo obtenido con la simulación en condiciones de caudal permanente, para la misma recurrencia de 500 años. Cabe mencionar que la máxima diferencia se obtiene en un momento previo al pico de nivel, mientras que en el pico desciende unos 5 mm. Esto se debe a que con menor nivel, la velocidad es mayor, y por lo tanto el efecto de Amarras en el nivel se “siente” más.

La diferencia de unos 3 cm, puede atribuirse al efecto de la reducción del almacenamiento en la planicie, causada por la construcción de Amarras, el cual es modelado en forma conservativa por el HEC-RAS, como si fuera un polder cerrado, tal como se comentó previamente.

No es el objeto del presente estudio establecer niveles de crecida absolutos en la condición actual, sino identificar la influencia del emprendimiento Amarras en los mismos.

No obstante, dado que la calibración inicial se ha realizado por contraste con los niveles estadísticos en la escala de Puerto Gualeguaychú, se considera conveniente compensar la diferencia en los resultados del modelo en régimen permanente e impermanente, incrementando los coeficientes de rugosidad de Manning hasta alcanzar un nivel similar en Puerto Gualeguaychú, para la crecida de 500 años de recurrencia.

Se ajustaron entonces estos coeficientes adoptando $n=0.025$ para el cauce y $n=0,10$ para la planicie. El nivel resultante en Puerto Gualeguaychú fue de 6,11 m.

Los resultados obtenidos se muestran en el siguiente gráfico, y se puede apreciar que el nivel del río se ha incrementado tanto para la situación actual como para la futura con Amarras, mientras que la sobreelevación se ha reducido muy ligeramente, resultando cercana a los 9 cm.

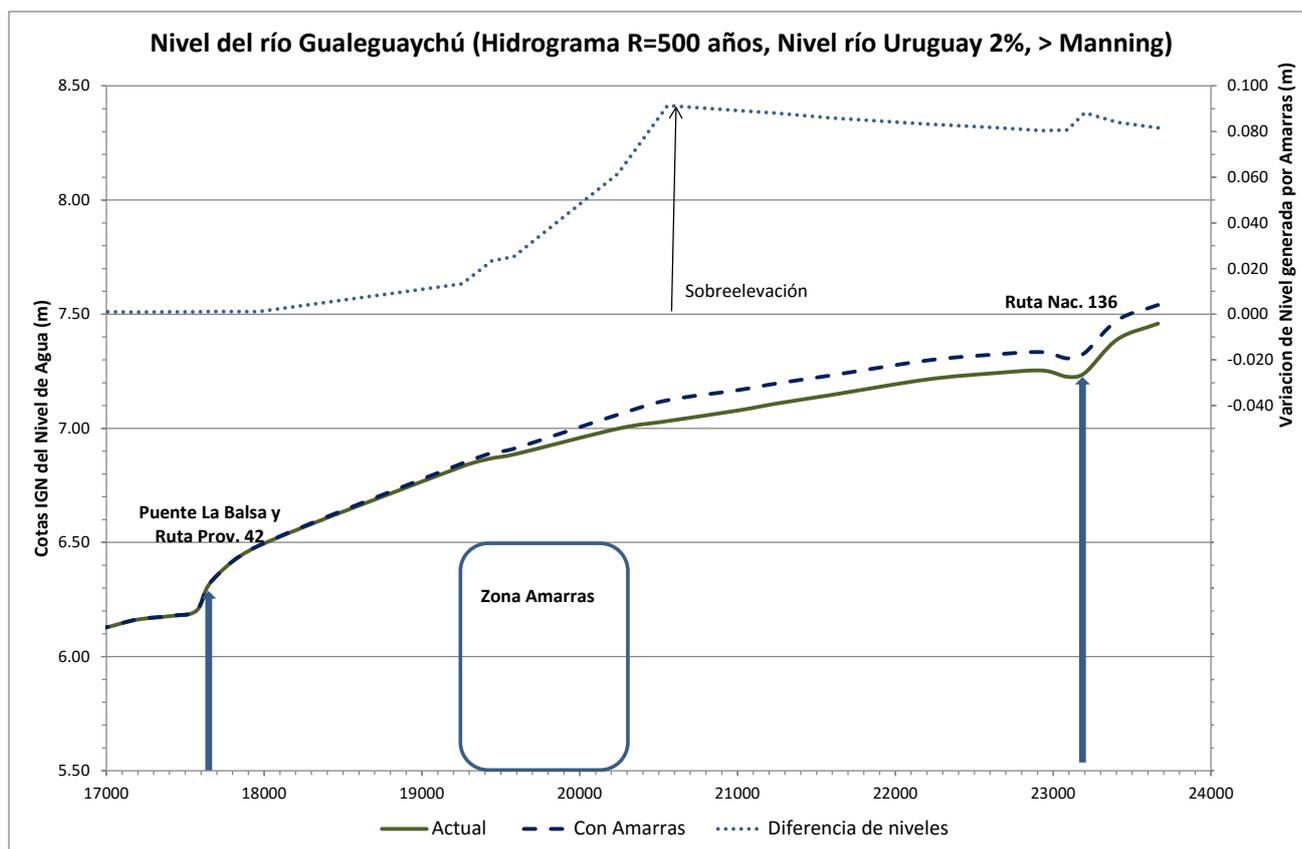


Figura 3-20: Influencia de Amarras en el perfil de nivel del río para recurrencia 500 años (Caudal Impermanente) incrementando los coeficientes de rugosidad de Manning para obtener un nivel en Puerto Gualeguaychú igual al resultante en régimen permanente (Caudal constante)

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las recurrencias de caudal de 5, 20 y 100 años, considerando la rugosidad ajustada.

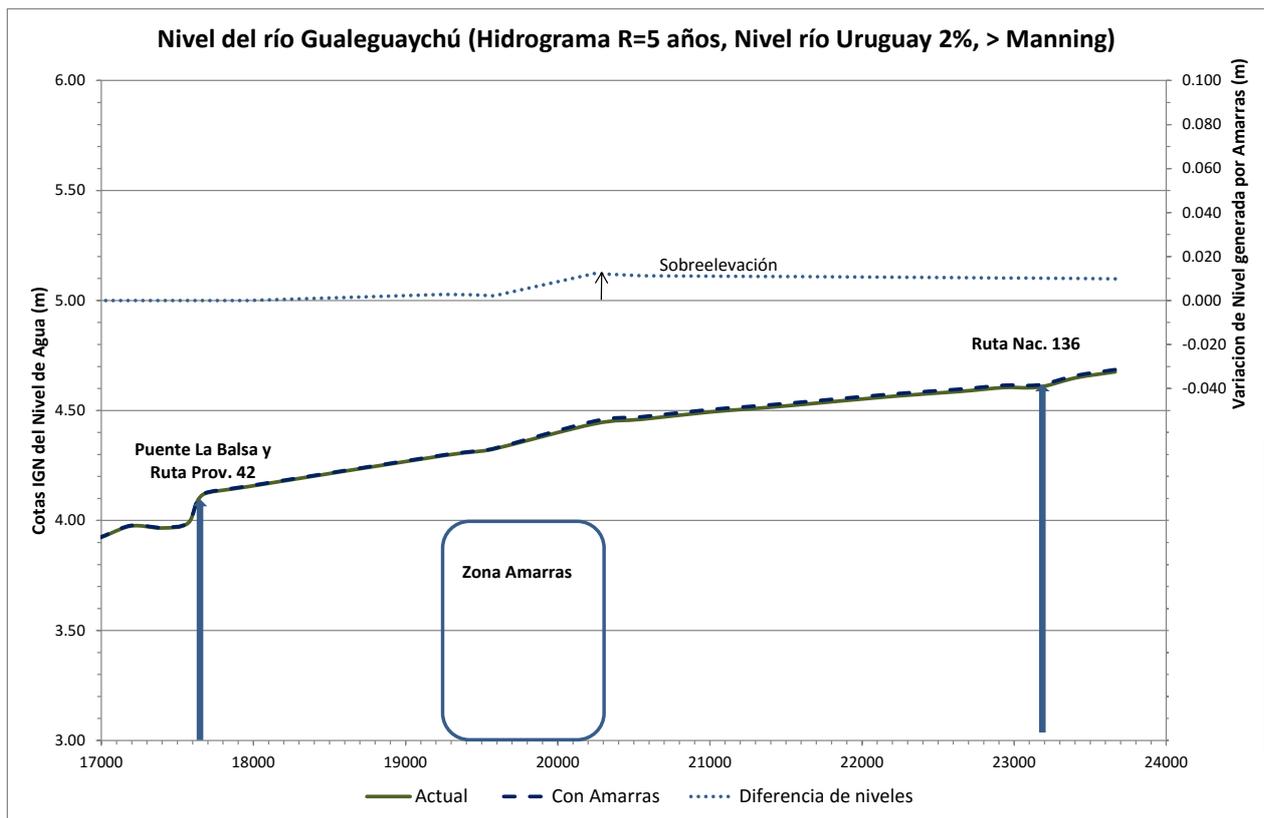


Figura 3-21: Influencia de Amarras en el perfil de nivel del río para recurrencia 5 años (Caudal Impermanente) incrementando los coeficientes de rugosidad de Manning

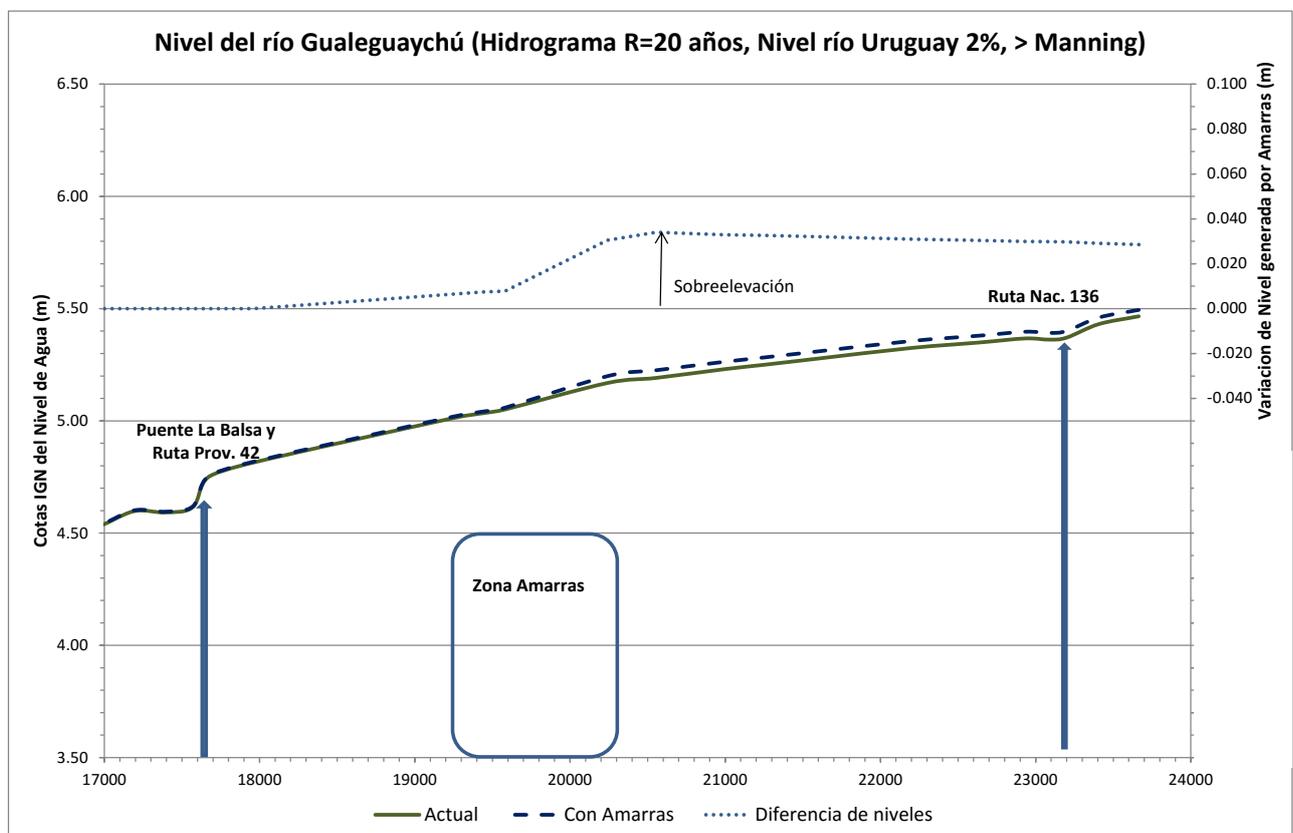


Figura 3-22: Influencia de Amarras en el perfil de nivel del río para recurrencia 20 años (Caudal Impermanente) incrementando los coeficientes de rugosidad de Manning

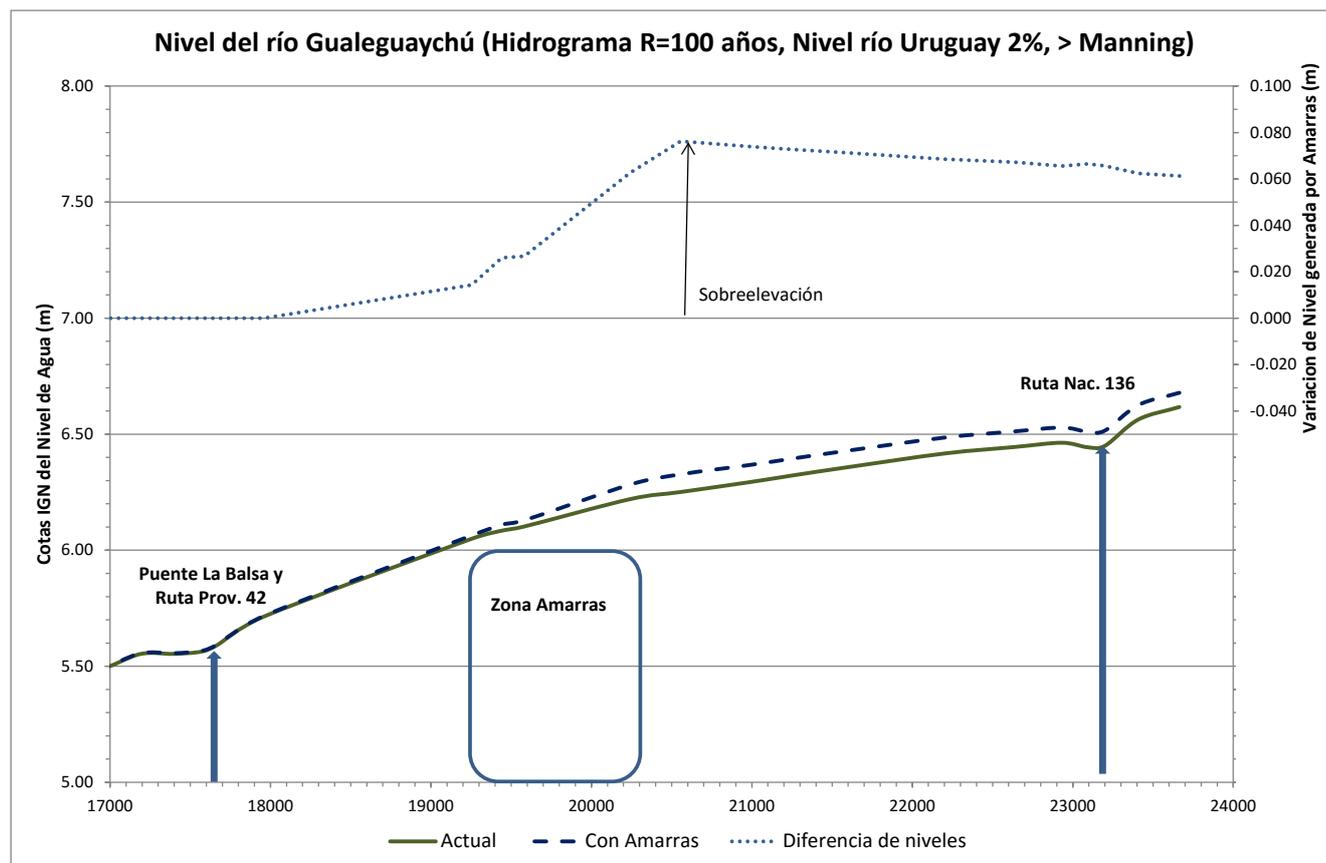


Figura 3-23: Influencia de Amarras en el perfil de nivel del río para recurrencia 100 años (Caudal Impermanente) incrementando los coeficientes de rugosidad de Manning

Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

Recurrencia de Caudal (años)	Escenario de Precipitación	Nivel en Boca Gual. (m IGN)	Condición	Nivel en Puerto Gual. (m IGN)	Nivel "Actual" en zona Amarras (m IGN)	Sobreelevación máxima Aguas Arriba Amarras (cm)
5	Promedio	2%	Base	3,9	4,5	1
20	Promedio	2%	Base	4,6	5,2	3
100	Promedio	2%	Base	5,5	6,3	6
500	Promedio	2%	Base	6,1	7,0	9

Tabla 3-4: Resultados Base de sobrelevación con y sin Amarras para diferentes recurrencias

Cabe mencionar que los niveles pico del hidrograma resultantes en Puerto Gualeguaychú son prácticamente iguales a los obtenidos por BISA utilizando el caudal estacionario (Tabla 3-1).

Por otro lado, comparando con los resultados de sobrelevación calculada por BISA presentados en la Tabla 3-3, se puede apreciar que la misma se ha elevado en 1 cm para las recurrencias de 5 a 100 años, y de 2 cm para 500 años, por efecto de la modelación de la impermanencia de la onda de crecida.

3.5.3 Análisis de Sensibilidad A (“Tormenta perfecta” maximizada Escenario 3)

En el análisis de Sensibilidad A (Escenario de caudal 3), se obtienen niveles del río Gualeguaychú para la situación actual, superiores entre aproximadamente 0,30 y 0,45 metros a los obtenidos para el caso Base con el hidrograma promedio entre los Escenarios 2 y 3 de caudal (criterio adoptado previamente por INCO CIV y BISA).

El nivel en Puerto Gualeguaychú se incrementa desde 6,1 m a 6,45 m IGN. Este valor está por debajo del estimado estadísticamente por BISA considerando la serie larga de niveles máximos anuales (menos el de 1978), que es igual a 7,16 m IGN.

En relación con el impacto de Amarras, se verifica que el orden de magnitud del mismo es prácticamente idéntico al hallado para el caso Base, superando ligeramente los 9 cm.

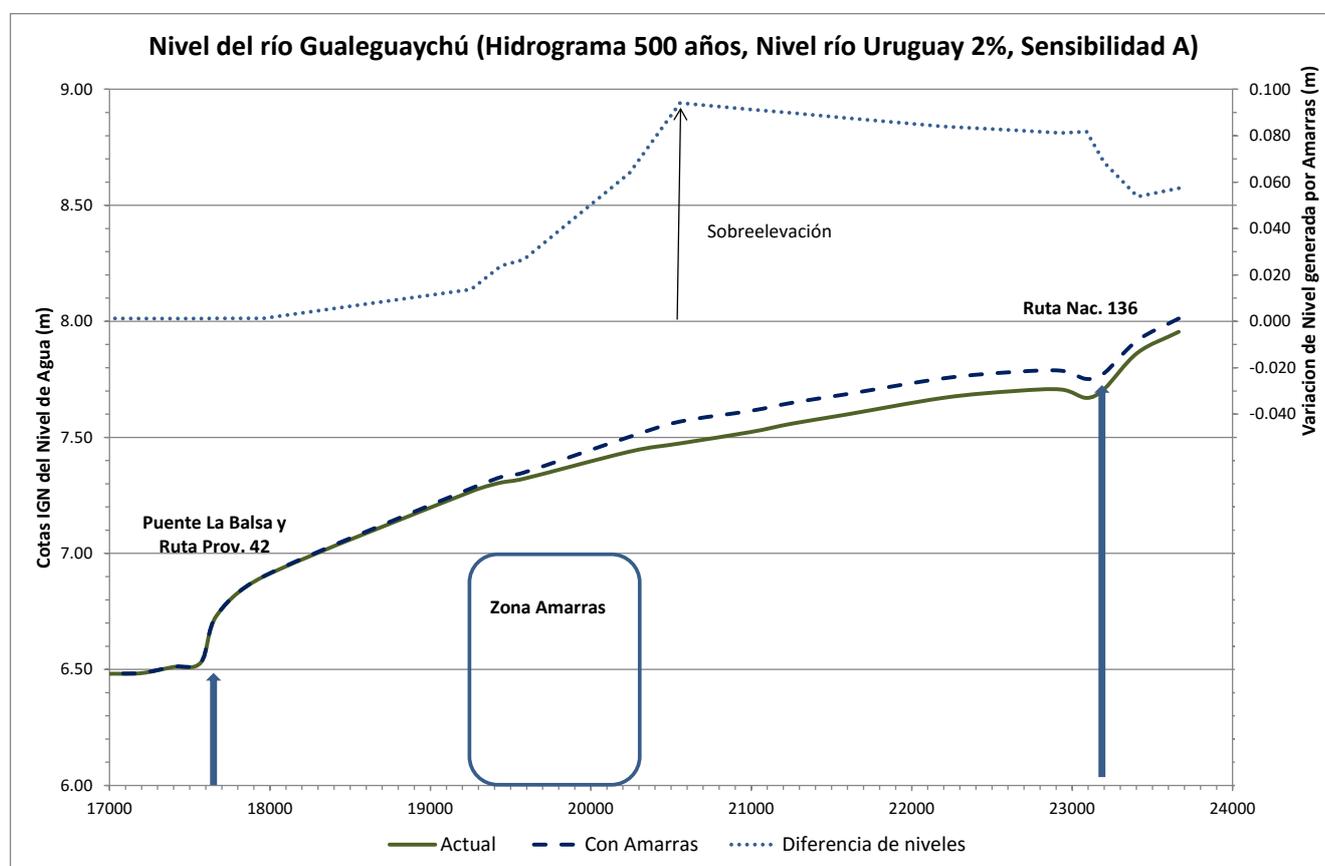


Figura 3-24: Influencia de Amarras en el perfil de nivel del río para recurrencia 500 años (Caudal Impermanente) en el Análisis de Sensibilidad A (“Tormenta perfecta”)

3.5.4 Análisis de Sensibilidad B (“Tormenta perfecta” más Cambio Climático)

En el análisis de Sensibilidad B (Escenario de caudal 3 más posible efecto conservativo del Cambio Climático hasta fin del siglo XXI), se obtienen niveles del río Gualeguaychú para la situación actual, superiores entre aproximadamente 0,8 y 1,0 metros a los obtenidos para el caso Base con el hidrograma promedio entre los Escenarios 2 y 3 de caudal (criterio adoptado previamente por INCOCIV y BISA).

