



INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS
SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS
REPÚBLICA ARGENTINA



MODELACIÓN DEL IMPACTO DE UN RELLENO COSTERO SOBRE LA DINÁMICA DEL RÍO DE LA PLATA

Informe de Avance N° 3



*Proyecto LHA 300
Informe LHA 04-300-09
Ezeiza, Abril de 2009*

Laboratorio de Hidráulica

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Dr. Raúl A. LOPARDO

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Ing. Jorge A. MAZA

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Ing. Julio C. DE LÍO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

EQUIPO DE TRABAJO

Sr. Emilio LECERTÚA

Ing. Pablo GARCÍA

Ing. Mariano RE

INFORME PRODUCIDO POR

Ing. Mariano RE

Dr. Ángel MENENDEZ

MODELACIÓN DEL IMPACTO DE UN RELLENO COSTERO SOBRE LA DINÁMICA DEL RÍO DE LA PLATA

Informe de Avance N° 3

RESUMEN

Se valida el modelo hidrodinámico tridimensional de alta resolución con datos de una campaña de mediciones efectuada ad-hoc en la zona de estudio. Se muestra que la modelación bidimensional puede representar, en forma conservadora, el alcance de los impactos. Se establecen las zonas de impacto en función de cuatro indicadores que cuantifican los efectos sobre la velocidad de la corriente, la distribución de sobretemperatura y la tasa de sedimentación. Se obtienen conclusiones sobre el grado de impacto para cuatro escenarios de obras.

Descriptores temáticos: Modelación Hidrodinámica, Relleno Costero, Pluma Térmica, Sedimentación.

Descriptores geográficos: Río de la Plata, Buenos Aires, Costanera Sur, Boca del Riachuelo.

ÍNDICE

INFORME DE AVANCE N° 3	1
1 INTRODUCCIÓN	2
2 VALIDACIÓN DEL MODELO DE ALTA RESOLUCIÓN	3
2.1 CAMPAÑA DE MEDICIONES	3
2.1.1 Descripción	3
2.1.2 Presentación y análisis de resultados	4
2.2 VALIDACION	7
2.3 TRIDIMENSIONALIDAD	12
3 APLICACIÓN	15
3.1 ESCENARIOS	15
3.2 INDICADORES	18
3.3 RESULTADOS	19
3.3.1 Velocidades	19
3.3.2 Temperaturas	29
3.3.3 Sedimentación	29
4 CONCLUSIONES	44

1 INTRODUCCIÓN

Las actividades de construcción, y en particular las asociadas a los grandes proyectos (como el del aliviador del Arroyo Maldonado), plantean el problema de disponer de un volumen muy significativo de tierra y escombros dentro del perímetro de la ciudad de Buenos Aires. El Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires ha proyectado la construcción de rellenos en el Río de la Plata, en la zona adyacente a la Isla Demarchi, para disponer de ese material. Estos rellenos producirán impactos sobre otros usos del río.

El objetivo de este estudio es producir una evaluación del impacto hidráulico que los rellenos habrán de generar en su entorno.

En el Primer Informe de Avance se describió la implementación del modelo y se presentaron y discutieron los resultados obtenidos con su aplicación al relleno definido para dar cabida a los suelos provenientes de la obra del Arroyo Maldonado. En particular, se introdujeron los indicadores a utilizar para la evaluación del impacto hidráulico de la obra, y se obtuvieron conclusiones acerca de la extensión de la zona de impacto y el tipo de impacto sobre la velocidad de la corriente, la distribución de sobretensión causada por la descarga de la Central Costanera y la tasa de sedimentación.

En este Tercer Informe de Avance se lleva a cabo la validación del modelo tridimensional, en base a mediciones obtenidas en una campaña de observaciones llevada a cabo en el marco de este proyecto, se establecen sus alcances, y se determinan las zonas de impacto para una variedad de escenarios de relleno.

2 VALIDACIÓN DEL MODELO DE ALTA RESOLUCIÓN

2.1 CAMPAÑA DE MEDICIONES

2.1.1 Descripción

El 21 de enero de 2009 se realizó un muestreo de parámetros físico-químicos en el entorno de influencia del relleno previsto. La campaña estuvo a cargo de *Agrim. Javier H. Bofill - Servicios Topográficos e Hidrográficos*, a bordo del barco “Mara” y con cuatro operadores, dos por la empresa (Dr. Guillermo O. Lizasoain, Tec. Hidr. Ricardo A. García) y dos por el presente equipo de trabajo (Ing. Pablo E. García y Emilio A. Lecertúa). El instrumental utilizado fue el que se detalla:

- Sonda Multiparamétrica marca Horiba, modelo w22.
- Correntómetro marca OTT, modelo C10, paso de hélice 50 cm.
- Ecosonda marca Odom, modelo Hydrotrac, transductor de 200 kHz.
- Receptor GPS marca Trimble, modelo XRS pro, con recepción de corrección diferencial emitida por radiofaro.

Se obtuvieron datos en once puntos, midiéndose los siguientes parámetros: pH, Conductividad, Turbidez, Oxígeno Disuelto, Temperatura, Salinidad, y Velocidad y Dirección de la Corriente. Los puntos de observación se muestran en la Figura 2.1.1. En cada uno de ellos se obtuvieron datos de las posiciones verticales correspondientes al 20, 60 y 80% de la profundidad existente. Además, para cada punto se contó con la información de altura de marea del hidrómetro Dársena Sud (muelle de Balizamiento). En la Figura 2.1.2 se muestran fotografías de algunos de los momentos de la campaña.

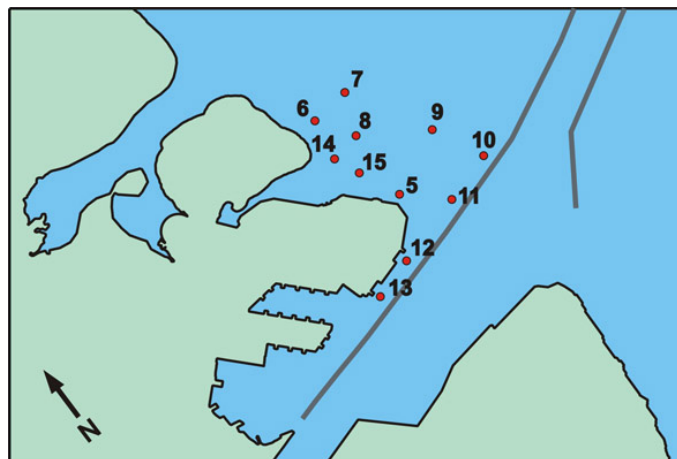


Figura 2.1.1. Estaciones de medición de la campaña



Figura 2.1.2. Campaña de medición (21 de enero de 2009)

2.1.2 Presentación y análisis de resultados

En la Tabla 2.1.1, se presentan, para cada estación de muestreo, el tirante de agua, la altura de marea informada y los tiempos de muestreo. En la Tabla 2.1.2 se detallan los resultados de las mediciones.

A partir la representación de las temperaturas y velocidades en cada estación de observación (Figuras 2.1.3 y 2.1.4) se puede realizar una interpretación de los resultados de la campaña de medición. El tirante de agua de las estaciones de observación oscila entre 1,6 m y 2,6 m, salvo en tres de ellas, que presentan valores mucho mayores, asociados a las profundidades del Canal de Acceso Sur.

Tabla 2.1.1. Datos generales de la medición en cada estación.

Estación	Tirante [m]	Altura Marea [m]	Hora Inicio	Hora Fin
5	1.6	0.39	11:00:00	11:10:00
6	2.0	0.36	11:25:00	11:35:00
14	2.6	0.29	12:00:00	12:10:00
7	2.4	0.27	12:35:00	12:40:00
8	2.3	0.31	13:25:00	13:30:00
9	2.2	0.38	13:45:00	13:50:00
10	7.0	0.41	14:00:00	14:10:00
11	2.4	0.41	14:20:00	14:30:00
12	8.4	0.46	14:40:00	14:50:00
13	8.9	0.51	15:05:00	15:10:00
15	1.2	0.54	15:25:00	15:30:00