El nivel en Puerto Gualeguaychú se incrementa desde 6,1 m a 6,9 m IGN. Este valor está aún por debajo del estimado estadísticamente por BISA considerando la serie larga de niveles máximos anuales (menos el de 1978), que es igual a 7,16 m IGN.

En relación con el impacto de Amarras, se verifica que el orden de magnitud del mismo es prácticamente idéntico al hallado para el caso Base, superando ligeramente los 9 cm.

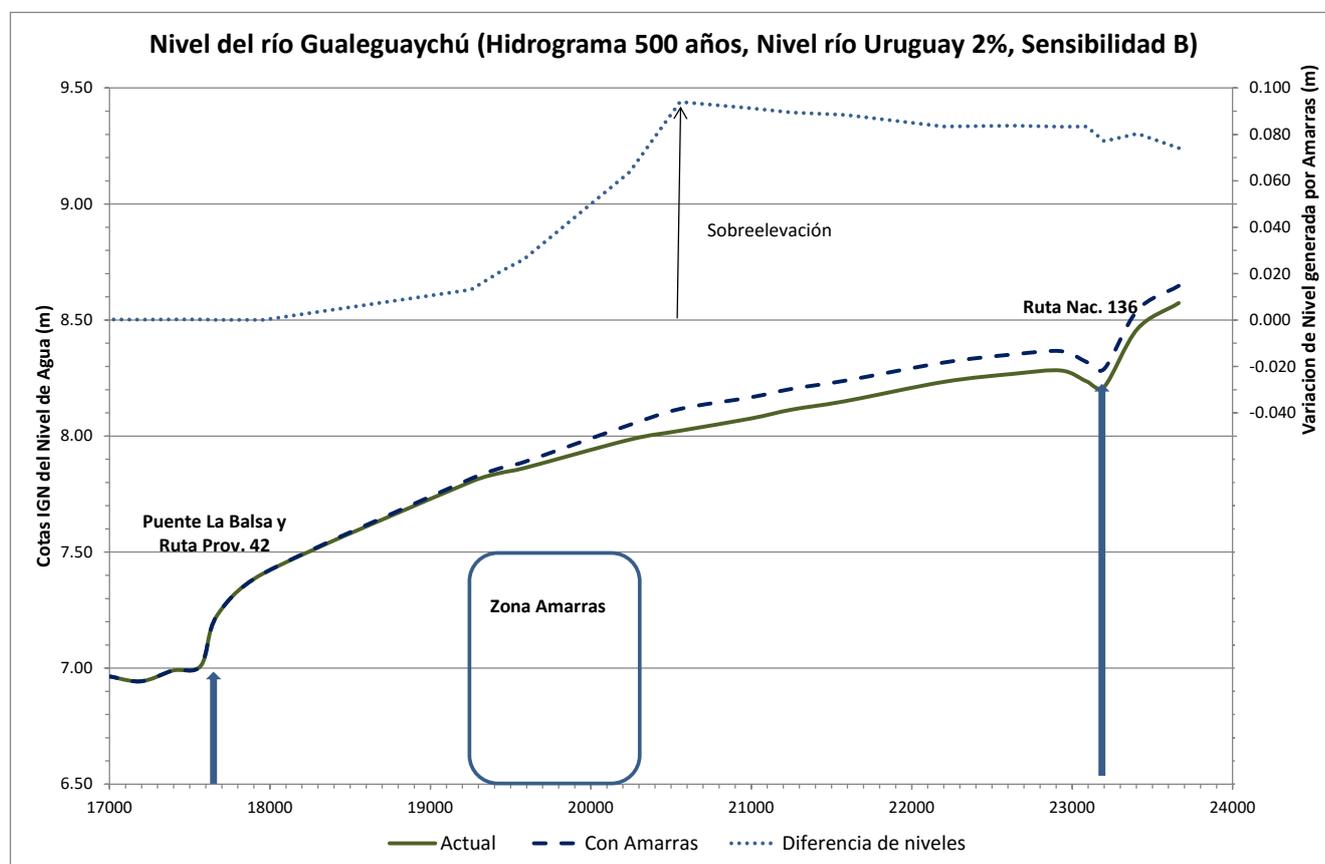


Figura 3-25: Influencia de Amarras en el perfil de nivel del río para recurrencia 500 años (Caudal Impermanente) en el Análisis de Sensibilidad B (“Tormenta perfecta” + Cambio Climático)

3.5.5 Análisis de Sensibilidad C (“Tormenta perfecta” más Cambio Climático con nivel aguas abajo correspondiente al año 1959 - Sudestada y crecida del río Uruguay)

En el análisis de Sensibilidad C (Escenario de caudal 3 más posible efecto conservativo del Cambio Climático hasta fin del siglo XXI, sumado a una sudestada y crecida del río Uruguay), se obtienen niveles del río Gualeguaychú para la situación actual, superiores en aproximadamente 1,2 metros a los obtenidos para el caso Base con el hidrograma promedio entre los Escenarios 2 y 3 de caudal (criterio adoptado previamente por INCOCIV y BISA).

El nivel en Puerto Gualeguaychú se incrementa desde 6,1 m a 7,3 m IGN. Este valor es ligeramente superior al estimado estadísticamente por BISA considerando la serie larga de niveles máximos anuales (menos el de 1978), que es igual a 7,16 m GN.

En relación con el impacto de Amarras, se verifica que el orden de magnitud del mismo es inferior al hallado para el caso Base, alcanzando los 8 cm. Esto ocurre porque cuanto mayor es el nivel de agua (debido en este caso al remanso provocado por el río Uruguay), menores son las velocidades y la obstrucción del flujo por parte del emprendimiento afecta menos intensamente.

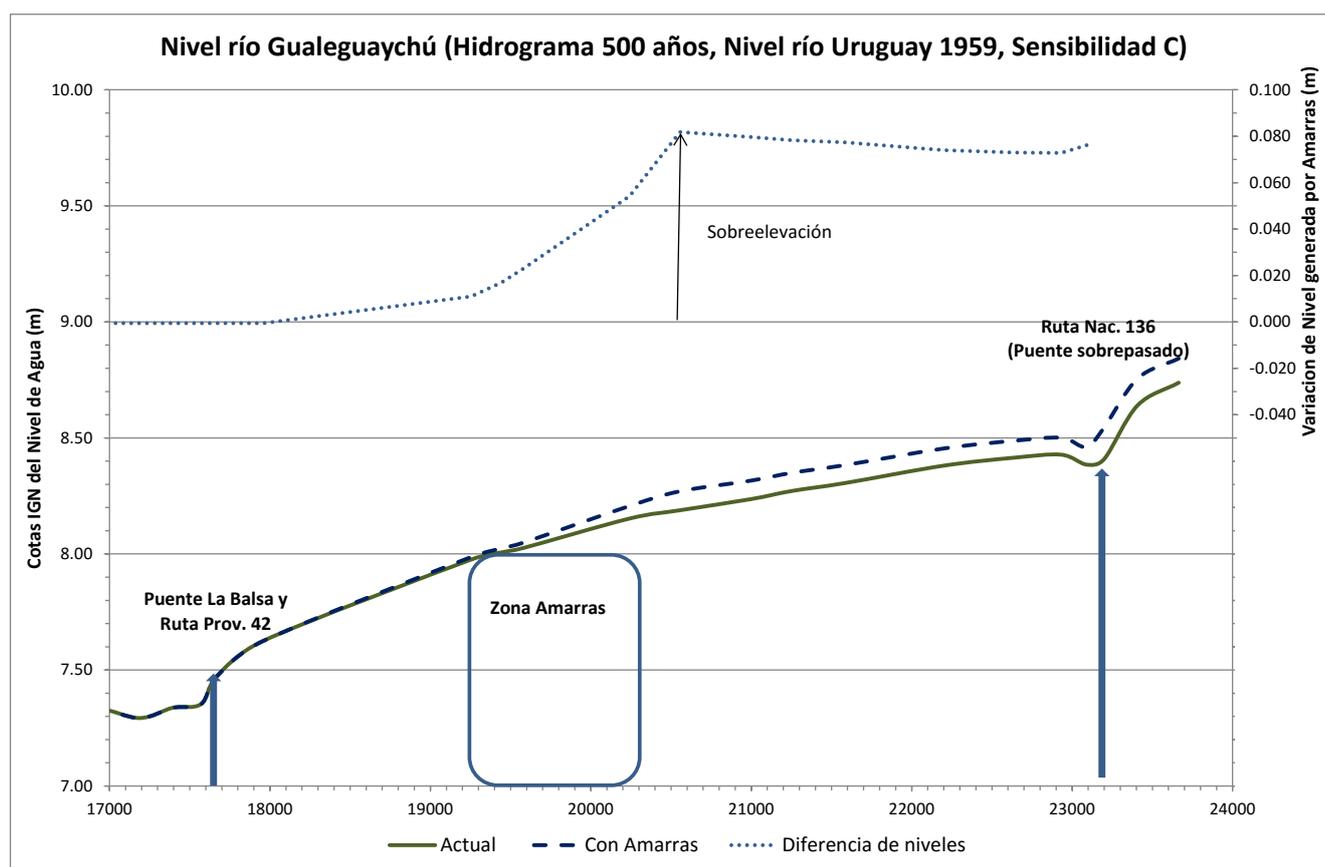


Figura 3-26: Influencia de Amarras en el perfil de nivel del río para recurrencia 500 años (Caudal Impermanente) en el Análisis de Sensibilidad C (“Tormenta perfecta” + Cambio Climático + Sudestada y Crecida del río Uruguay como la ocurrida en el año 1969)

3.5.6 Análisis de Sensibilidad D (Condición similar a la ocurrida en el año 1959 – Crecida del río Gualeguaychú de 100 años de recurrencia, Sudestada y crecida del río Uruguay)

En el análisis de Sensibilidad D (Escenario de caudal promedio entre los Escenarios 2 y 3 de caudal (criterio adoptado previamente por INCO CIV y BISA) con 100 años de recurrencia sumado a una sudestada y crecida del río Uruguay), se obtienen niveles en Puerto Gualeguaychú similares a los registrados durante la crecida de 1959. Esto es un indicador de que el evento acaecido dicho año fue realmente excepcional por la conjunción de factores de diferente origen, y que es una situación de interés para el presente estudio.

El nivel en Puerto Gualeguaychú es cercano a 6,4 m IGN. Este valor es muy similar al ocurrido durante la crecida de 1959, que fue 6,5 m IGN. En relación con el impacto de Amarras, se verifica que el orden de magnitud del mismo es similar al hallado para el caso Base con nivel en la desembocadura superado 2% del tiempo, alcanzando unos 6 cm.

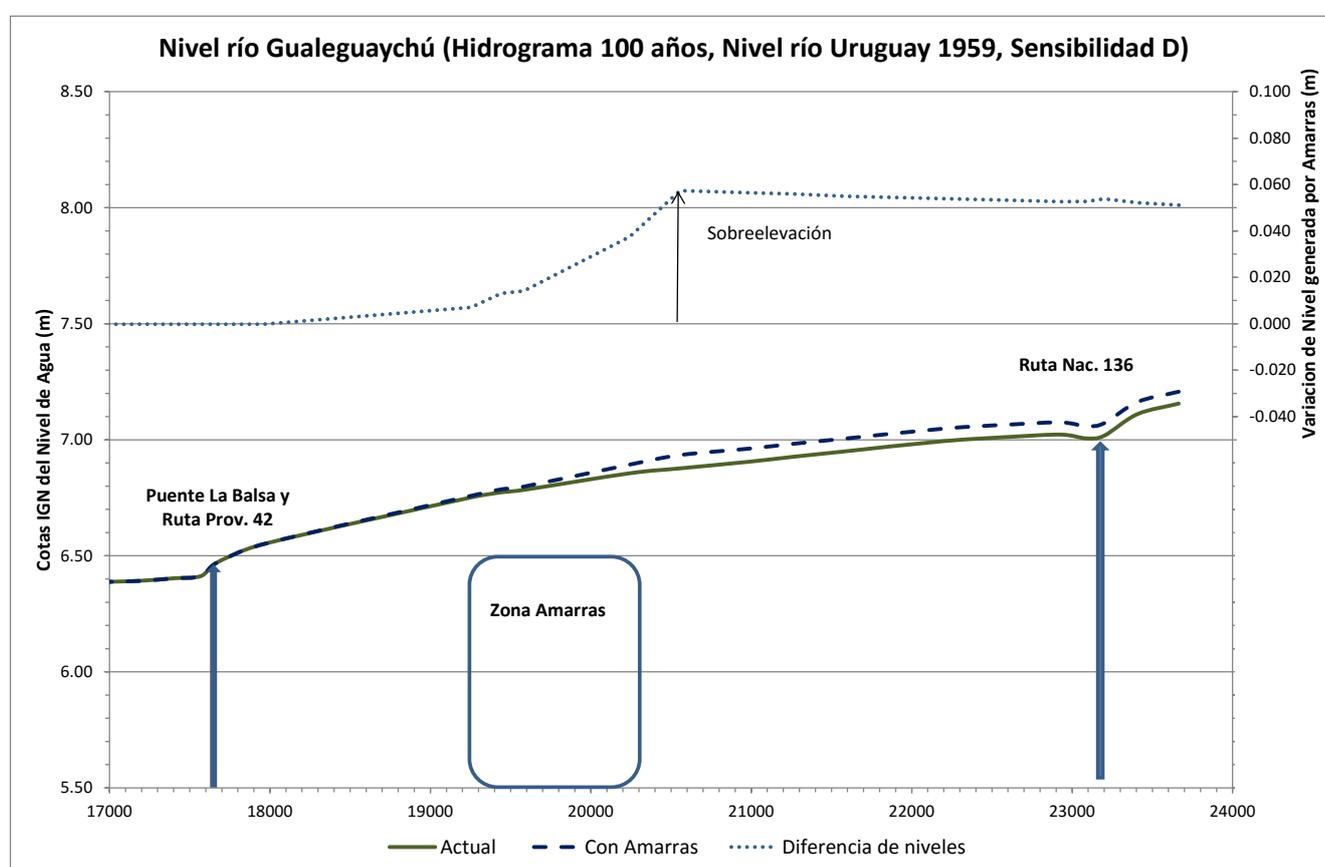


Figura 3-27: Influencia de Amarras en el perfil de nivel del río para una combinación de recurrencia 100 años de Caudal Impermanente para el Análisis de Sensibilidad D (Precipitación Promedio entre Escenarios 2 y 3, Sudestada y Crecida del río Uruguay como la ocurrida en el año 1969)

Los resultados de los análisis de sensibilidad, integrados con los resultados de los casos Base, se resumen en la siguiente tabla. Se puede apreciar que el impacto máximo de Amarras no se incrementa al crecer la magnitud natural de la inundación, incluso ante condiciones que podrían calificarse como de catástrofe, extremadamente improbables.

Recurrencia de Caudal (años)	Escenario de Precipitación	Nivel en Escala Boca Gual. (m IGN)	Condición	Nivel en Puerto Gual. (m IGN)	Nivel "Actual" en zona Amarras (m IGN)	Sobre-elevación máxima Aguas Arriba Amarras (cm)	Observaciones
5	Promedio	superado 2%	Base	3,9	4,5	1	Condición probable especificada por DHER
20	Promedio	superado 2%	Base	4,6	5,2	3	Condición probable especificada por DHER
100	Promedio	superado 2%	Base	5,5	6,3	6	Condición probable especificada por DHER
500	Promedio	superado 2%	Base	6,1	7,0	9	Condición probable especificada por DHER
500	Esc. 3	superado 2%	Sensibilidad A	6,4	7,4	9	"Tormenta Perfecta", Condición poco probable
500	Esc. 3 + CC	superado 2%	Sensibilidad B	6,9	8,0	9	"Tormenta Perfecta" y Cambio Climático extremo fines Siglo XXI, Condición muy conservativa
500	Esc. 3 + CC	año 1959	Sensibilidad C	7,3	8,2	8	"Tormenta Perfecta", CC extremo, Sudestada y crecida Uruguay. Extremadamente conservativa
100	Promedio	año 1959	Sensibilidad D	6,4	6,9	6	Similar a la mayor crecida ocurrida en 1959 (exceptuando 1978 con causas antrópicas)

Tabla 3-5: Resultados de sobrelevación con y sin Amarras para diferentes recurrencias. Condiciones de Base y Análisis de Sensibilidad

4. MODELACIÓN HIDRÁULICA BIDIMENSIONAL

Dado que el modelo unidimensional aplicado simplifica los detalles espaciales del emprendimiento y su entorno, se desarrolla a continuación una modelización bidimensional que permite determinar con mayor detalle las zonas específicas donde se producen las variaciones mencionadas en los niveles del río en los alrededores de Amarras y en su zona de influencia correspondiente a Pueblo General Belgrano y la ciudad de Gualeguaychú.

La modelación bidimensional es motorizada especificando condiciones de borde de caudal aguas arriba (en la Ruta Nac. N° 136) y de nivel aguas abajo (aproximadamente en la zona de implantación futura del Nuevo Puente), las cuales han sido definidas en el presente estudio, sobre la base de las simulaciones efectuadas con el modelo unidimensional HEC-RAS, precedentemente presentadas

La modelación hidrodinámica bidimensional tiene por objetivo obtener una estimación detallada de los niveles máximos y del campo de velocidades medias del flujo, representativa tanto de la condición "Actual" sin obras, como de la condición con las obras del emprendimiento construidas, sirviendo la diferencia entre ambos escenarios, como base para estimar con mayor detalle el impacto de la obra en el entorno.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

La modelación hidrodinámica bidimensional se realizó con el programa RMA2 desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers, Wicksburg Experimental Station, para simular flujos naturales a superficie libre.

El programa original fue desarrollado por Norton, King y Orlob (1973) pertenecientes al cuerpo de Ingenieros del Distrito de Walla Walla y ha sido extensivamente aplicado para calcular niveles de agua y distribuciones de caudal en diversas situaciones: la periferia de islas; caudales en puentes, en rías y estuarios, aguas arriba y aguas abajo de canales de centrales hidroeléctricas, canales de plantas de bombeo, circulación y transporte en cuerpos de agua y zonas costeras, embalses, etc.

Otros desarrollos posteriores fueron llevados a cabo por King y Roig y, por la Universidad de California, Davis y se han realizado continuamente mejoras por King y Norton pertenecientes a la Asociación de Manejo de Recursos (Resource Managements Associates (RMA) y también el por laboratorio de hidráulica de la Estación Experimental de Vías Navegables (Waterways Experiment Station WES). RMA2 utiliza el método de elementos finitos para resolver un sistema de ecuaciones que describen las condiciones hidrodinámicas de un área determinada definida a través de una malla de elementos finitos, obteniéndose como resultado las velocidades medias del flujo y los niveles de agua.