Tabla 2.1.2. Resultados de las mediciones

Estación	Profundidad [m]	PH	Conductividad [mS/cm]	Turbidez [NTU]	DO [mg/l]	Temperatura [°C]	Salinidad [%]	Velocidad de Corriente [m/s]	Dirección de Corriente
5	0.30	7.26	0.222	187	6.59	26.5	0.00	0.03	200° (SSO)
5	0.95	7.35	0.228	256	5.45	25.9	0.00	0.07	200° (SSO)
5	1.30	7.47	0.228	270	5.37	25.9	0.00	0.03	200° (SSO)
6	0.40	7.43	0.258	159	5.35	25.7	0.00	0.14	30°(NNE)
6	1.20	7.36	0.248	150	5.36	25.7	0.00	0.13	30°(NNE)
6	1.60	7.39	0.248	152	5.26	25.7	0.00	0.12	30°(NNE)
14	0.52	7.54	0.336	153	7.27	30.8	0.01	0.05	46° (NE)
14	1.56	7.38	0.271	151	6.2	28.1	0.01	0.08	46° (NE)
14	2.10	7.44	0.247	156	5.54	25.7	0.00	0.01	46° (NE)
7	0.48	7.48	0.166	165	6.65	25.5	0.00	0.17	200° (SSO)
7	1.44	7.5	0.166	175	6.72	25.6	0.00	0.18	200° (SSO)
7	1.92	7.55	0.166	168	6.61	25.6	0.00	0.15	200° (SSO)
8	0.46	7.49	0.344	148	7.33	31.5	0.01	0.18	90° (E)
8	1.38	7.55	0.167	164	6.94	26.0	0.00	0.05	90° (E)
8	1.84	7.68	0.166	176	6.89	26.2	0.00	0.03	90° (E)
9	0.44	7.6	0.259	154	6.96	28.8	0.01	0.15	180° (S)
9	1.32	7.55	0.202	175	6.87	26.9	0.00	0.06	180° (S)
9	1.76	7.59	0.172	177	6.67	25.8	0.00	0.08	180° (S)
10	1.40	7.44	0.356	146	3.82	26.2	0.01	0.03	110° (ESE)
10	4.20	7.49	0.212	160	4.97	25.5	0.00	0.04	110° (ESE)
10	5.60	7.58	0.180	176	6.61	25.4	0.00	0.07	110° (ESE)
11	0.48	7.59	0.257	162	5.27	28.0	0.01	0.05	260° (OSO)
11	1.44	7.55	0.280	168	5.44	27.7	0.01	0.03	260° (OSO)
11	1.92	7.55	0.230	166	5.53	26.0	0.00	0.05	260° (OSO)
12	1.68	7.46	0.241	168	5.08	26.1	0.00	0.16	260° (OSO)
12	5.04	7.4	0.451	126	5.02	25.9	0.01	0.03	260° (OSO)
12	6.72	7.63	0.468	117	5.01	25.9	0.01	0.02	260° (OSO)
13	1.78	7.44	0.279	149	5.58	26.2	0.01	0.08	260° (OSO)
13	5.34	7.38	0.413	119	5.64	25.9	0.01	0.03	260° (OSO)
13	7.12	7.41	0.453	115	5.12	25.9	0.01	0.07	260° (OSO)
15	0.24	7.59	0.286	154	5.62	28.3	0.01	0.06	160° (SSE)
15	0.72	7.6	0.268	159	6.1	28.5	0.01	0.09	160° (SSE)
15	0.96	7.58	0.269	147	5.92	28.1	0.01	0.09	160° (SSE)

Respecto de los valores de temperatura, se destaca la existencia de sobretemperaturas de hasta 6 °C (31,5 °C máxima observación, y 25,4 °C mínima). Las estaciones que presentan un gradiente de temperaturas en la vertical, con diferencias mayores a 1°C, son la 8, 9, 11 y 14, advirtiéndose la presencia de las descargas de Central Costanera (se supone que las estaciones 5 y 15, a pesar de estar influenciada por esta descarga, no presentan estratificación debido a la escasa profundidad en esos puntos). Tampoco se observa estratificación en las estaciones asociadas a las profundidades del Canal de Acceso Sur.

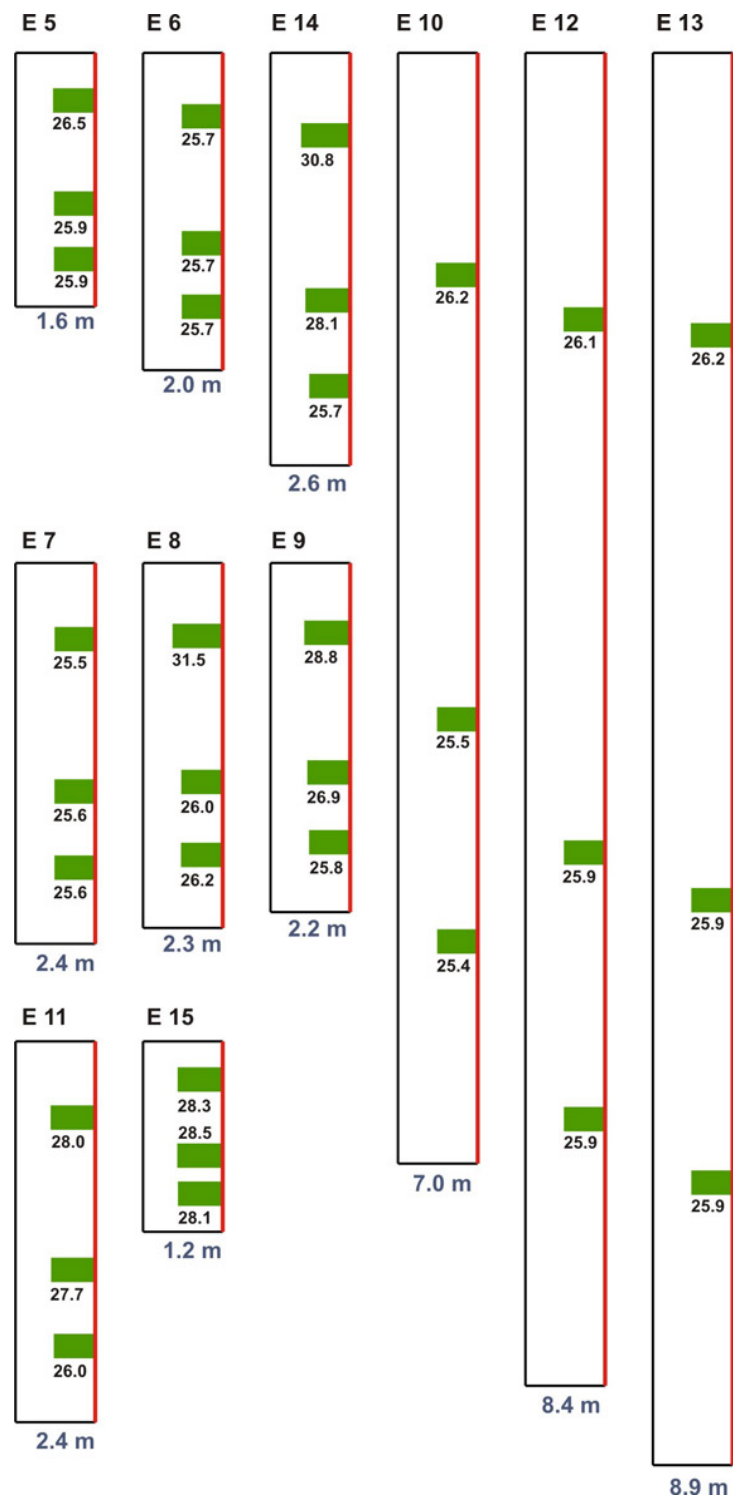


Figura 2.1.3. Temperaturas en la vertical (20, 60 y 80% del tirante de cada estación)

En cuanto a la velocidad observada, se encontraron, en general, valores bajos, de hasta 0,18 m/s. En el caso de las estaciones de tirante de agua menor que 2,6 m, prácticamente no se presentan gradientes de velocidad, salvo en las estaciones 8 y 9, donde se observa que los valores superficiales son de 2 a 3 veces mayores que los más profundos. Entre las estaciones más profundas, la 12 es la única que presenta claramente un gradiente de velocidad.