Las ecuaciones integradas en profundidad de conservación de masa y cantidad de movimiento en dos direcciones horizontales, tienen la forma general que se presenta a continuación:

$$\begin{aligned}
 & h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\
 & + gh \left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{gun^2}{(1.486h^{1/6})^2} + (u^2 + v^2)^{1/2} \\
 & - \zeta V_a^2 \cos \psi - 2h\omega v \sin \phi = 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 & h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \\
 & + gh \left(\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{gvn^2}{(1.486h^{1/6})^2} + (u^2 + v^2)^{1/2} \\
 & - \zeta V_a^2 \sin \psi + 2h\omega v \sin \phi = 0
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0
 \tag{3}$$

Donde:

- h = Profundidad
- u,v = Velocidades en las direcciones cartesianas
- x,y,t = Coordenadas cartesianas y tiempo
- ρ = Densidad del fluido
- E = Coeficiente de viscosidad de remolino
 - para xx = dirección normal en la superficie del eje x
 - para yy = dirección normal en la superficie del eje y
 - para xy e yx = dirección de corte en cada superficie
- g = aceleración de la gravedad
- a = cota del fondo del lecho
- n = coeficiente de rugosidad de Manning
- 1,486 = coeficiente de conversión de unidades
- ξ = Coeficiente empírico de la tensión del viento
- Va = Velocidad del viento
- ψ = Dirección del viento
- ω = Velocidad de rotación angular de la tierra
- ϕ = Latitud local

Las ecuaciones (1), (2) y (3) se resuelven por el método de elementos finitos usando la técnica de residuos ponderados de Galerkin. Los elementos pueden ser unidimensionales o bidimensionales (cuadriláteros o triángulos), y pueden presentar lados curvos. Las funciones de forma utilizadas son cuadráticas para la velocidad y lineales para la profundidad.

La integración en el espacio se realiza por medio de integración Gaussiana y las derivadas temporales son reemplazadas por una aproximación por diferencias finitas no lineal. Se asume que las variables varían para cada intervalo de tiempo de la siguiente forma:

$$f(t) = f(0) + at + btc \quad t_0 \leq t \leq \Delta t$$

donde las variables a, b y c son constantes.

La solución es completamente implícita y el conjunto de ecuaciones simultáneas se resuelve por medio del esquema iterativo no lineal de Newton – Raphson.

Los datos de entrada al modelo son:

- Malla de elementos finitos, donde cada nodo queda definido por sus coordenadas planas (x, y) y cota (z),
- Condiciones Iniciales, valores con los que se inicia la simulación para cada uno de los nodos,
- Parámetros generales (por ejemplo las rugosidades), y
- Condiciones de Borde, impuestas en nodos particulares de la malla.

Como condiciones iniciales se especifica el nivel de agua y las velocidades medias en la vertical en las direcciones x e y, para cada nodo de la región a modelar. Cuanto más alejadas estén dichas condiciones de la solución final, más iteraciones será necesario efectuar hasta alcanzar la convergencia de la misma.

Las condiciones de borde, que dependen del tipo de contorno y de las condiciones del flujo, son especificadas en el contorno de la malla para el período de simulación. Físicamente, en flujos a superficie libre hay dos tipos de contornos, uno cerrado o de flujo nulo y otro abierto. Un borde cerrado puede estar constituido por una línea de costa, un terraplén, un espigón, etc. En él, la velocidad normal es igual a cero, por lo que no se produce flujo a través del mismo. Una condición de borde abierto define un área a lo largo de un contorno de la malla de elementos finitos en donde se produce entrada o salida de flujo. Los valores a especificar en un borde abierto dependen del tipo de contorno (entrada o salida) y del régimen del flujo (subcrítico o supercrítico).

Generalmente, para modelar un curso de agua y su valle de inundación, se especifica el flujo en las direcciones x e y en el contorno de entrada y la elevación de la superficie libre en el contorno de salida, debiendo éstos estar lo suficientemente alejados del área donde se pretende encontrar una solución, para reducir la probabilidad de que los resultados se vean afectados por cualquier imprecisión en la estimación de dichas condiciones.

Para la modelación matemática de la zona de estudio se establecieron las condiciones de borde de tipo caudal en el contorno de aguas arriba y de nivel de agua en el contorno de aguas abajo.

El modelo posee un mecanismo de “secado y mojado” de los elementos finitos que quedan desactivados o activados cuando el nivel de agua baja o sube. Este proceso es delicado y tiene limitaciones en cuanto a la variación del nivel admisible en cada paso de iteración del proceso, dependiendo también de la topografía del terreno. Por ejemplo, la presencia de zonas de pendiente plana o elementos que queden aislados puede generar inconvenientes en la solución, por lo que se debe controlar con cuidado estos aspectos.

Se presenta a continuación la descripción de las características básicas del modelo implementado y los resultados obtenidos.

4.2 IMPLEMENTACIÓN

El primer paso para la configuración del modelo bidimensional es la definición del dominio y malla de cálculo. Para ello se consideró la condición de mayor inundación a estudiar, Sensibilidad C, para determinar los márgenes laterales de la malla. Para la extensión del dominio se consideró la ruta provincial 186 al Norte, y el emplazamiento del futuro “Nuevo Puente sobre el Río Gualeguaychú” como borde inferior, extensión suficientemente grande como para eliminar los efectos de borde.

La malla de cálculo se elaboró con elementos en su mayoría cuadrados de 8 nodos y triangulares de 6, quedando definida por 106.715 nodos totales y 37.470 elementos. La longitud de los elementos (lados paralelos a la costa) es aproximadamente de 30 m de lado pero es menor en la zona de Amarras, 10 m. En sentido transversal la discretización también es variable. En la zona de emplazamiento de las obras, los elementos tienen un ancho de 10 m, al igual que para el cauce de río, mientras que en el resto alcanzan los 30 m.

La extensión total de la grilla es de aproximadamente 6,6 km de longitud por 4,7 km de ancho. Ver Figura 4-1.

Las cotas del modelo digital del terreno fueron generadas a partir de las isolíneas utilizadas para la modelación unidimensional y referidas al cero del IGN. Para la zona de Amarras se utilizó una topobatimetría definida a partir del Modelo Digital del Terreno con obras provisto por los responsables del emprendimiento, la cual fue incorporada en la topobatimetría original, para generar el modelo digital del terreno correspondiente a la condición futura. En base a esta información se elaboró un modelo de elevación del terreno en coordenadas planas Gauss-Krüger Faja 6 referido al sistema Datum WGS84. En la Figura 4-2 se presenta el modelo digital del terreno para la Situación Actual y en la Figura 4-3 se presenta el modelo para la situación con obras.

El modelo matemático sólo contempla la posibilidad de simular la presencia de conductos trabajando a superficie libre, y no a presión una vez que su dintel sea sobrepasado. De todas maneras, los conductos de intercambio de agua entre la planicie y el lago existentes en el predio de Amarras tienen una capacidad de conducción muy inferior al caudal que circula a través de la planicie, por lo cual con un criterio conservativo se decidió no incorporarlos en la simulación. No obstante se incluyó el pasaje de agua hacia el río Gualeguaychú correspondiente al drenaje de Pueblo General Belgrano ubicado inmediatamente al Norte del acceso, dado que en una simulación realizada sin esa conexión se verificó retención de agua y sobre elevación para la crecida de 20 años de recurrencia.



Figura 4-1: Vista general y en detalle de la Malla de elementos finitos del modelo Hidrodinámico bidimensional.

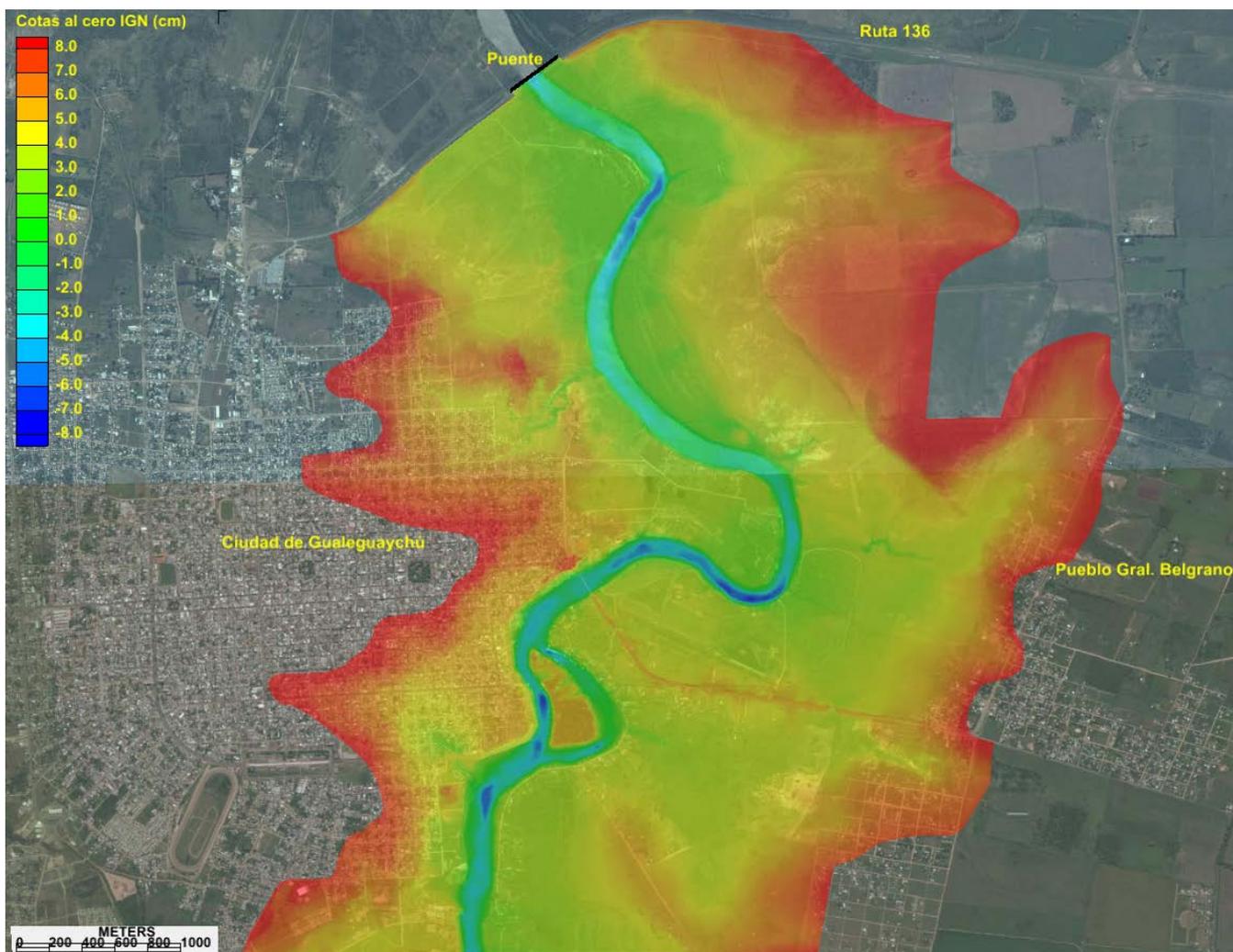


Figura 4-2: Modelo digital del terreno. Situación Actual

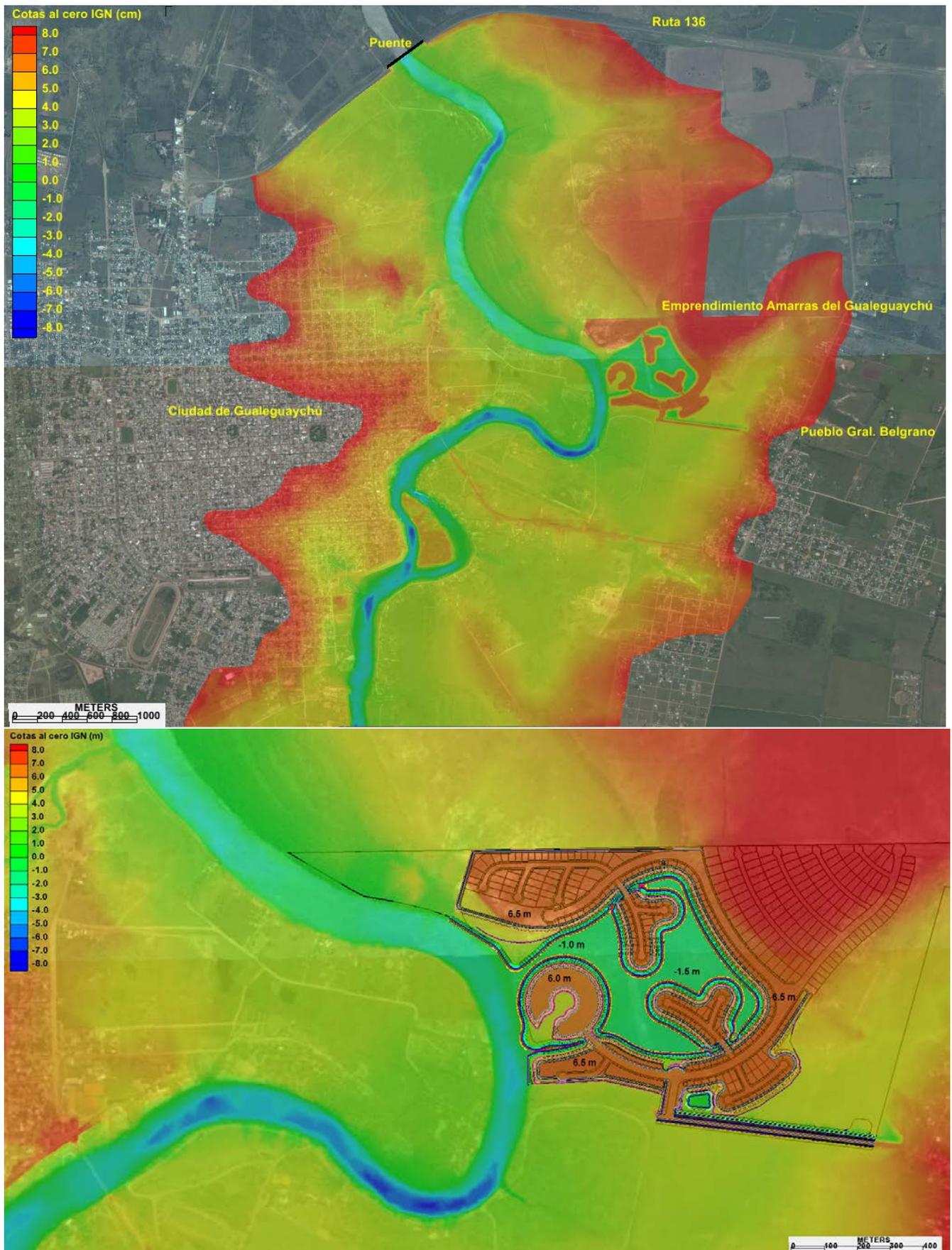


Figura 4-3: Modelo digital del terreno. Situación futura con Amarras del Gualeguaychú

Para la modelación bidimensional se utilizaron como coeficientes de rugosidad de Manning 0,024 para el cauce del río, 0,08 para la planicie de inundación y 0,8 para las zonas urbanas.

El alto coeficiente de rugosidad asignado a las zonas urbanas tiene por objeto reducir fuertemente las velocidades del flujo, de tal manera de simular la obstrucción que las edificaciones generan al mismo, dado que la escala de representación del modelo no permite diferenciar las calles de los edificios. De esta forma, la velocidad cae a un orden de magnitud de 1 a 2 cm/s, que puede representar en forma global el flujo que realmente puede existir a través de calles orientadas en el sentido del escurrimiento fluvial.

Para la condición con Amarras, considerando que la discretización de la malla es mucho más fina en la zona del emprendimiento (lo cual es necesario para representar detalladamente la interferencia que produce en el flujo), se diferenciaron los sectores destinados a edificaciones (donde se asignó el coeficiente de Manning 0,8), de las calles a las cuales se les asignó un coeficiente mucho menor (0,05).

Con éstos valores el modelo hidrodinámico generó alturas máximas similares a las que surgen de la estadística de niveles en el Puerto de Gualeguaychú (Tabla 2-3), encontrándose dentro del rango estadístico para cada recurrencia, excepto para la condición de 20 años de recurrencia, cuyo nivel resultó algo sobreestimado, según se describe en el párrafo siguiente.

4.3 ESCENARIOS DE EXPLOTACIÓN Y SÍNTESIS DE RESULTADOS

La explotación del modelo busca caracterizar condiciones hidrodinámicas representativas de los diversos escenarios, obteniendo la distribución espacial de la velocidad y los niveles de agua correspondientes. Teniendo en cuenta los escenarios que son de interés para la modelación bidimensional, las condiciones simuladas contemplaron los siguientes casos:

- Condición de Base recurrencia de 20 años
- Condición de Base recurrencia de 100 años
- Condición de Base recurrencia de 500 años
- Sensibilidad A
- Sensibilidad C

Para la condición de Base con recurrencia de 5 años, se considera suficiente el análisis unidimensional a través del cual se estimó una sobreelevación con un orden de magnitud de solamente 1 centímetro, debido a que la zona alteada de Amarras se ve escasamente involucrada en la zona inundable, produciendo en consecuencia una muy limitada obstrucción al flujo del agua.

La modelación matemática unidimensional realizada previamente, se empleó para definir las condiciones de contorno apropiadas para el modelo hidrodinámico bidimensional, las cuales se presentan en la siguiente tabla.

Condición	Recurrencia de Caudal	Escenario de Precipitación	Caudal	Nivel en Escala Boca Gualeguaychú	Nivel Borde Modelo 2D
	(años)			(m IGN)	(m IGN)
Base	20	Promedio	2051	superado 2%	4,20
Base	100	Promedio	3285	superado 2%	5,05
Base	500	Promedio	4342	superado 2%	5,60
Sensibilidad A	500	Esc. 3	5100	superado 2%	5,90
Sensibilidad C	500	Esc. 3 + CC	6120	año 1959	6,80

Tabla 4-1: Condiciones de Borde del Modelo Hidrodinámico

Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla.

Condición	Recurrencia de Caudal	Nivel en Pto. Gualeguaychú		Sobreelevación Máxima en Gualeguaychú	Nivel representativo en Amarras		Sobreelev. típica en Amarras
		Modelado	Rango Estadístico		Actual	Con Amarras	
	(años)	(m IGN)	(m IGN)	(cm)	(m IGN)	(m IGN)	(cm)
Base	20	5,16	4,28 / 4,65	4	5,96	5,99	3
Base	100	5,86	4,92 / 5,95	5	6,60	6,72	12
Base	500	6,44	5,43 / 7,16	6	7,14	7,27	13
Sensibilidad A	500	6,75	5,43 / 7,16	7	7,48	7,62	14
Sensibilidad C	500	7,45	5,43 / 7,16	7	8,07	8,20	13

Tabla 4-2: Resultados de sobreelevación con y sin Amarras para diferentes recurrencias obtenidos mediante la modelación bidimensional. Condiciones de Base y Análisis de Sensibilidad

Cabe recordar que el objetivo del presente estudio no es determinar con precisión la cota de inundación correspondiente a una recurrencia dada, lo cual estrictamente no es factible puesto que los niveles del río en Gualeguaychú dependen de múltiples variables, entre las cuales se encuentran la distribución espacial de la precipitación en la cuenca y la evolución temporal del núcleo de la tormenta, así como las condiciones del río Uruguay en la desembocadura, las cuales a su vez dependen de las crecidas de este río (que son en principio prácticamente independientes de las del río Gualeguaychú) y de la aleatoria concurrencia de sobreelevaciones por sudestadas. Asimismo, la rugosidad de la vegetación es diferente en invierno y en verano y estrictamente es distinta también en función de la relación entre la altura de los pastos y arbustos y el nivel de agua⁹.

En consecuencia, siendo el objetivo buscado determinar las condiciones de sobreelevación generadas por el emprendimiento, resulta adecuado utilizar hipótesis desfavorables, para las cuales la estimación del impacto sea más conservativa (es decir, que probablemente el impacto real pueda ser algo menor que el estimado con el modelo).

En tal sentido, se decidió mantener los coeficientes de rugosidad adoptados, siendo que los niveles de agua para cada recurrencia se encuentran probablemente sobreestimados en algunos decímetros, pero se realizó un análisis de sensibilidad a estos coeficientes para verificar la influencia que este criterio tiene en los resultados de sobreelevación calculados.

Para dicho análisis de sensibilidad se tuvo en cuenta una reducción del coeficiente de rugosidad de la planicie (de 0,08 a 0,06), lo cual implica una disminución de la pendiente global del flujo, y un incremento de la rugosidad del cauce (de 0,024 a 0,027), el cual tiende a compensar en parte la disminución de pendiente. Ambos cambios en conjunto, generan también una transferencia de flujo desde el cauce hacia la planicie, lo cual es conservativo dado que maximiza la obstrucción que el emprendimiento provoca en el flujo.