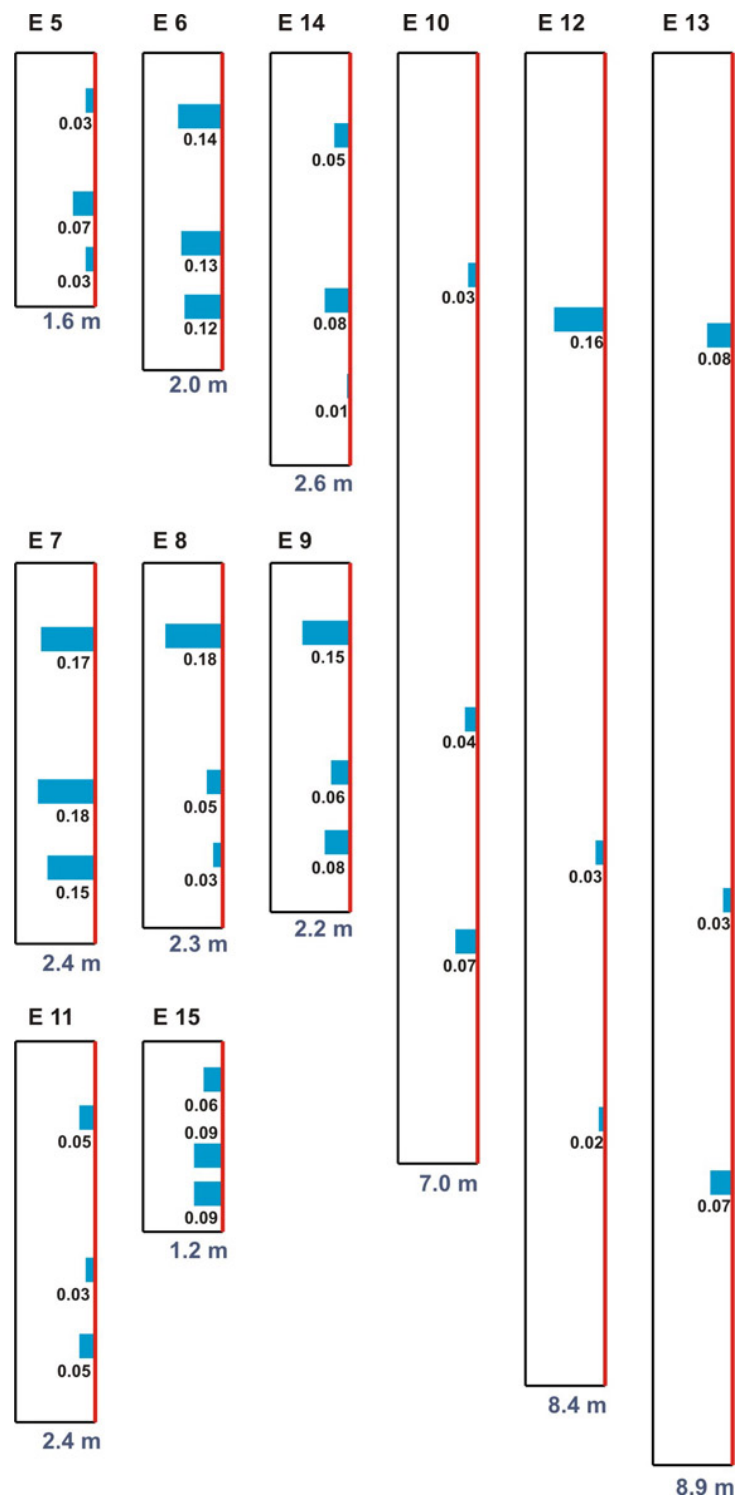


Figura 2.1.4. Velocidades en la vertical (0.2, 0.6 y 0.8 del tirante de cada estación)

2.2 VALIDACION

Los datos de la campaña constituyeron la base para validar el modelo hidrodinámico de alta resolución (Dominio 3). Específicamente, se utilizaron las mediciones de velocidad y temperatura.

Se simuló la ventana de tiempo que abarca los días 20 y 21 de enero de 2009. Los datos de vientos de NCEP/NCAR fueron ajustados para reproducir lo más fielmente posible los niveles horarios registrados en Buenos Aires (datos provistos por el Servicio de Hidrografía Naval – SHN). La Figura 2.2.1 muestra esa comparación. El acuerdo se considera satisfactorio.

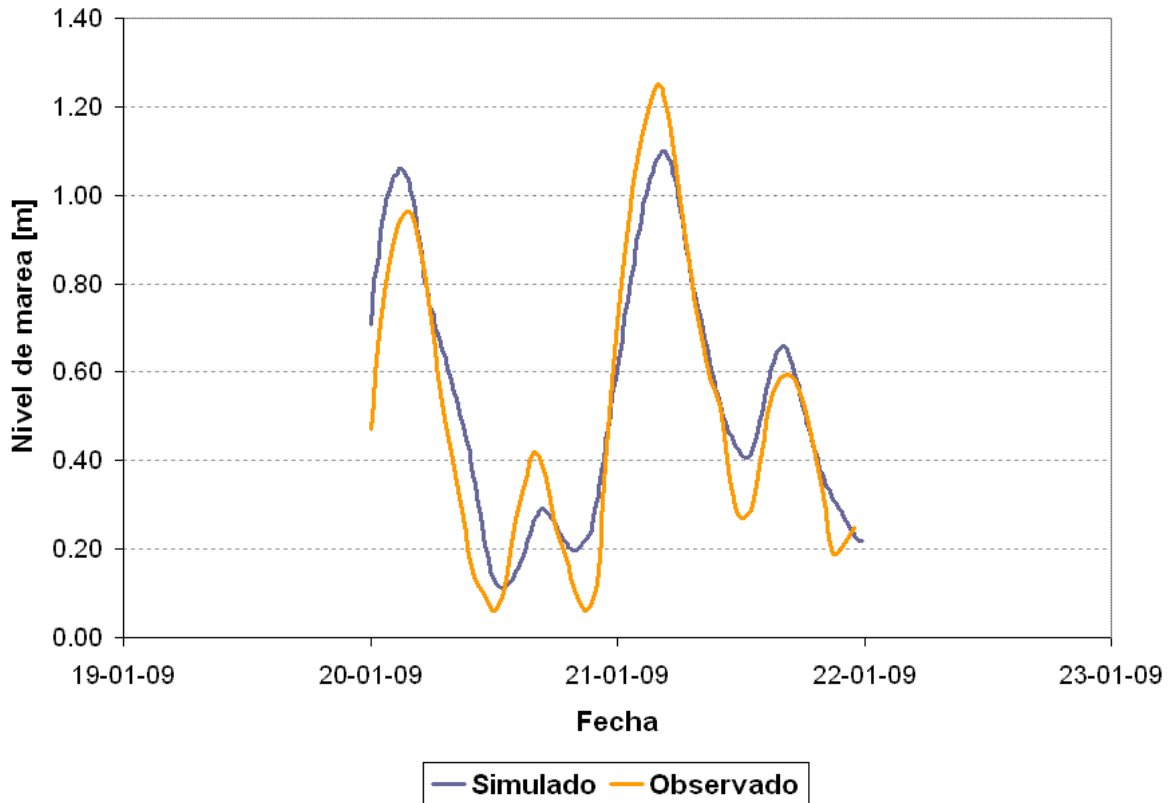
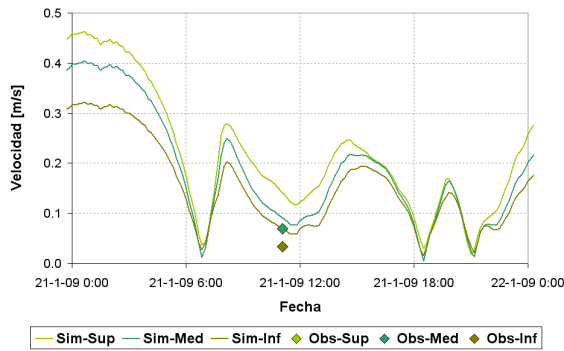
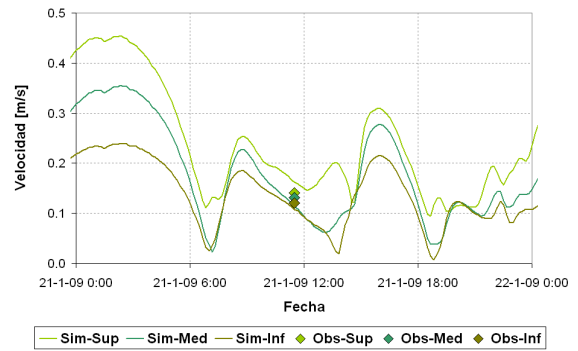


Figura 2.2.1. Comparación de niveles simulados y observados en la ciudad de Buenos Aires

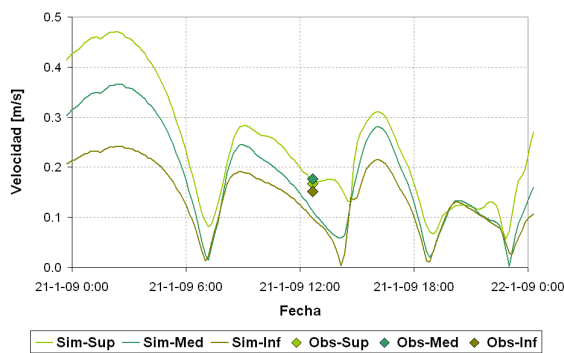
En la Figura 2.2.2 se presentan las series del módulo de la velocidad de corriente, obtenidas con el modelo 3D (identificadas como 'Sim' por simulados), para todas las estaciones de medición, y para las tres profundidades (identificadas como 'Sup' por superior, 'Med' por media y 'Inf' por inferior). Sobre ellas se representan los valores medidos (identificados como 'Obs' por observados). Teniendo en cuenta que se trata de mediciones instantáneas (y no de registros continuos), que el chorro de descarga produce gradientes de velocidad significativos, y que en muchos casos las velocidades de corriente son muy bajas (lo que aumenta el error de medición relativo), el acuerdo general se considera satisfactorio. Resulta particularmente notable la adecuada captación del gradiente vertical de velocidades en la estaciones 8, 9 y 12. También resulta destacable la reproducción del gradiente inverso de velocidades (es decir, velocidades mayores en el fondo que en la superficie) en las estaciones 10 y 11.