El coeficiente de rugosidad de la planicie se estableció teniendo en cuenta las indicaciones de French (1985), el cual a partir de los valores sugeridos por Chow (1959) presenta rangos del coeficiente para planicies de inundación, válidos para pastos, vegetación arbustiva y árboles, diferenciados según su densidad (“baja (light) o mediana/alta (medium to dense)”), y la estación del año (verano o invierno). Los valores “normales” sugeridos para vegetación de densidad mediana/alta oscilan entre 0,07 en invierno y 0,10 en verano. En el caso de vegetación de baja densidad, los valores normales varían entre 0,05 y 0,06 según la estación. Se consideró como límite inferior del análisis de sensibilidad el valor del coeficiente de Manning 0,06, el cual es inferior al valor 0,07 adoptado para vegetación arbustiva no hidrófila en la modelización hidráulica bidimensional que se realizó también con el modelo RMA2 para la Conexión Vial Rosario – Victoria (Cardini, 2000)¹⁰.

En la siguiente tabla se presenta una comparación la sobreelevación obtenida para 500 años de recurrencia correspondientes a las Condiciones “Base2, “Sensibilidad A (Tormenta perfecta)” y “Sensibilidad A con modificación de los coeficientes de Rugosidad”. Aunque la precisión de estos cálculos se encuentra en el orden del centímetro, se han indicado los valores de sobreelevación máxima al milímetro para destacar las variaciones.

⁹ French, R.H., Open-channel Hydraulics, McGraw-Hill Inc., 1985

¹⁰ Cardini J. C., Proyecto Hidráulico de la Conexión Física Rosario – Victoria sobre el río Paraná. Curso Precongreso Latinoamericano de Hidráulica. Octubre de 2000.

Condición	Nivel en Pto. Gualeguaychú		Sobreelevación Máxima en Gualeguaychú	Nivel representativo en Amarras		Sobreelev. típica en Amarras
	Modelado	Rango Estadístico		Actual	Con Amarras	
	(m IGN)	(m IGN)	(cm)	(m IGN)	(m IGN)	(cm)
Base	6,44	5.43 / 7.16	6,1	7,14	7,27	13
Sensibilidad A	6,75	5.43 / 7.16	6,8	7,48	7,62	14
Sens. A y Variación Rugosidad	6,58	5.43 / 7.16	6,5	7,17	7,28	11

Tabla 4-3: Resultados de sobreelevación con y sin Amarras para una recurrencia de 500 años obtenidos mediante la modelación bidimensional. Condición de Base y Análisis de Sensibilidad al caudal y a la rugosidad

Se puede apreciar que la variación de la rugosidad, genera una reducción del nivel de agua del orden de 17 cm en Puerto Gualeguaychú, y 31 cm en la zona de Amarras para el escenario Actual, mientras que la variación en la sobreelevación máxima en Galeguaychú, es del orden de 3 milímetros (de 6,8 a 6,5 cm). Los resultados obtenidos se presentan en planta en el parágrafo 4.9 (comparando la solución con los coeficientes de rugosidad originales y los modificados).

Los resultados obtenidos para las diferentes condiciones modelizadas se presentan gráficamente a continuación.

4.4 RESULTADOS PARA CRECIDA BASE DE 20 AÑOS DE RECURRENCIA

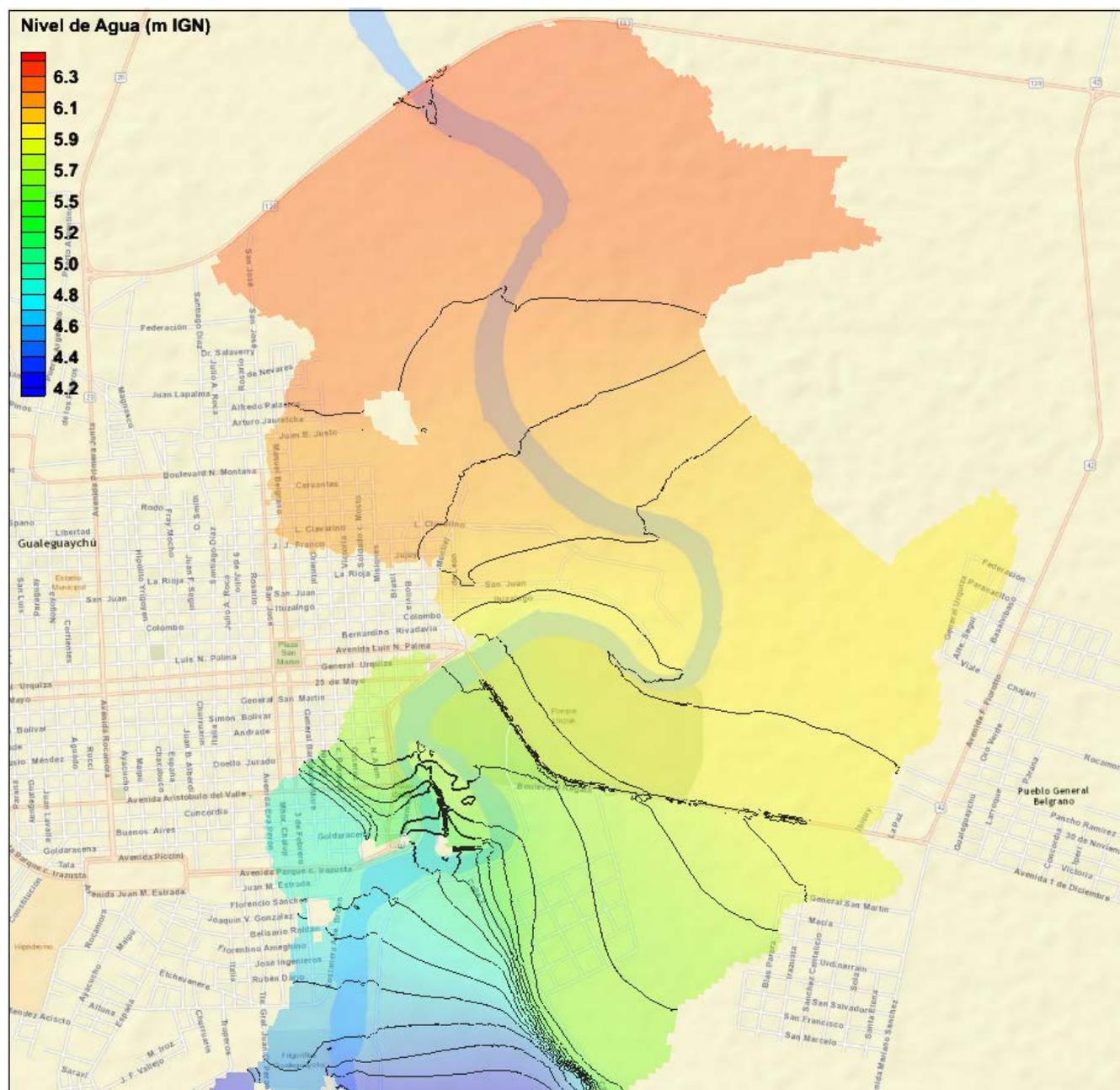


Figura 4-4: Nivel de Agua en la zona anegada para la condición Actual. Crecida de recurrencia 20 años

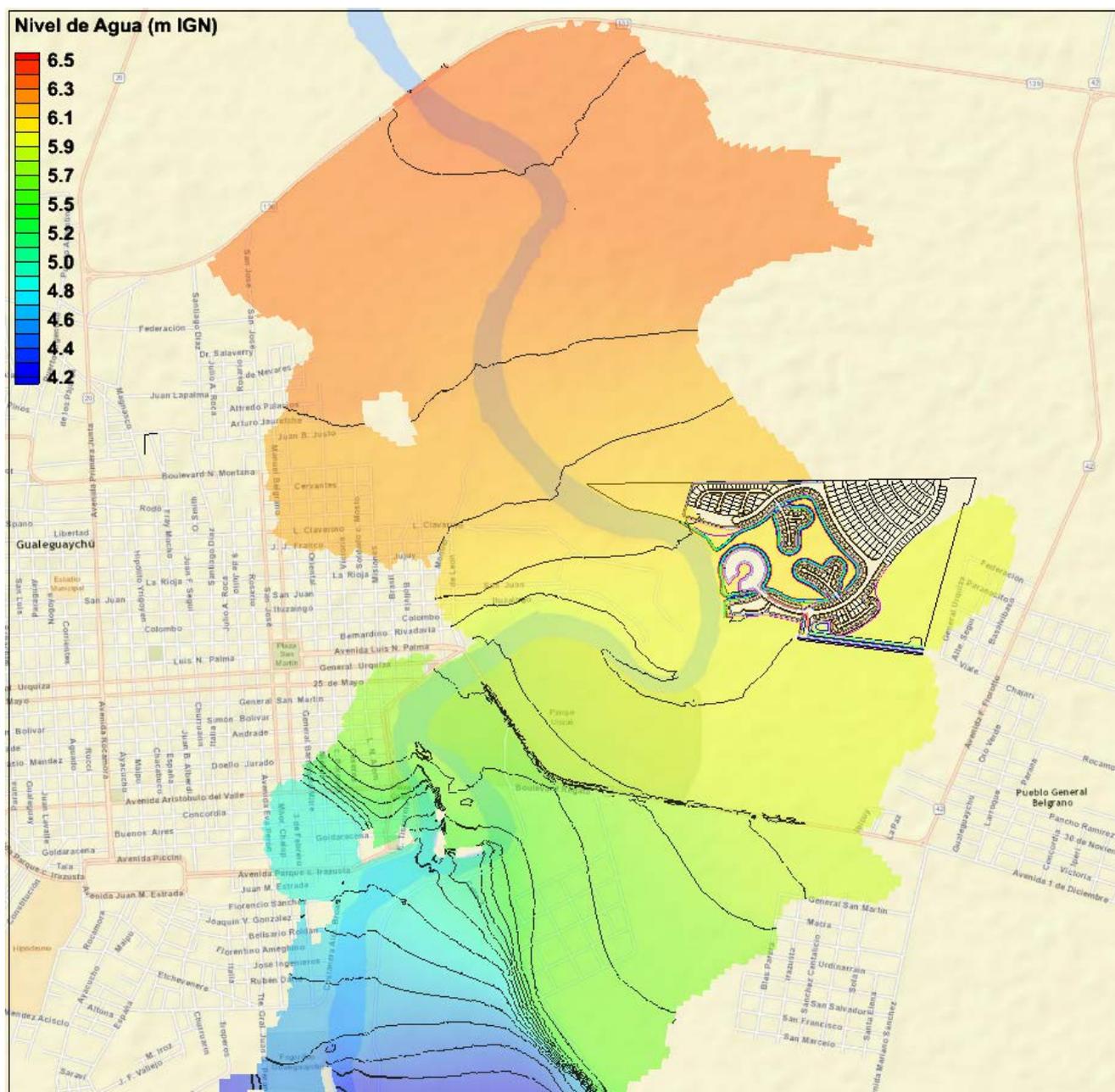


Figura 4-5: Nivel de Agua en la zona anegada para la condición con Amarras. Crecida de recurrencia 20 años

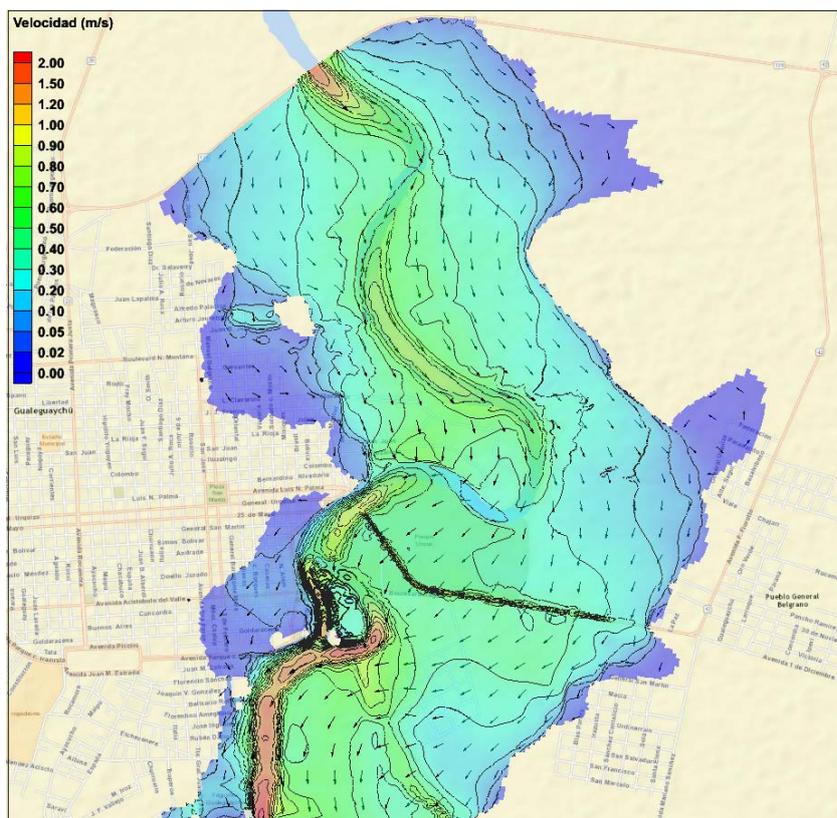


Figura 4-6: Velocidad del flujo en la zona anegada para la condición Actual. Crecida de recurrencia 20 años.

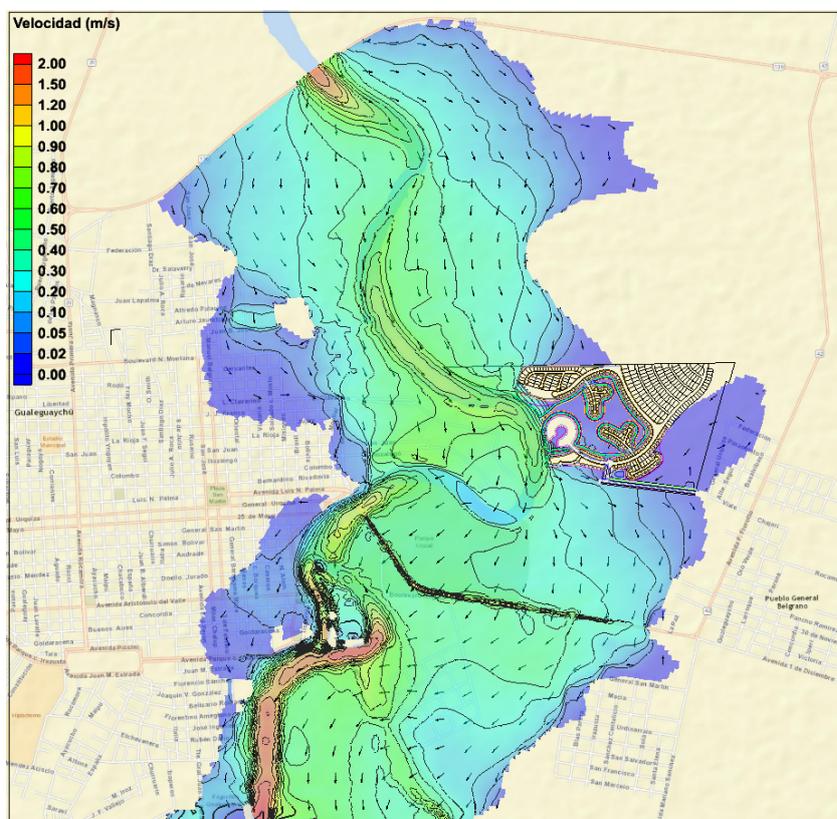


Figura 4-7: Velocidad del flujo en la zona anegada para la condición con Amarras. Crecida de recurrencia 20 años.

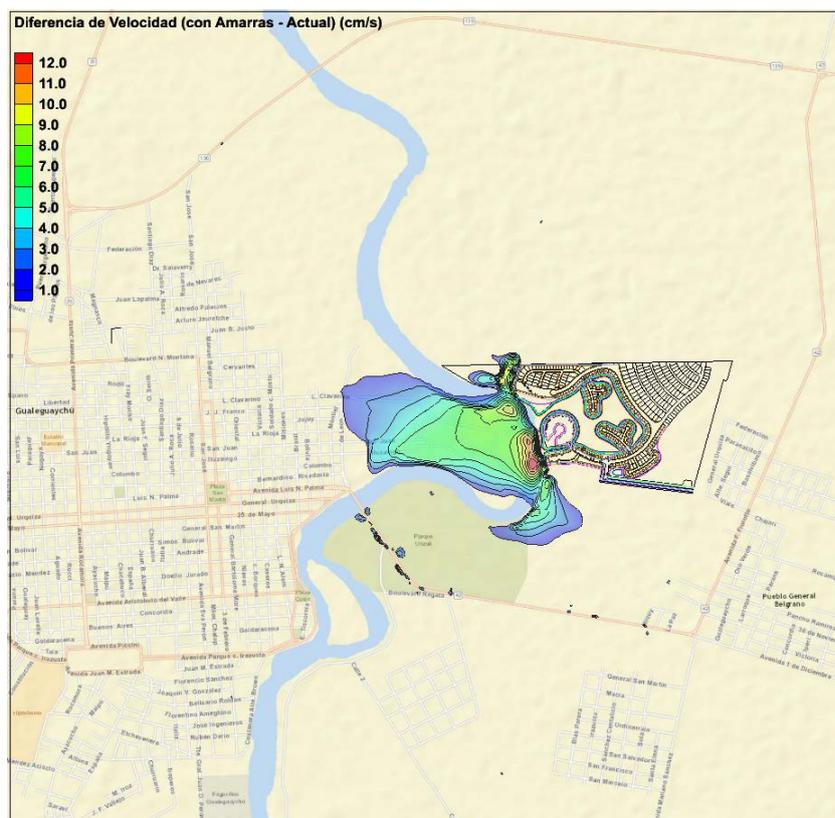


Figura 4-8: Incrementos de la Velocidad del flujo debido a Amarras. Crecida de recurrencia 20 años.

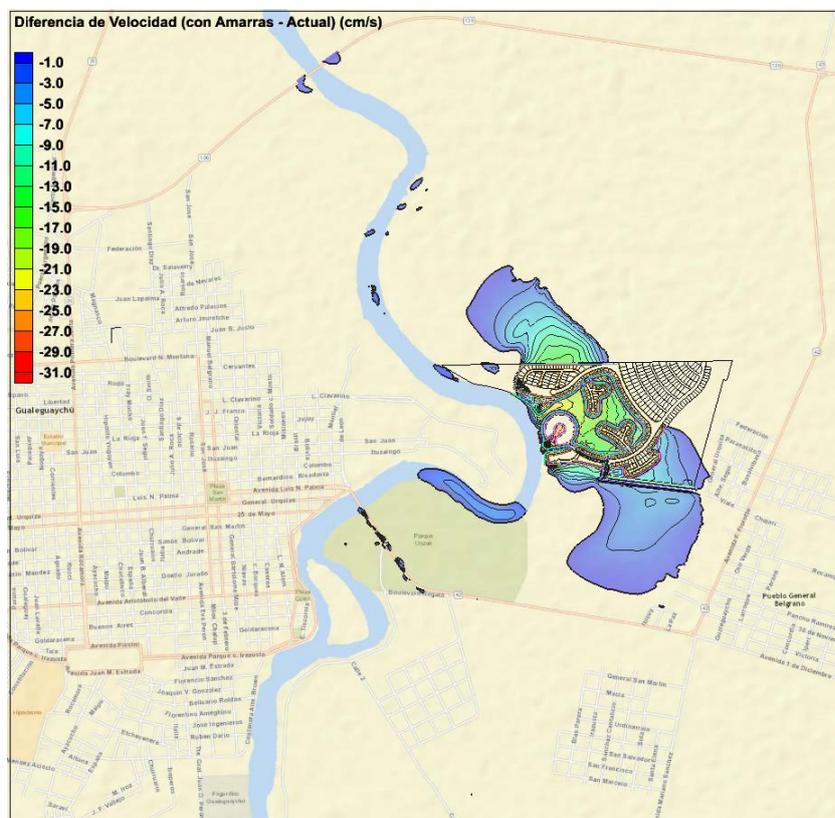


Figura 4-9: Reducciones de la Velocidad del flujo debido a Amarras. Crecida de recurrencia 20 años.