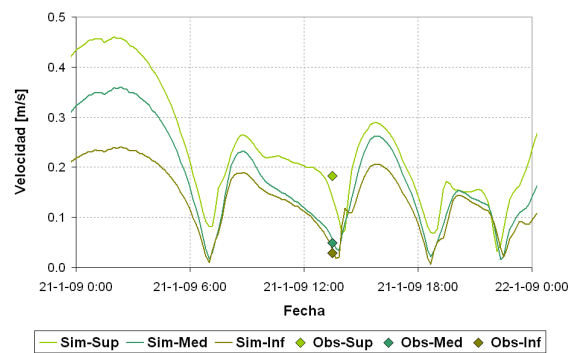
a) Estación 5.



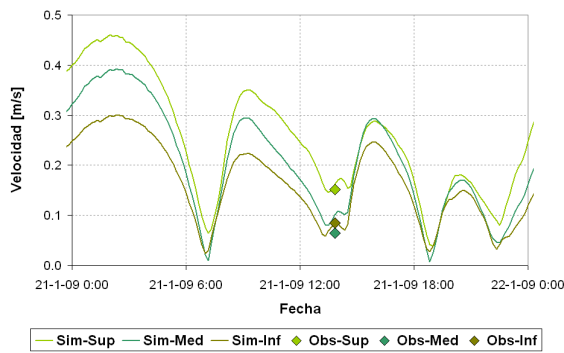
b) Estación 6.



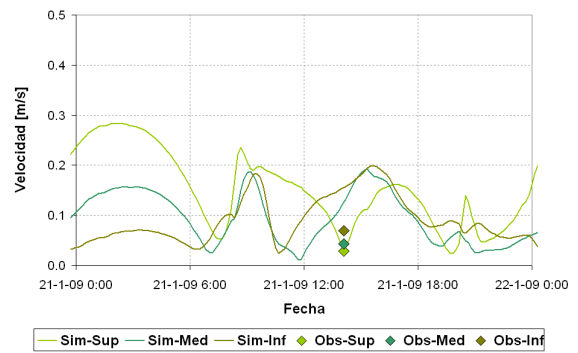
c) Estación 7.



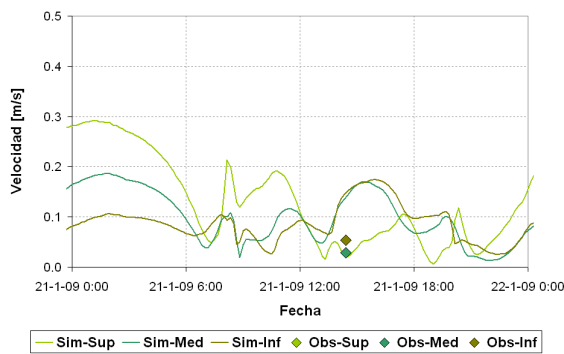
d) Estación 8.



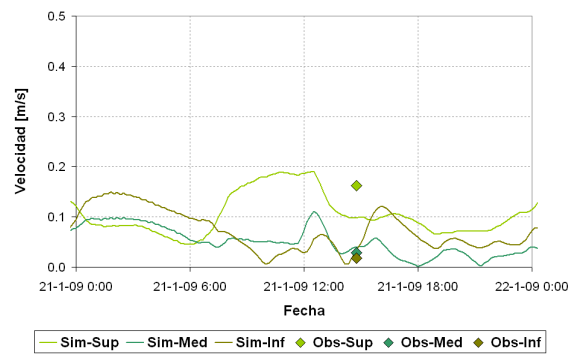
e) Estación 9.



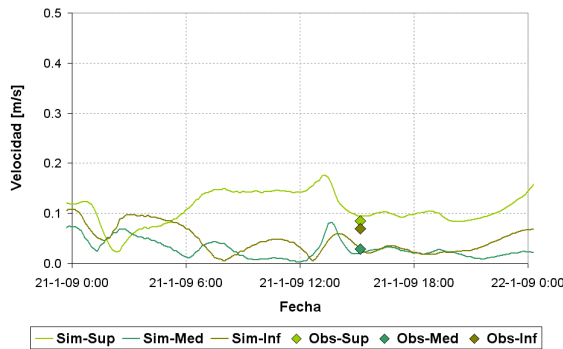
f) Estación 10.



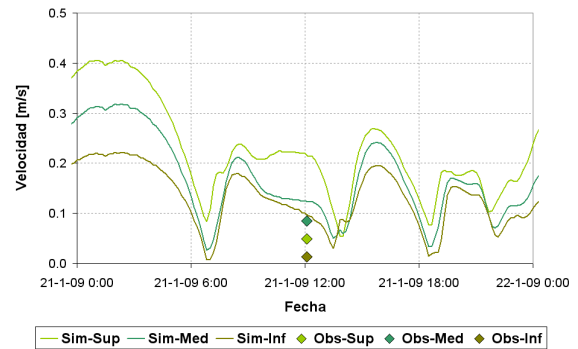
g) Estación 11.