4.5 RESULTADOS PARA CRECIDA BASE DE 100 AÑOS DE RECURRENCIA

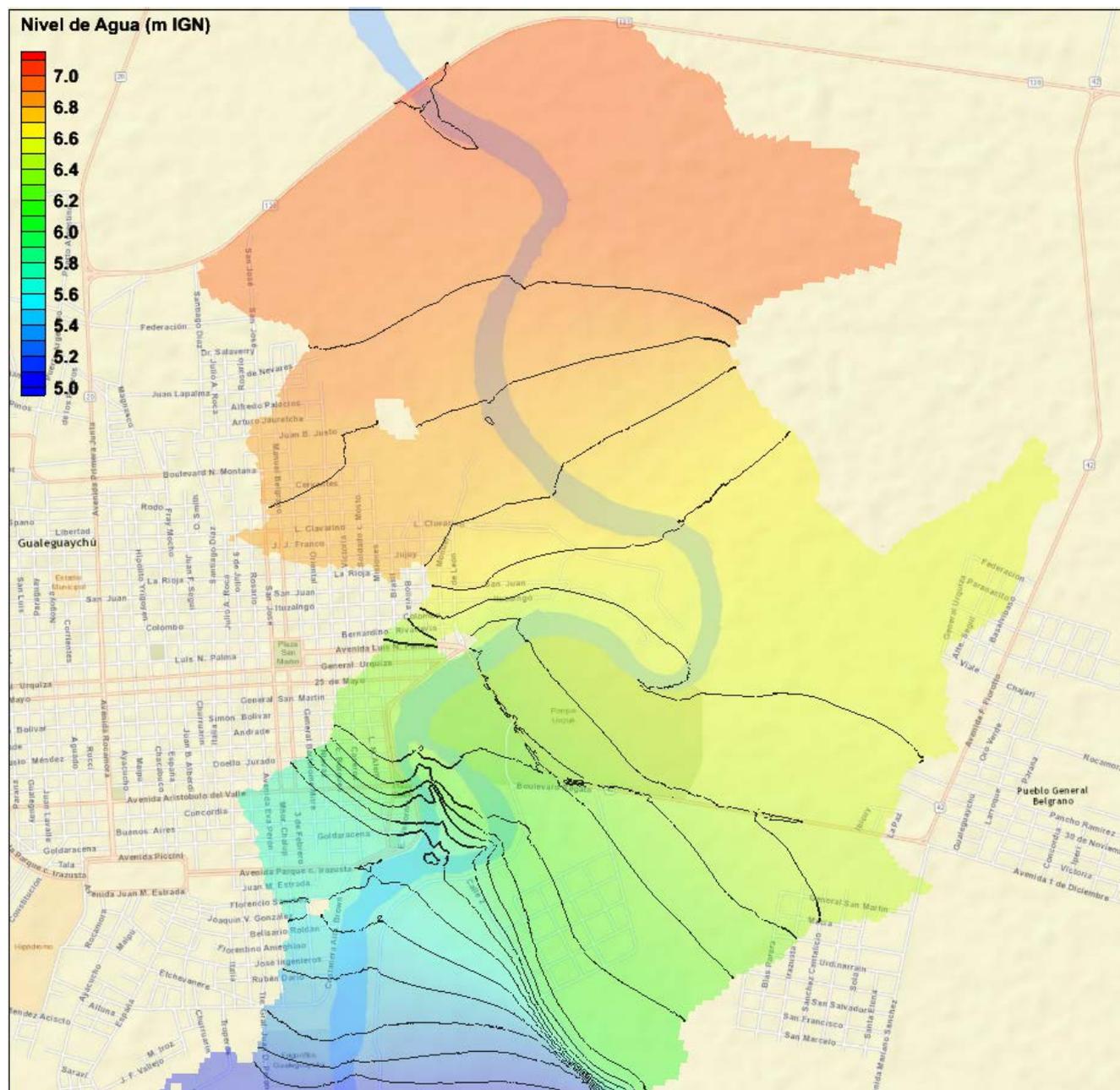


Figura 4-10: Nivel de Agua en la zona anegada para la condición Actual. Crecida de recurrencia 100 años

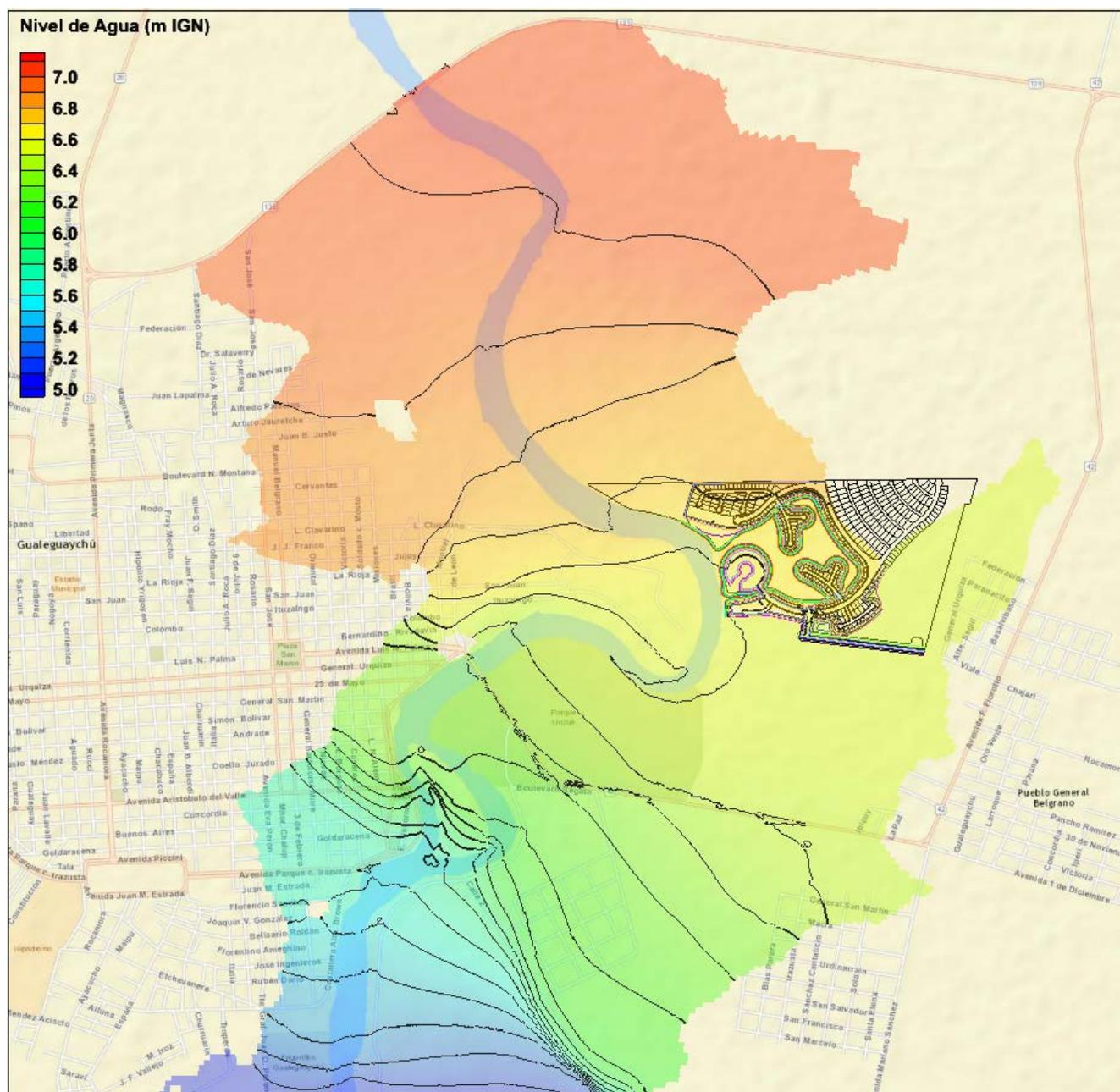


Figura 4-11: Nivel de Agua en la zona anegada para la condición con Amarras. Crecida de recurrencia 100 años

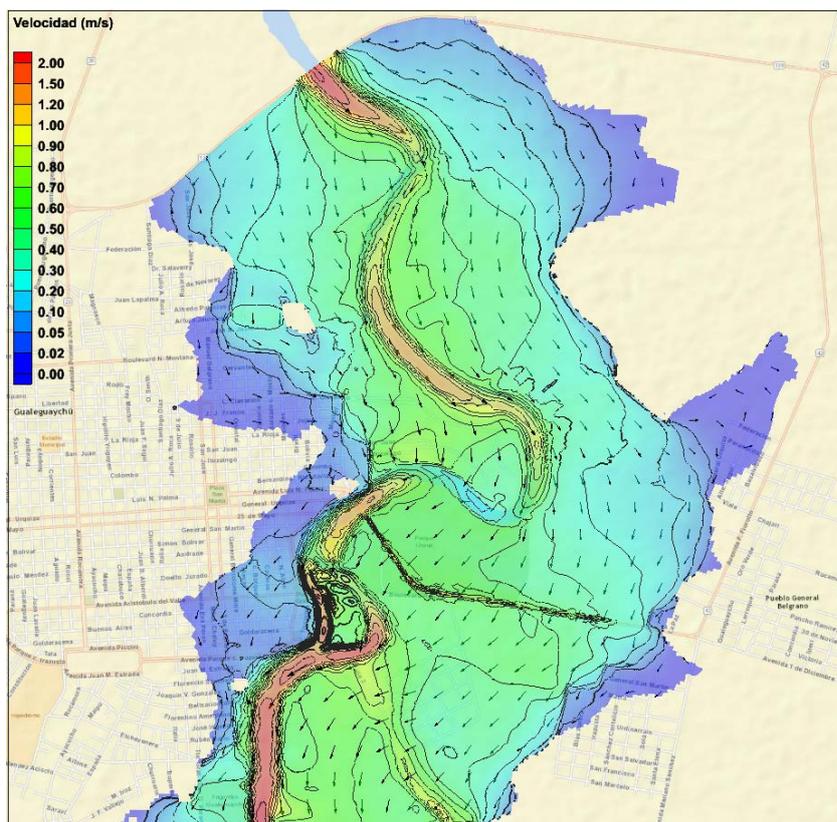


Figura 4-12: Velocidad del flujo en la zona anegada para la condición Actual. Crecida de recurrencia 100 años.

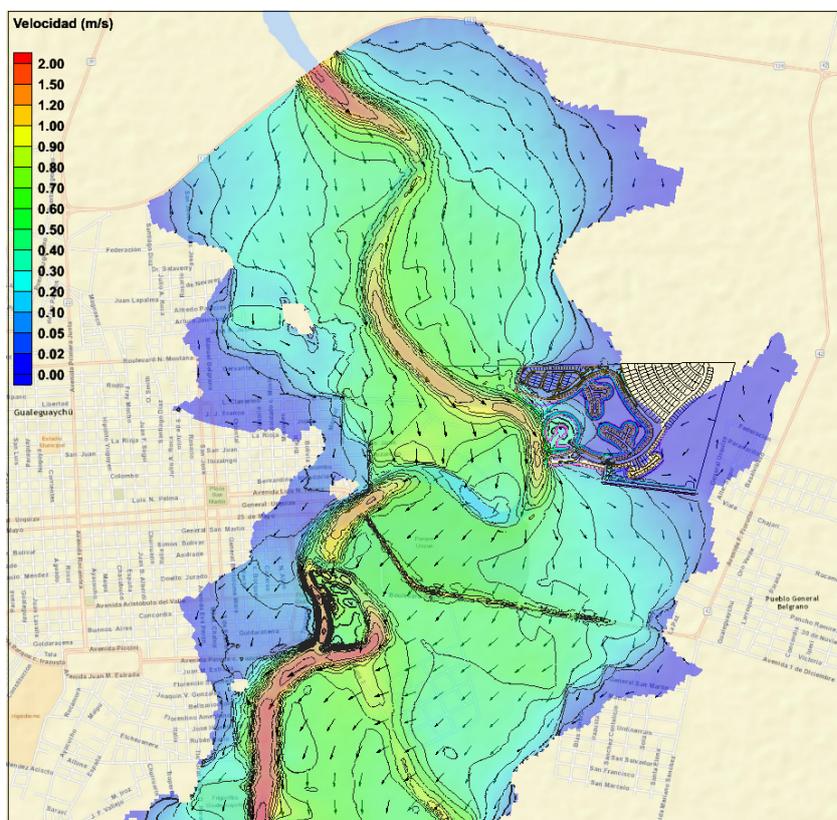


Figura 4-13: Velocidad del flujo en la zona anegada para la condición con Amarras. Crecida de recurrencia 100 años.

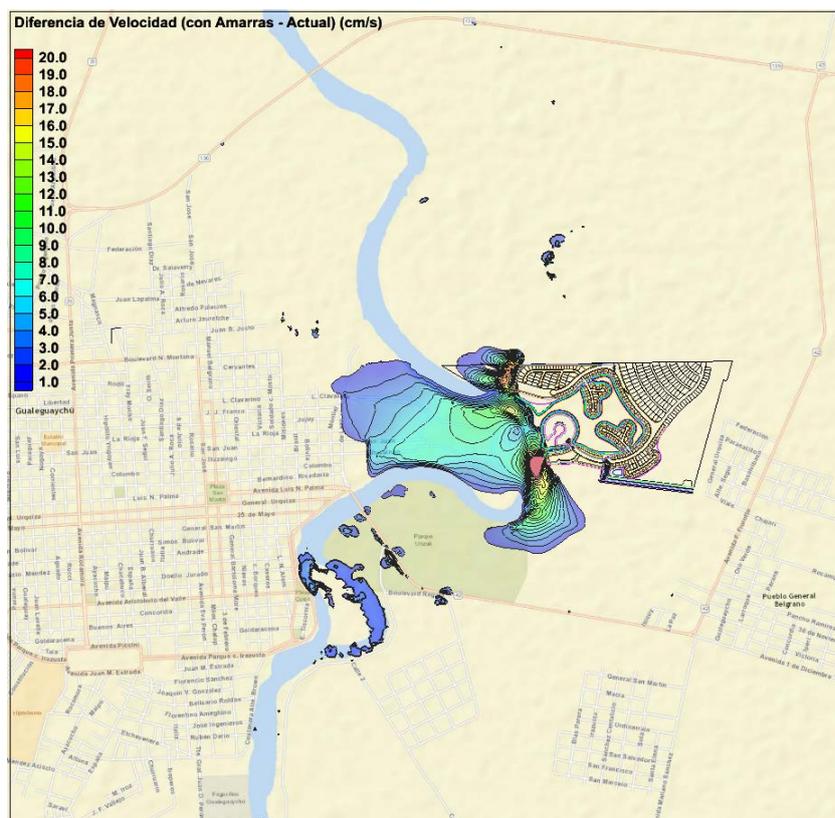


Figura 4-14: Incrementos de la Velocidad del flujo debido a Amarras. Crecida de recurrencia 100 años.

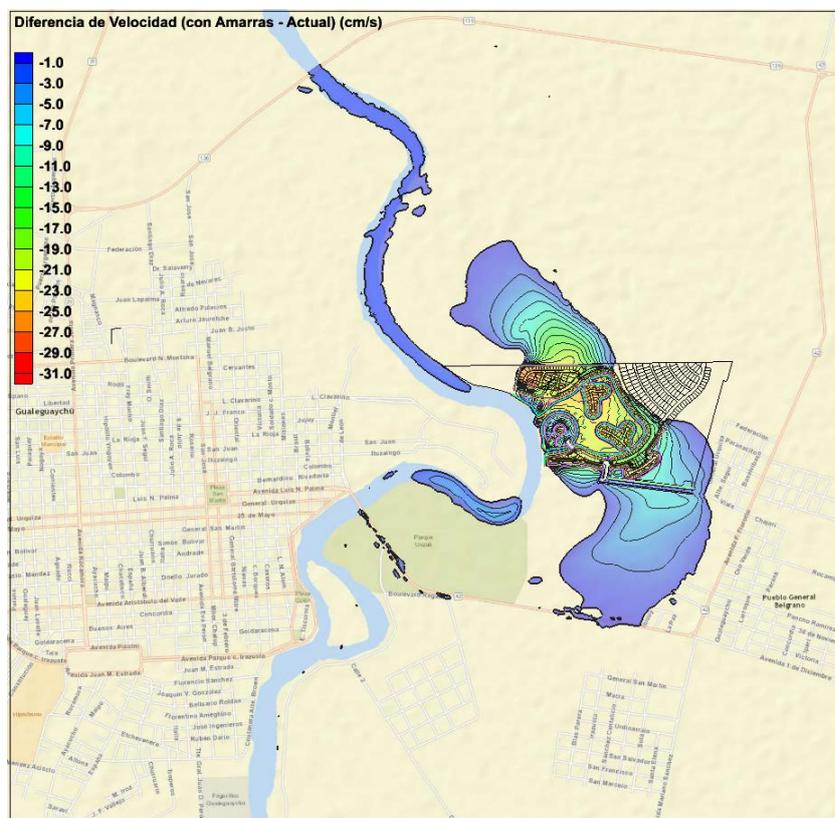


Figura 4-15: Reducciones de la Velocidad del flujo debido a Amarras. Crecida de recurrencia 100 años.

4.6 RESULTADOS PARA CRECIDA BASE DE 500 AÑOS DE RECURRENCIA

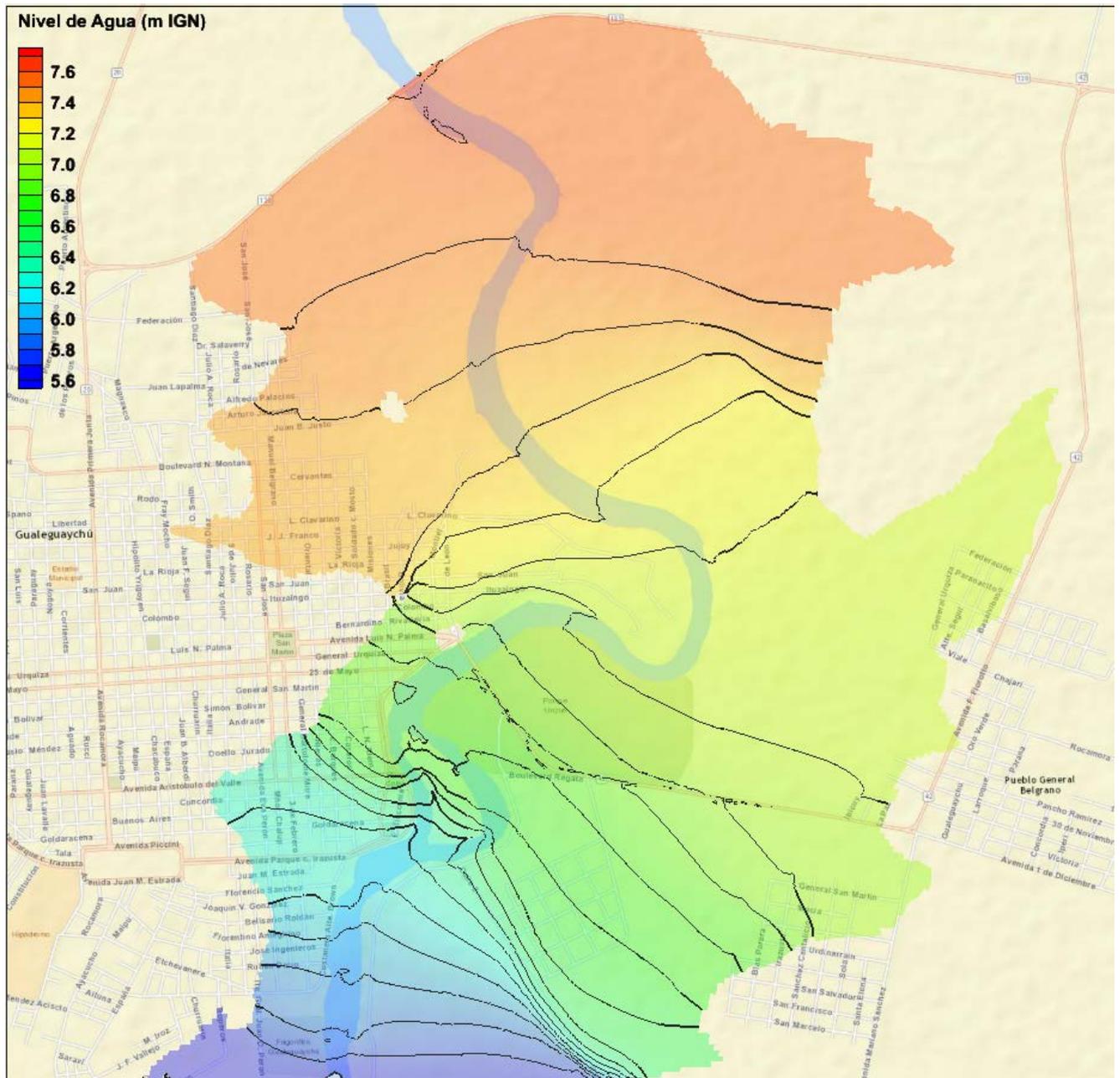


Figura 4-16: Nivel de Agua en la zona anegada para la condición Actual. Crecida de recurrencia 500 años

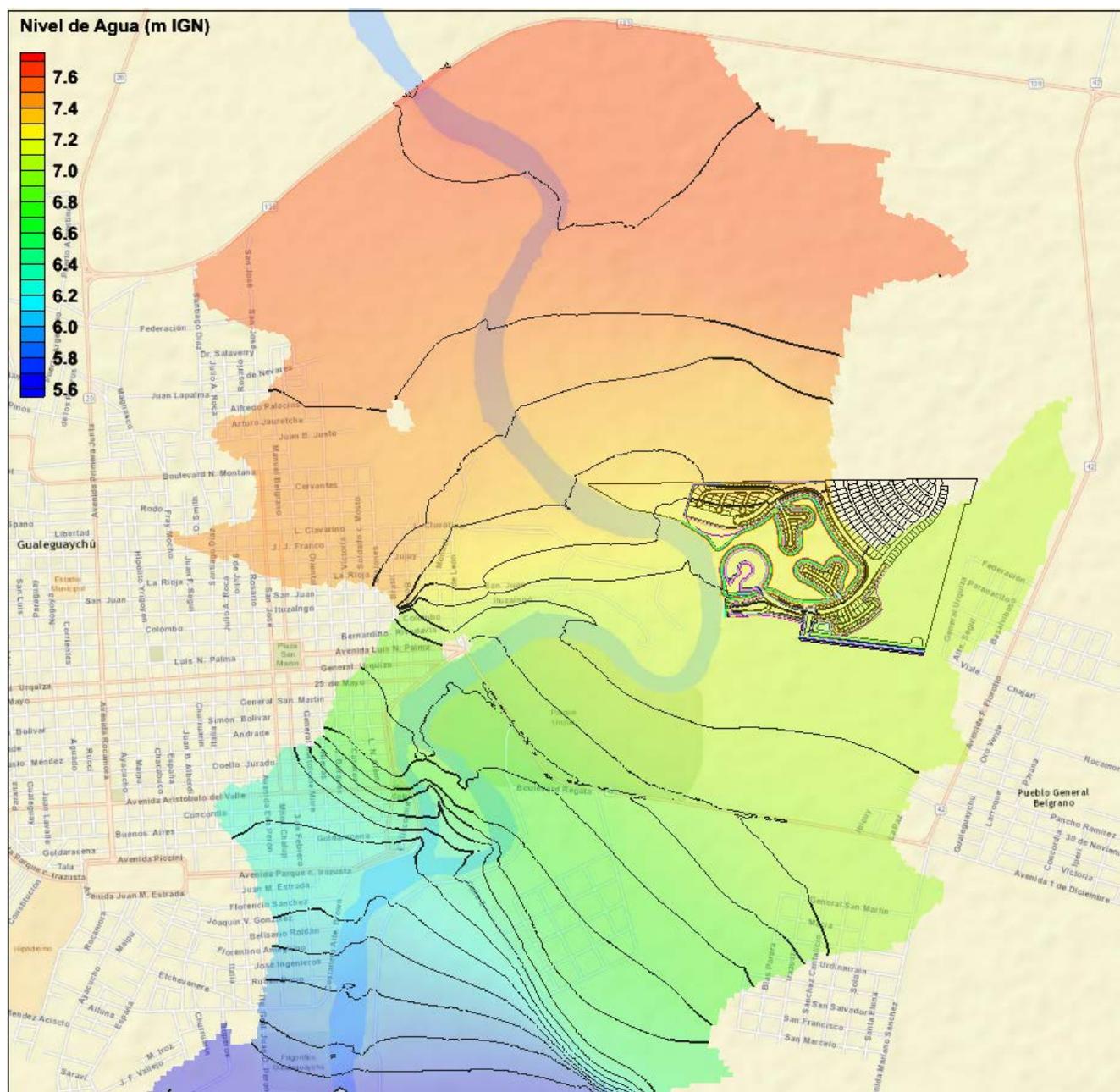


Figura 4-17: Nivel de Agua en la zona anegada para la condición con Amarras. Crecida de recurrencia 500 años

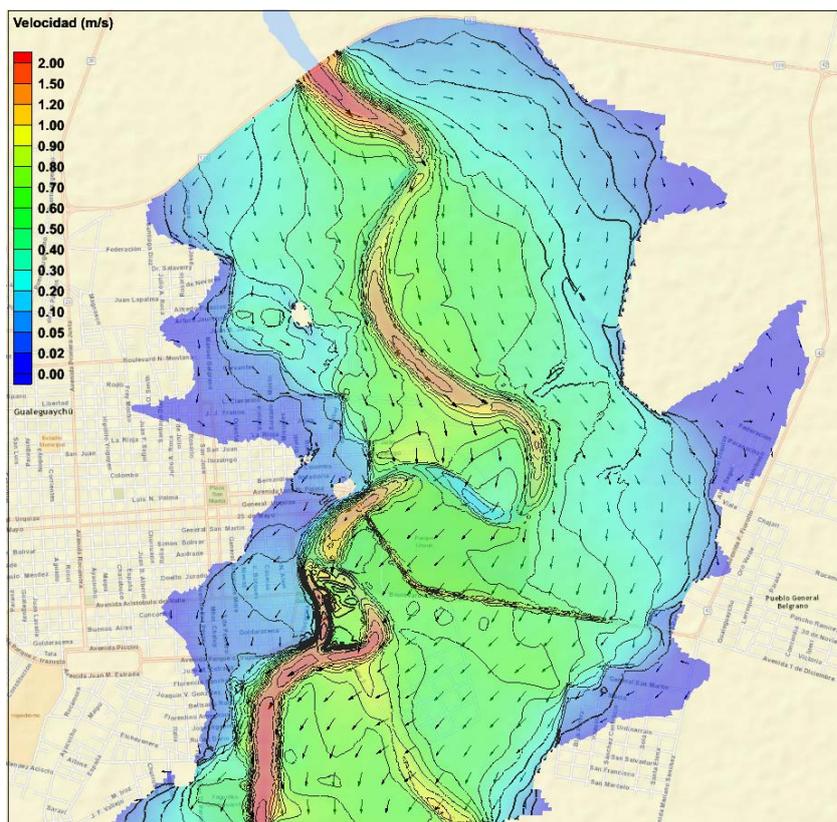


Figura 4-18: Velocidad del flujo en la zona anegada para la condición Actual. Crecida de recurrencia 500 años.

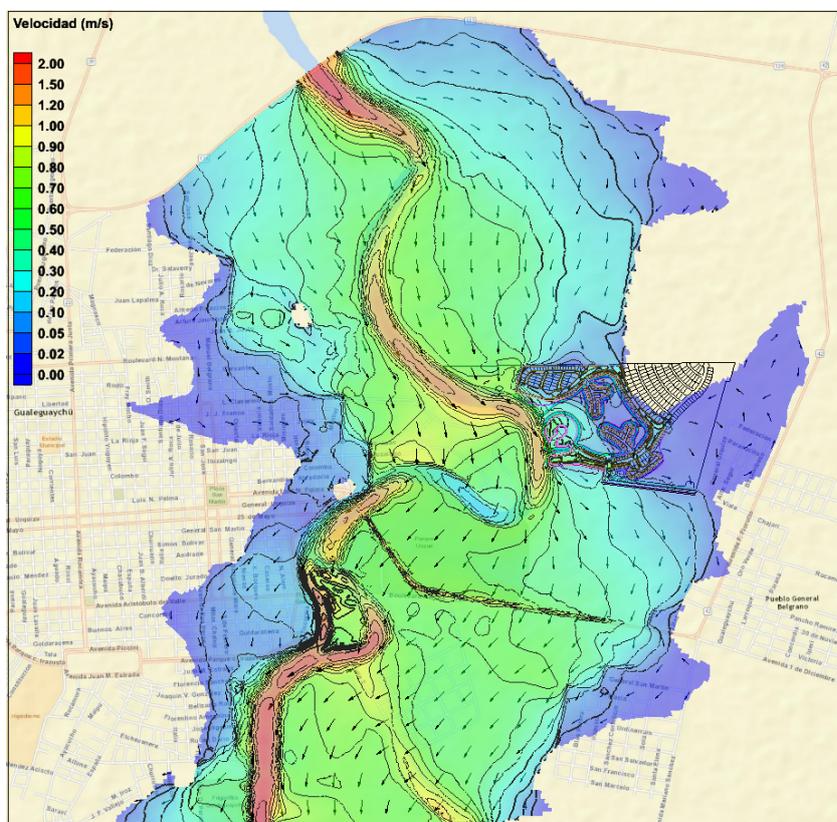


Figura 4-19: Velocidad del flujo en la zona anegada para la condición con Amarras. Crecida de recurrencia 500 años.

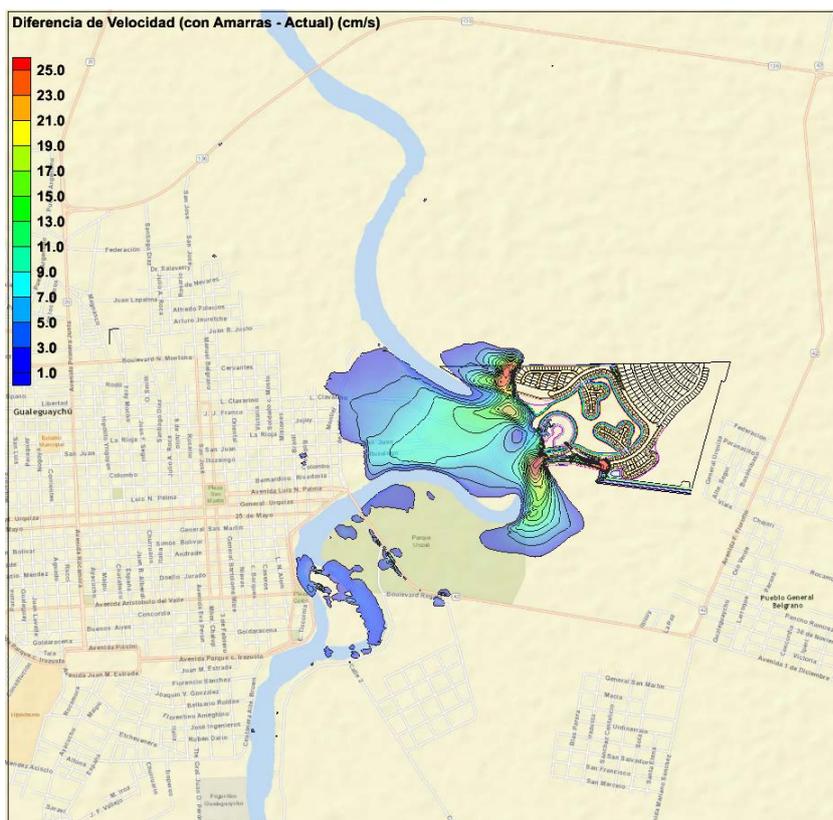


Figura 4-20: Incrementos de la Velocidad del flujo debido a Amarras. Crecida de recurrencia 500 años.

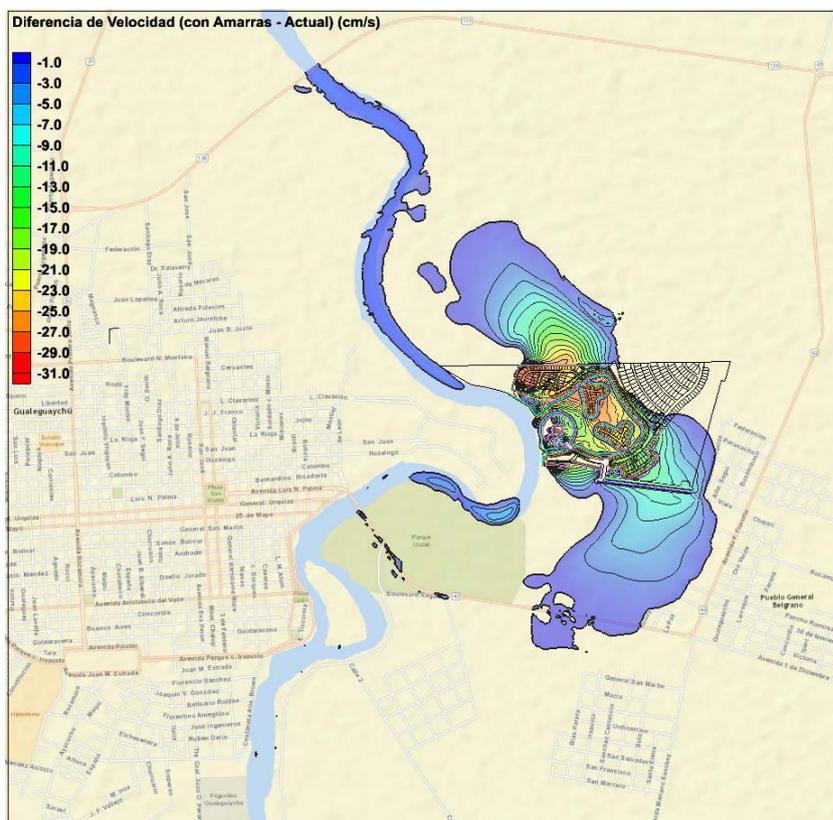


Figura 4-21: Reducciones de la Velocidad del flujo debido a Amarras. Crecida de recurrencia 500 años.

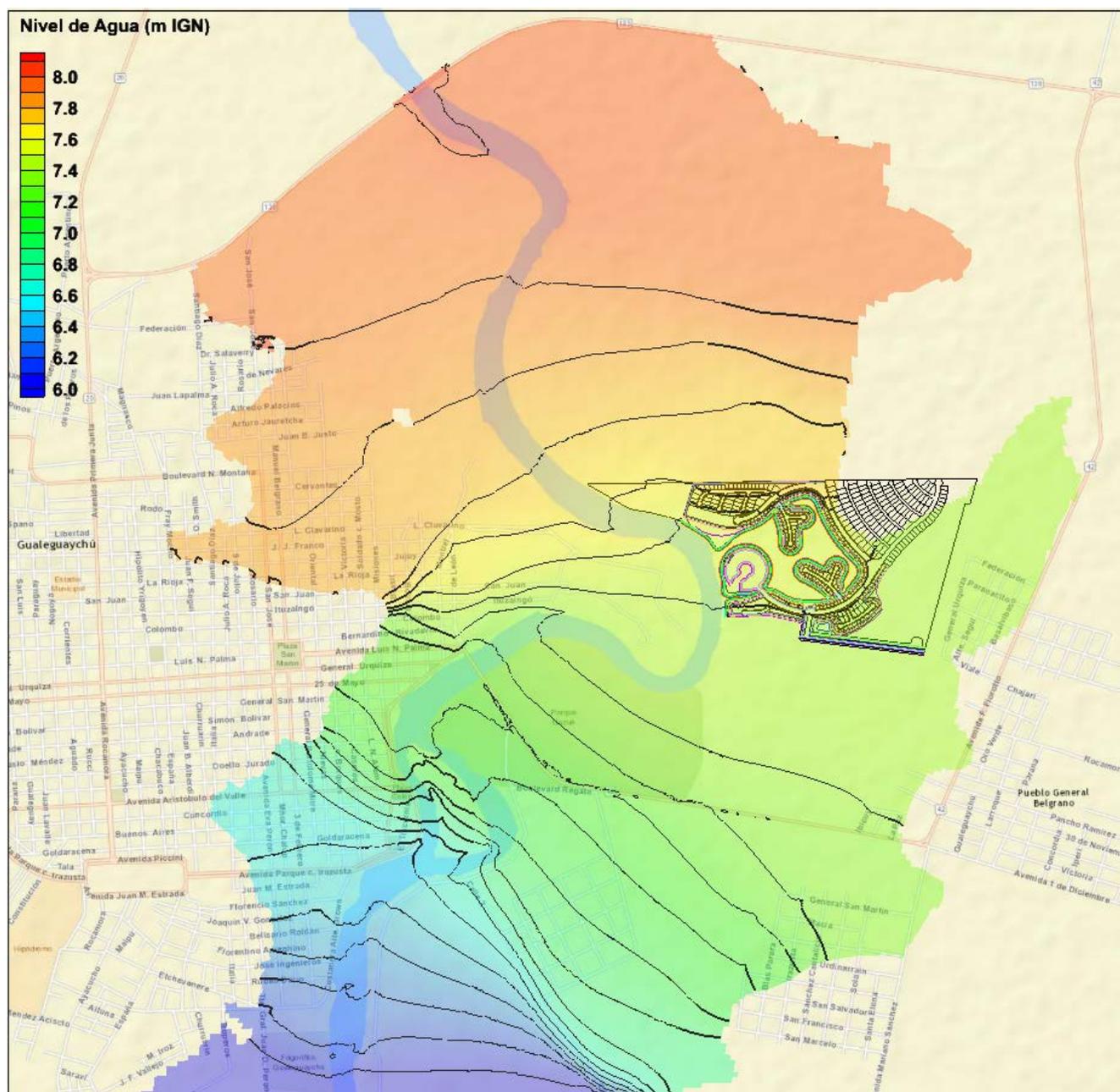


Figura 4-23: Nivel de Agua en la zona anegada para la condición con Amarras. Crecida de recurrencia 500 años. Sensibilidad A

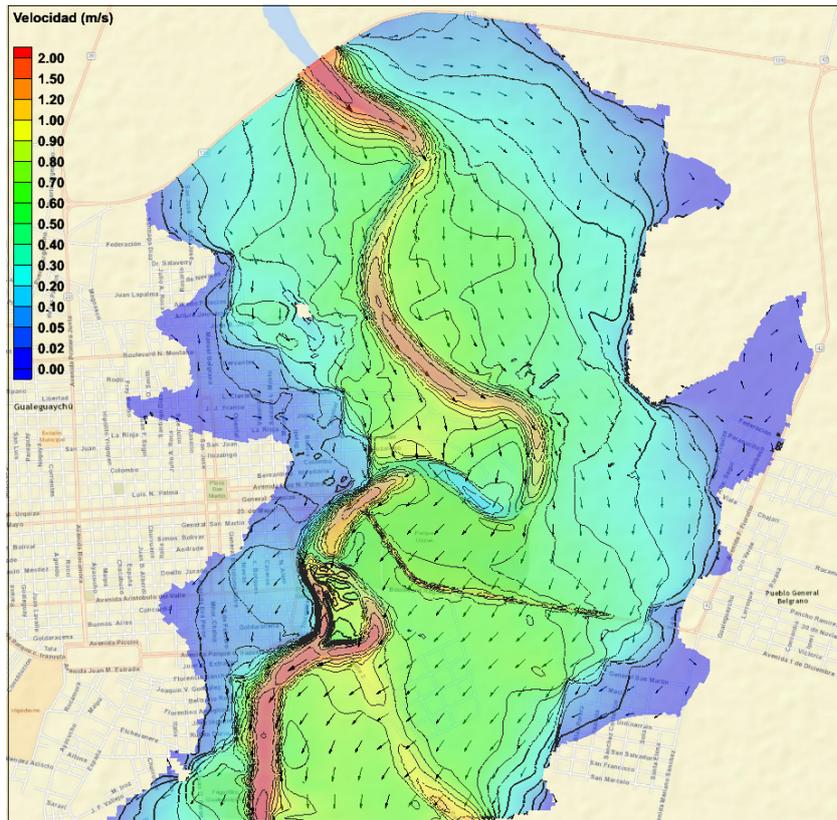


Figura 4-24: Velocidad del flujo en la zona anegada para la condición Actual. Crecida de recurrencia 500 años. Sensibilidad A

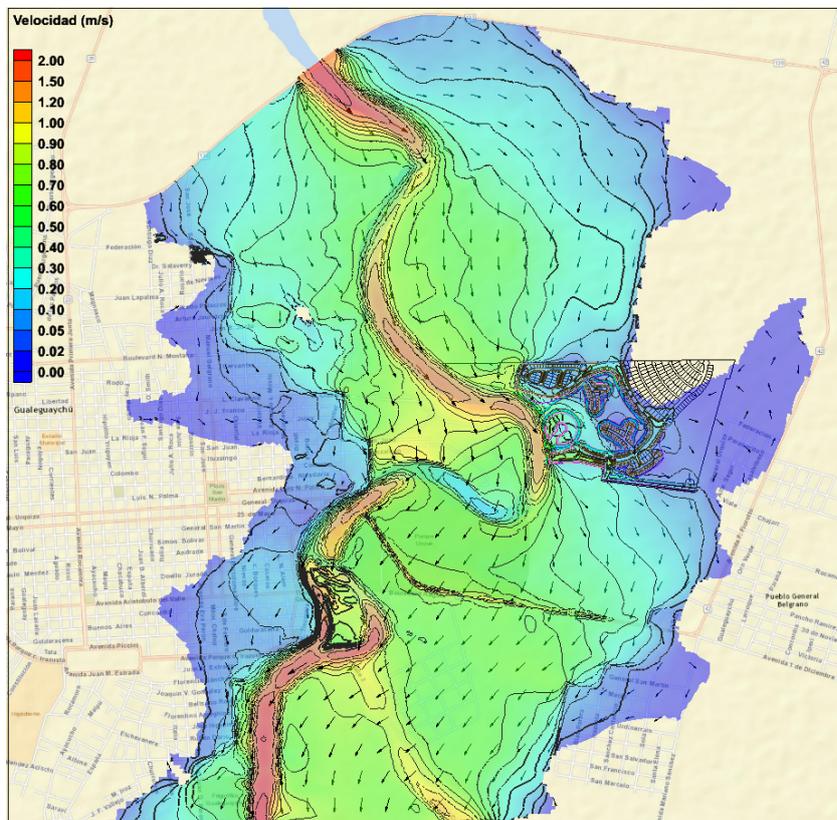


Figura 4-25: Velocidad del flujo en la zona anegada para la condición con Amarras. Crecida de recurrencia 500 años. Sensibilidad A

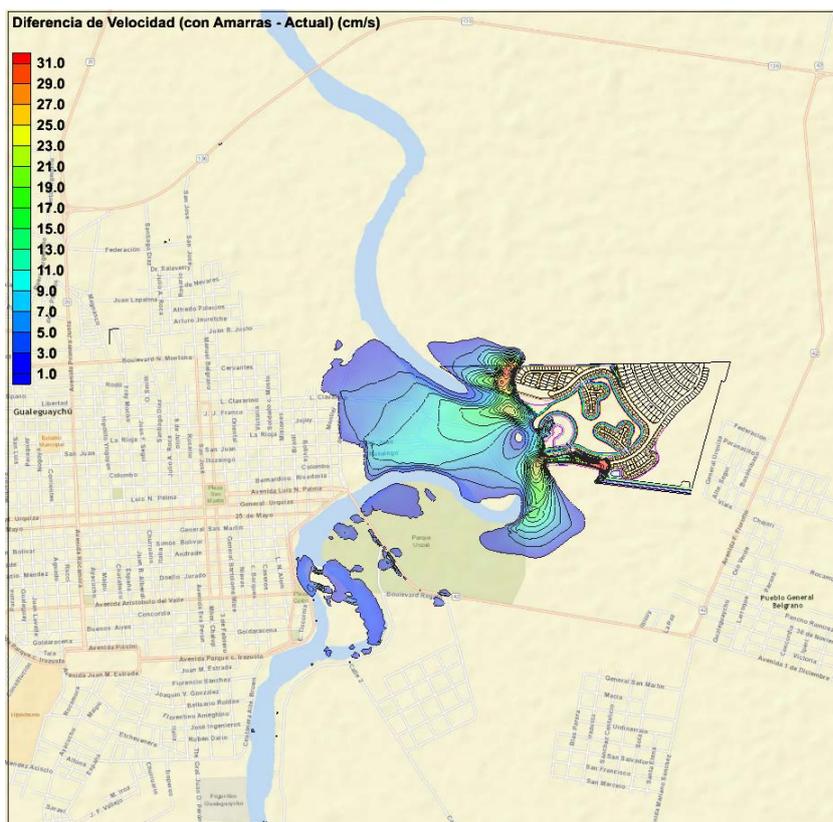


Figura 4-26: Incrementos de la Velocidad del flujo debido a Amarras. Crecida de recurrencia 500 años.
Sensibilidad A

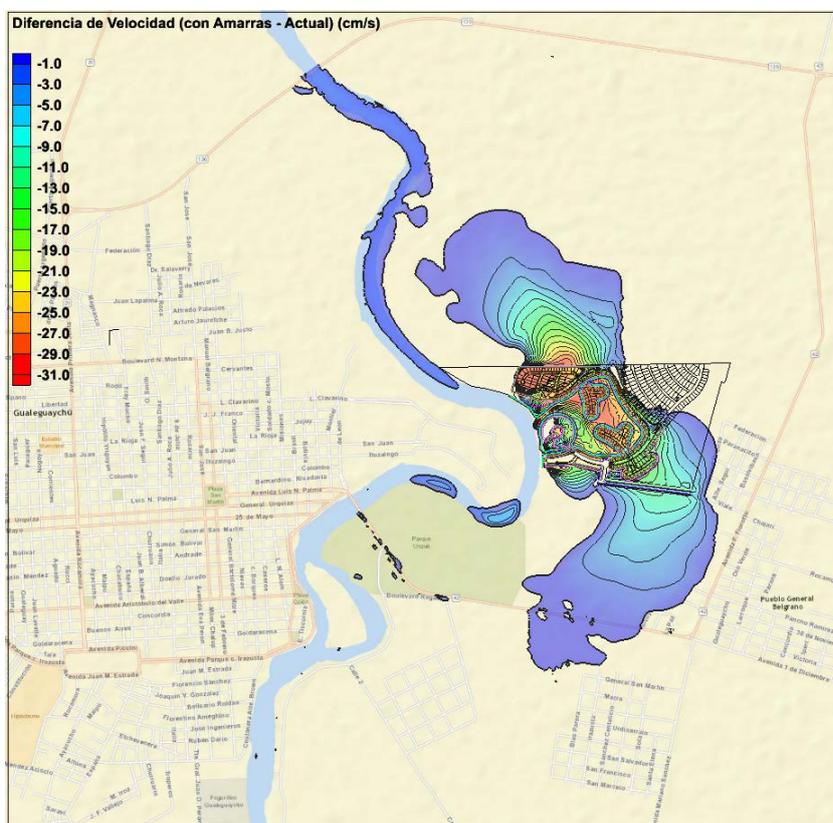


Figura 4-27: Reducciones de la Velocidad del flujo debido a Amarras. Crecida de recurrencia 500 años.
Sensibilidad A

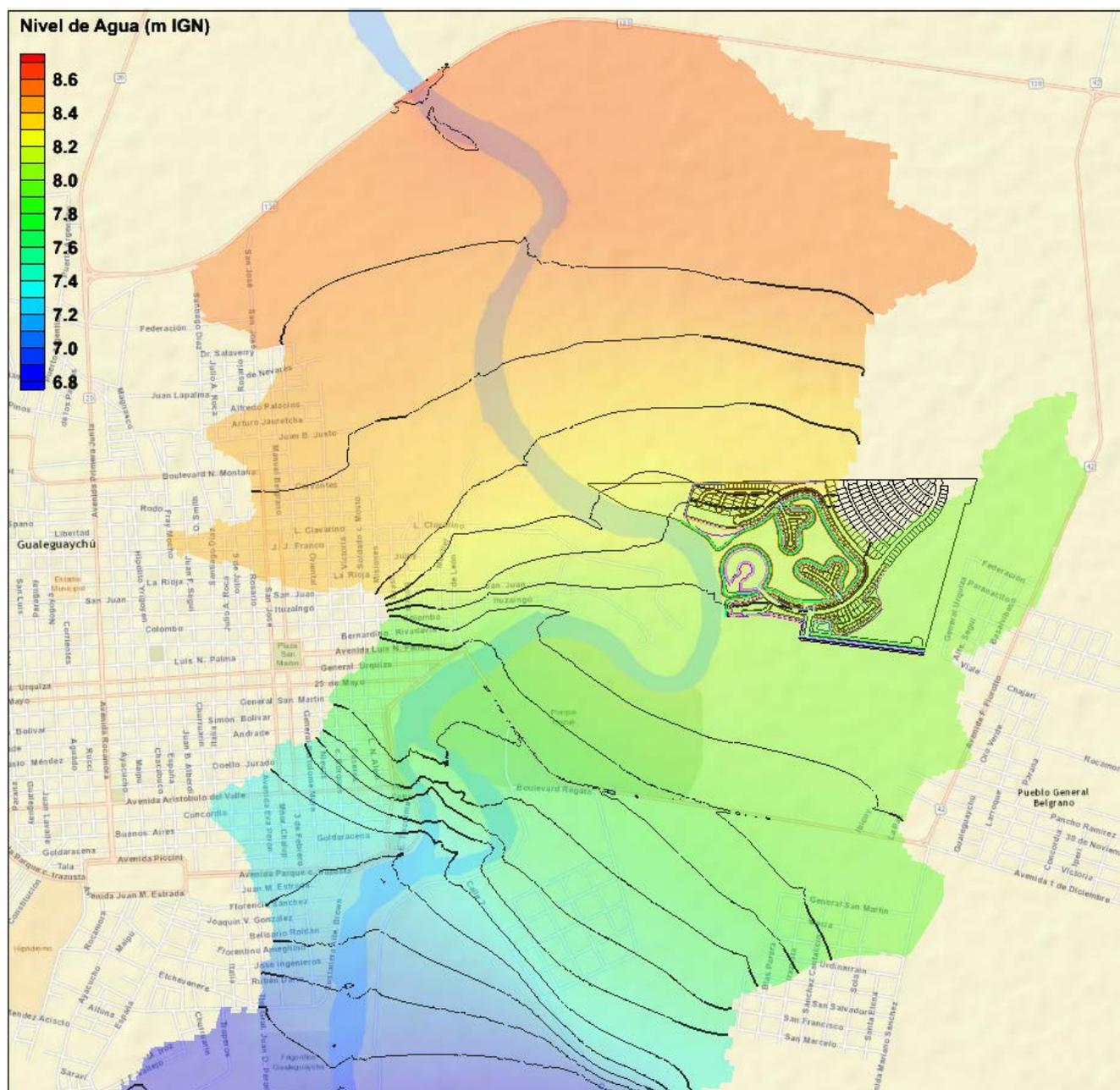


Figura 4-29: Nivel de Agua en la zona anegada para la condición con Amarras. Crecida de recurrencia 500 años. Sensibilidad C

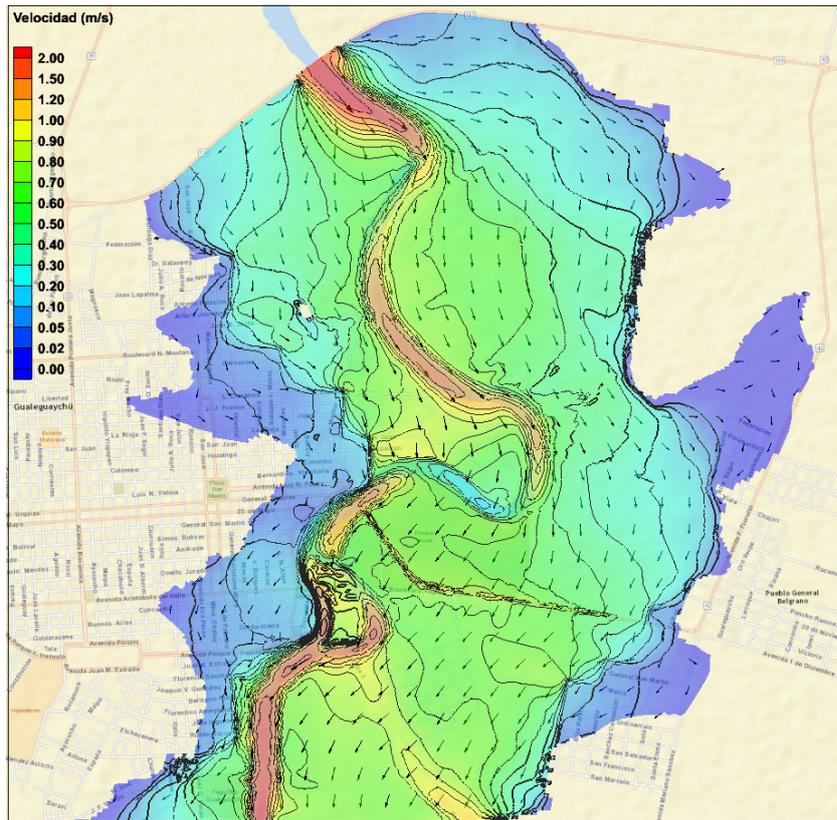


Figura 4-30: Velocidad del flujo en la zona anegada para la condición Actual. Crecida de recurrencia 500 años. Sensibilidad C

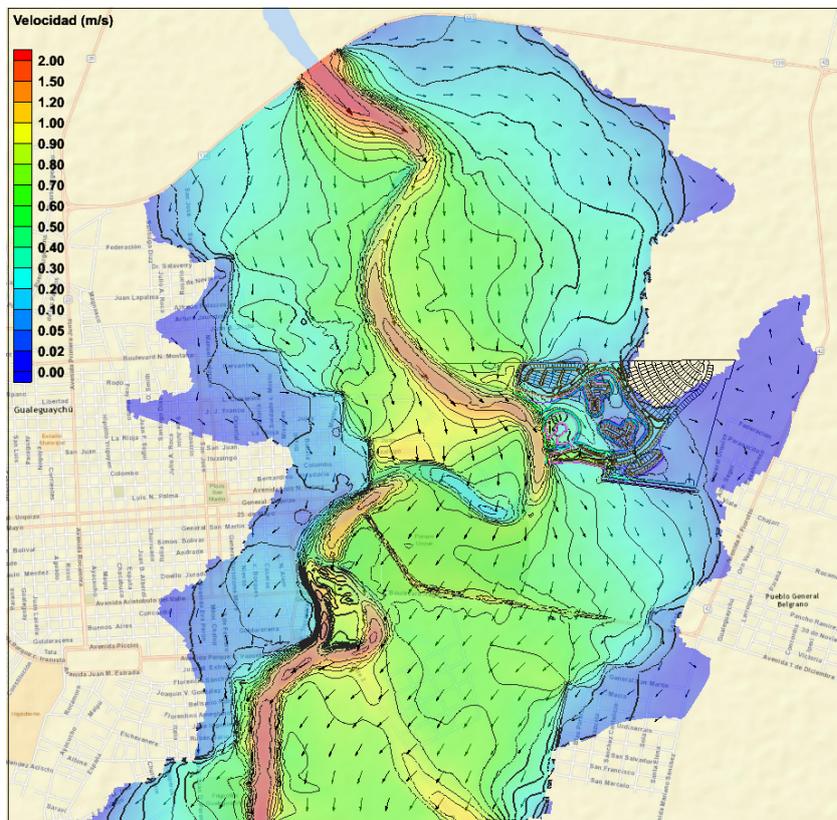


Figura 4-31: Velocidad del flujo en la zona anegada para la condición con Amarras. Crecida de recurrencia 500 años. Sensibilidad C

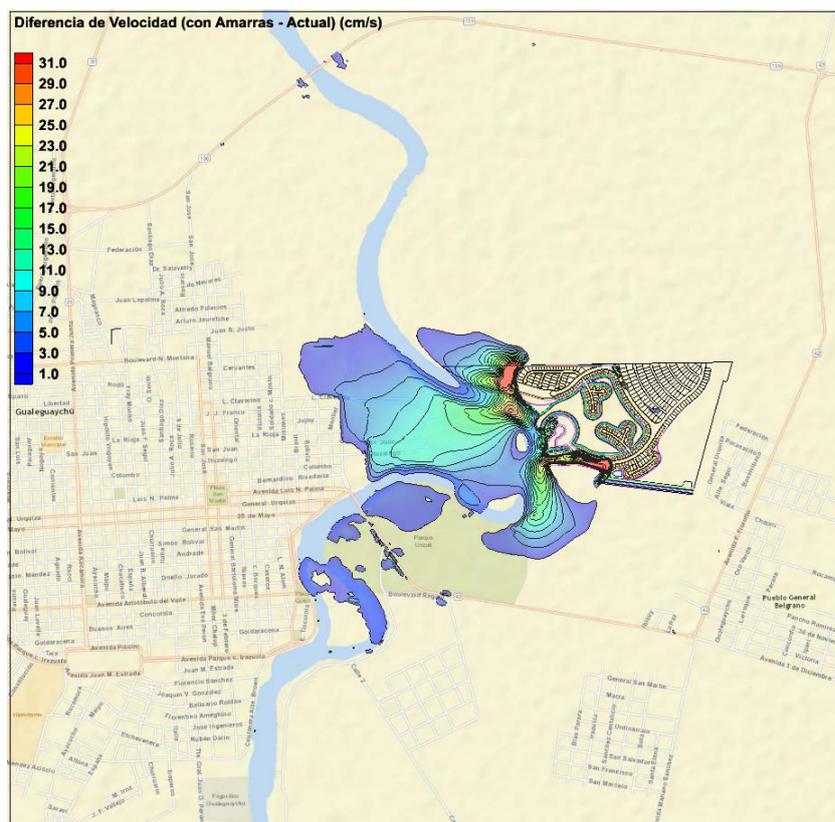


Figura 4-32: Incrementos de la Velocidad del flujo debido a Amarras. Crecida de recurrencia 500 años.
Sensibilidad C

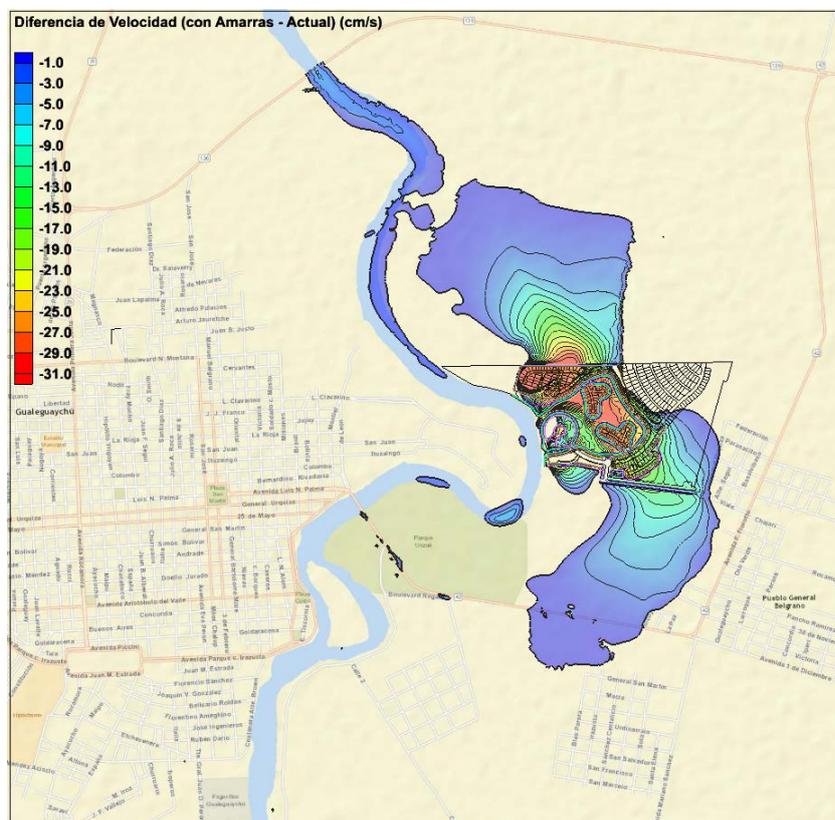


Figura 4-33: Reducciones de la Velocidad del flujo debido a Amarras. Crecida de recurrencia 500 años.
Sensibilidad C

4.9 RESULTADOS PARA CRECIDA DE 500 AÑOS DE RECURRENCIA, SENSIBILIDAD A CON Y SIN VARIACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE RUGOSIDAD

Se presentan a continuación los resultados de niveles y sobreelevaciones para los coeficientes de rugosidad adoptados y para los coeficientes modificados a modo de análisis de sensibilidad.

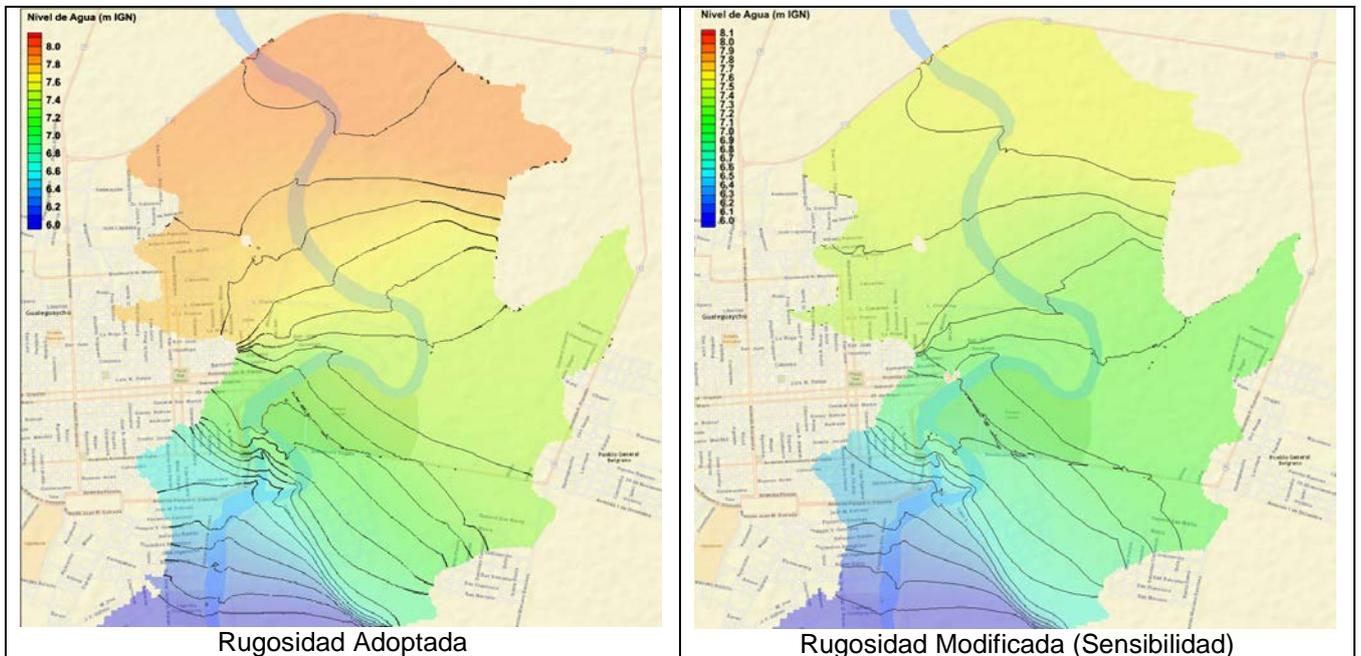


Figura 4-34: Nivel de Agua en la zona anegada para la condición Actual. Crecida de recurrencia 500 años. Sensibilidad A. Comparación de diferentes rugosidades

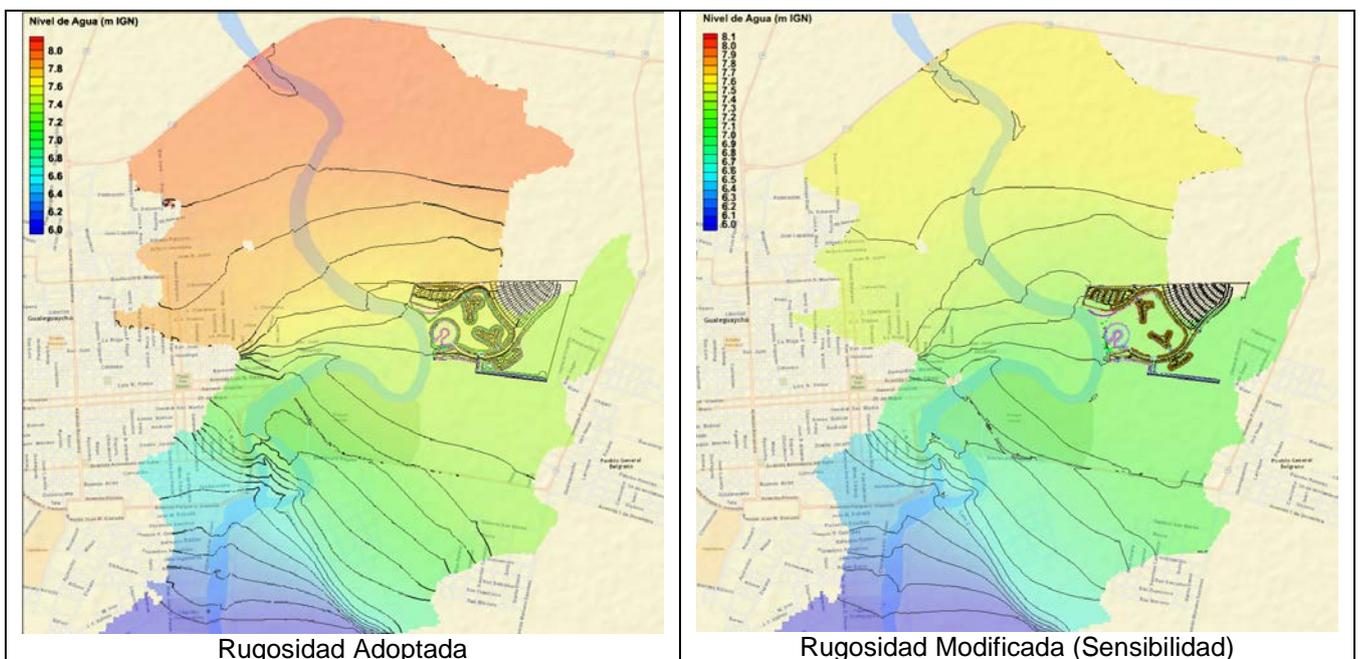


Figura 4-35: Nivel de Agua en la zona anegada para la condición con Amarras. Crecida de recurrencia 500 años. Sensibilidad A. Comparación de diferentes rugosidades

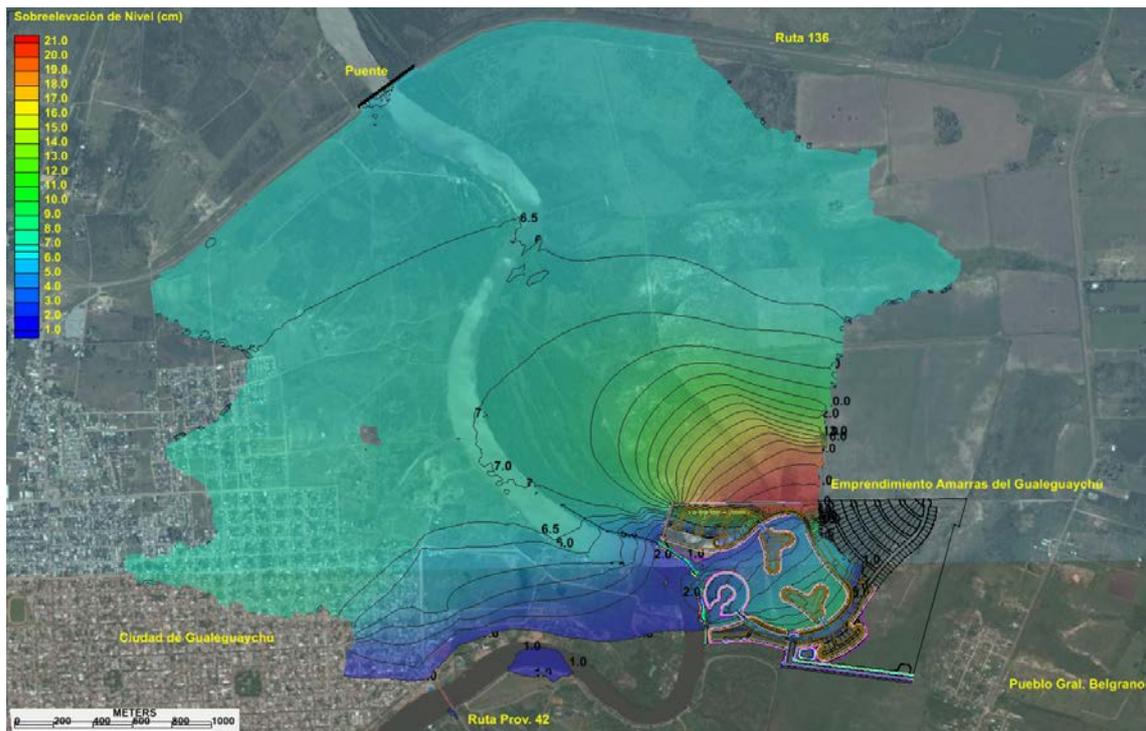


Figura 4-36: Sobreelevación del Nivel de agua (superior a 1 cm). Crecida de recurrencia 500 años. Sensibilidad A. Coeficientes de rugosidad adoptados.

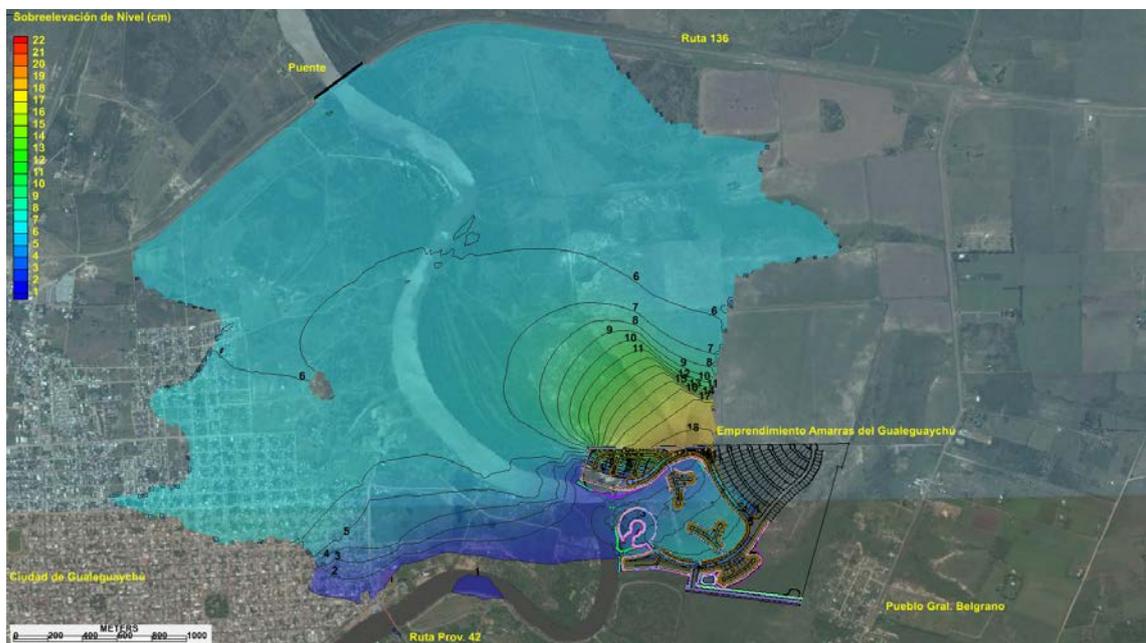


Figura 4-37: Sobreelevación del Nivel de agua (superior a 1 cm). Crecida de recurrencia 500 años. Sensibilidad A. Coeficientes de rugosidad modificados.

Se puede apreciar que a pesar de que el cambio en los niveles de agua al modificar la rugosidad es relativamente importante, la distribución espacial y el valor máximo de sobreelevación no se modifica sensiblemente en la zona de la ciudad de Gualeguaychú (sólo algunos milímetros), mientras que varía en un par de centímetros inmediatamente aguas arriba del emprendimiento, que es el lugar de máxima obstrucción del flujo.

5. CONCLUSIONES GENERALES

5.1 CONCLUSIONES SOBRE LA VALIDACIÓN DE LOS ESTUDIOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS UNIDIMENSIONALES PREVIOS

Las conclusiones principales alcanzadas se pueden resumir de la siguiente manera:

Los procedimientos seguidos por INCOCIV y BISA para elaborar los hidrogramas de caudal mediante el empleo de un modelo hidrológico y la selección de tormentas de diseño se consideran razonables y de acuerdo a las reglas del arte.

No obstante, a los efectos de la presente evaluación, se consideró conveniente a modo de análisis de sensibilidad, verificar el resultado obtenido por BISA considerando una tormenta de ocurrencia menos probable, con 500 años de recurrencia, no uniforme espacialmente y temporalmente (identificable conceptualmente como la “tormenta perfecta” para la cuenca del río Gualeguaychú dado que la lluvia más intensa recorrería la cuenca de Norte a Sur siguiendo el avance de la onda de crecida), la cual originaría caudales un 15% superiores a los adoptados por BISA.

Asimismo, se ha realizado una evaluación expeditiva de los posibles incrementos de precipitaciones hacia fin del siglo XII para una hipótesis conservativa de emisión de gases de efecto invernadero, conforme a la reciente publicación “Cambio climático en Argentina; tendencias y proyecciones” elaborado por el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA, 2015), concluyendo que adoptando un incremento adicional en los caudales del 20%, se obtendrían condiciones representativas de lo que podría ocurrir hacia fines del presente siglo.

Finalmente, se ha considerado que la adopción de un nivel del río Gualeguaychú en la estación “Boca” (desembocadura en el río Uruguay) superado el 2% del tiempo, requerida por la Dirección Provincial de Hidráulica, si bien puede considerarse un criterio razonable para evitar la superposición poco probable de dos condiciones extremas (precipitaciones extraordinarias en la cuenca del río Gualeguaychú con sudestada actuando sobre el río Uruguay), no es la condición más conservativa posible, habida cuenta de que una situación muy extrema de conjunción de ambos fenómenos se produjo en el año 1959. Por lo tanto, también se consideró conveniente realizar un análisis de sensibilidad frente a un evento combinado, para apreciar el efecto que tendría el emprendimiento Amarras en esas circunstancias.

Se verificó que si bien en el estudio de BISA se consideró como situación “Actual” una que tenía incorporado el futuro Nuevo Puente estudiado por INCOCIV a ser construido aguas abajo (a la altura del frigorífico de Gualeguaychú), ello no introdujo un efecto sensible en la zona de Amarras, dado que ese puente fue diseñado incluyendo una excavación y ampliación del cauce del río Gualeguaychú, así como canales aliviadores en la planicie, todo lo cual provoca una leve reducción de los niveles de agua, aguas arriba del mismo, con respecto a la situación actual, caracterizada por un estrechamiento local del cauce.

Cabe mencionar que todo terraplén vial en la planicie de inundación provoca una sobreelevación aguas arriba que empeora las condiciones de inundabilidad de la zona.

En particular se desprende de los estudios precedentes y de la verificación de la modelación unidimensional realizada, que los terraplenes de acceso al Puente de la Balsa (Ruta Prov. N° 42) y de la Ruta Nac. N° 136, provocan importantes sobreelevaciones del nivel de agua durante las crecidas, lo cual es independiente de la presencia de Amarras. Este hecho se evaluó también con el modelo bidimensional, el cual permite analizarlo con mayor detalle.

Se verificó realizando simulaciones impermanentes que representen el crecimiento y descenso de la onda de crecida, que el efecto de reducción de la capacidad de almacenamiento de la planicie inundable provocado por Amarras, incrementa los resultados de sobrelevación calculada por BISA utilizando un caudal permanente, en 1 cm para las recurrencias de 5 a 100 años, y de 2 cm para 500 años. Los valores de sobrelevación resultantes son entonces de 1 cm para recurrencia 5 años, 3 cm para 20 años, 6 cm para 100 años, y 9 cm para 500 años. Además se verificó que modelizando en forma impermanente desaparece el efecto de reducción de nivel frente al predio de Amarras que se obtenía en el estudio de BISA, registrándose una pequeña sobreelevación.

Esta verificación implica que a los efectos de verificar el impacto global del emprendimiento, el efecto de impermanencia no es significativo, aun cuando el modo en que el modelo unidimensional considera la pérdida de almacenamiento en la planicie debida a Amarras es muy conservativo, dado que asume que la totalidad del predio no es ocupado por el agua, como si estuviese polderizado (rodeado por un terraplén). Cabe mencionar que Amarras no tiene sistema de polders, sino que está integrado a la dinámica fluvial por sus conexiones al río. Entonces en realidad el volumen de almacenamiento afectado por las obras es muy inferior al que tendría un polder, ya que gran parte de estas obras corresponden a alteos del terreno lineales (camino) y alteos areales localizados, con amplias zonas en cota natural o por debajo de ella, tal como ocurre con la laguna y el canal de acceso.

En cuanto a los análisis de sensibilidad realizados, se observó que aún en las más exigentes combinaciones naturales de eventos de crecida y sudestada que podrían calificarse como catastróficas, las que provocarían niveles de agua nunca experimentados en la zona y hasta superiores a los determinados estadísticamente para una recurrencia de 500 años, el impacto de Amarras en cuanto a la sobreelevación que induce se mantiene en los mismos niveles determinados para el caso Base, es decir, entre 8 y 9 centímetros. Ello significa que en casos extremos de niveles de inundación naturales, el efecto de Amarras es menor con respecto al aumento de nivel natural dado por las condiciones de lluvia y sudestada.

Los análisis precedentes implican, según nuestro criterio, que la modelización unidimensional realizada por BISA para evaluar el impacto de Amarras, ha sido realizada conforme a los procedimientos habituales para este tipo de estudios, siendo de utilidad para obtener un orden de magnitud general del impacto del emprendimiento Amarras del Gualeguaychú, el cual ha sido verificado en el presente estudio considerando condiciones de precipitación en la cuenca del río Gualeguaychú, crecida del río Uruguay y sudestada, aún más conservativas.

5.2 CONCLUSIONES SOBRE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS VARIACIONES DE NIVEL Y VELOCIDAD GENERADAS POR EL EMPRENDIMIENTO

La modelización bidimensional (2D) permitió evaluar con mayor detalle la variabilidad espacial de la sobreelevación, tanto para las condiciones esperables de caudal y nivel en la desembocadura del río Gualeguaychú en el río Uruguay (Condición Base) como en dos condiciones extremas correspondientes a una tormenta de 500 años de recurrencia con una distribución espacial y temporal muy desfavorable (Sensibilidad A), y a una tormenta igual pero sumando un posible incremento de precipitación conservativo debido al Cambio Climático y una condición de crecida del río Uruguay combinado con una Sudestada (como ocurrió en el año 1959). Es decir, se evaluaron también escenarios naturales que pueden conceptualizarse como “catastróficos”, para analizar el efecto del emprendimiento Amarras del Gualeguaychú en tales situaciones.

Como conclusión general, se puede observar que la sobreelevación máxima obtenida en la zona de margen derecha del río y particularmente en la zona urbana de la ciudad de Gualeguaychú, es del mismo orden de magnitud que la obtenida mediante la modelización unidimensional (1D). En efecto los valores de sobreelevación resultantes utilizando hipótesis que se consideran razonablemente conservativas en el modelo 2D, son iguales a 4 cm para una condición de 20 años de recurrencia (en contraste con 3 cm obtenidos con el modelo 1D), 5 cm para 100 años (6 cm con el modelo 1D), y entre 6 y 7 cm para 500 años (9 cm con el modelo 1D). El rango de incertidumbre probable de estas evaluaciones se estima que es del orden de un centímetro.

En cambio, para las condiciones de 100 y 500 años de recurrencia se obtienen sobreelevaciones mayores en la zona del emprendimiento Amarras, en el orden de 12 a 14 cm. Asimismo, se puede apreciar en las figuras presentadas, que en la zona de margen izquierda ubicada inmediatamente aguas arriba de Amarras, se producen en general sobreelevaciones superiores a los 20 cm, las cuales se desarrollan en un área de características rurales.

En el resto del área aguas abajo y al Este de Amarras, se producen reducciones del nivel de agua, de algunos centímetros de magnitud.

Por otro lado, mediante el modelo unidimensional se había estimado que el terraplén de la Ruta Prov. 42 genera una significativa sobreelevación. La modelización bidimensional permitió evaluar con mayor detalle esta situación, encontrándose que la sobreelevación es mayor para una condición de crecida moderada como la de 20 años de recurrencia, que para una crecida extraordinaria que presenta una cota del nivel de agua mucho mayor que la cota de la calzada. La sobreelevación del lado de aguas arriba de la ruta con respecto al nivel de aguas abajo obtenida para recurrencias de 20 a 100 años es del orden de unos 8 a 10 centímetros. En el caso de las crecidas de 500 años de recurrencia, la sobreelevación obtenida es menor a 5 centímetros. La obstrucción al flujo que este terraplén produce, tiende a agravar las inundaciones en la zona baja de Gualeguaychú correspondiente a la península ubicada más al Norte, la cual sufre anegamientos para crecientes de recurrencia menor a 2 años, al igual que en los terrenos anegables adyacentes a la Ruta 42 ubicados del lado de Pueblo Belgrano, que también son muy bajos.

Se concluye que resultaría recomendable que las autoridades competentes evaluaran la posibilidad de ampliar la transparencia de estas obstrucciones al flujo, analizando el efecto hidráulico que tendría la construcción de puentes aliviadores, particularmente del tramo de la Ruta 42 en adyacencias del Parque Unzué, para mitigar los efectos de las inundaciones en las zonas urbanas cercanas.

Por otro lado, la modelización permitió evaluar el incremento de velocidades que se produce debido a la interposición de Amarras en el flujo sobre la planicie. El máximo incremento sucede inmediatamente aguas arriba y en el entorno de los dos extremos más cercanos al río de los rellenos de Amarras, y especialmente en el ubicado más al Norte.

Las magnitudes del incremento no son muy elevadas, del orden de 10 cm/s para recurrencia 20 años, 20 cm/s para 100 años y algo superiores a 30 cm/s para 500 años. Los valores absolutos de velocidad de la corriente varían, por ejemplo de 0,3/0,4 m/s a 0,5/0,6 m/s para 100 años de recurrencia, y de 0,6 a 0,9 m/s para 50 años. Se considera recomendable evaluar la realización de protecciones de márgenes en estos sectores.

Las velocidades en la península ubicada en la margen derecha frente a Amarras son naturalmente del orden de hasta unos 0,5 m/s, valores algo elevados para una zona que alberga algunas construcciones, dado que el flujo del río desbordado "corta camino" en ese sector de terrenos bajos anegables. El incremento de velocidades que se produce en este sector debido a la presencia de Amarras es del orden de unos 5 a 7 cm/s según la recurrencia de la crecida.

Fuera de estos sectores, se verifican algunos incrementos puntuales de velocidad hacia aguas abajo de la localización de Amarras que son muy bajos, del orden de 1 a 3 cm/seg, abarcando hasta la zona de la Isla frente a Plaza Colón.