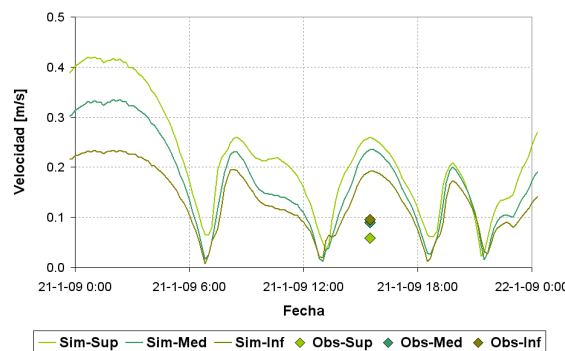
h) Estación 12.



i) Estación 13.



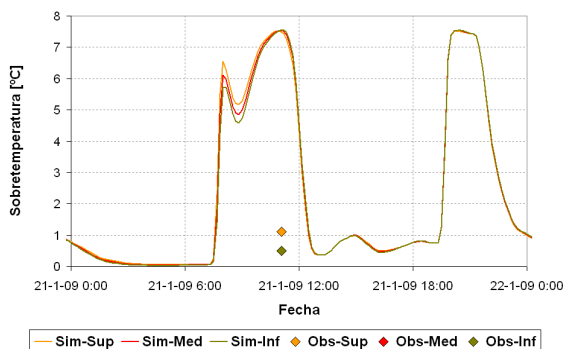
j) Estación 14.



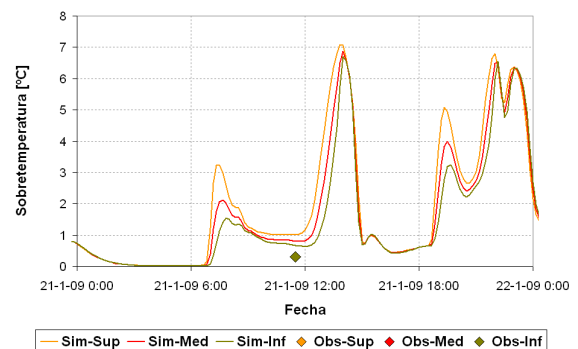
j) Estación 15.

Figura 2.2.2. Comparación de velocidades simuladas y observadas

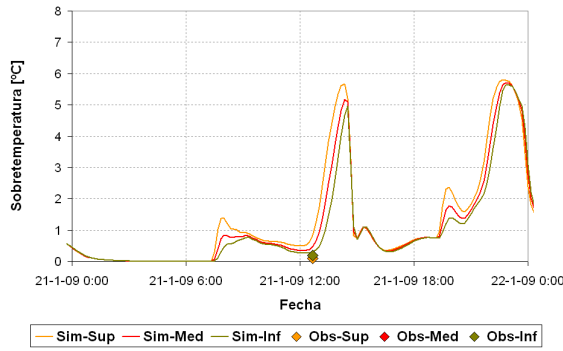
La Figura 2.2.3 muestra las series de sobretemperaturas, obtenidas con el modelo 3D, para todas las estaciones de medición, y para las tres profundidades, junto con los valores medidos. Nuevamente, hay que tener en cuenta que se trata de mediciones instantáneas (y no de registros continuos), que el chorro de descarga produce gradientes de temperatura significativos, y que en muchos casos las sobretemperaturas son muy bajas (lo que aumenta el error de medición relativo), por lo que el acuerdo general se considera razonable. No obstante, se observa que los gradientes verticales medidos (particularmente notables en las estaciones 8, 9 y 14) tienden a ser más significativos que los simulados; posiblemente, esto podría corregirse con una mayor discretización vertical.



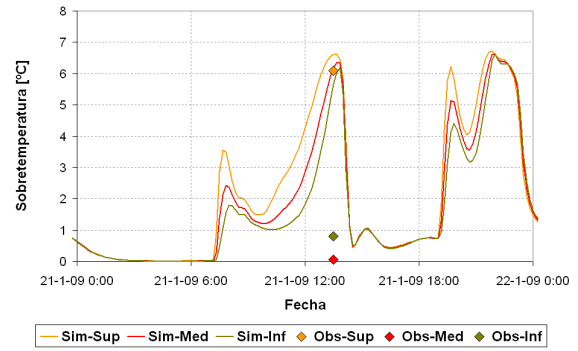
a) Estación 5.



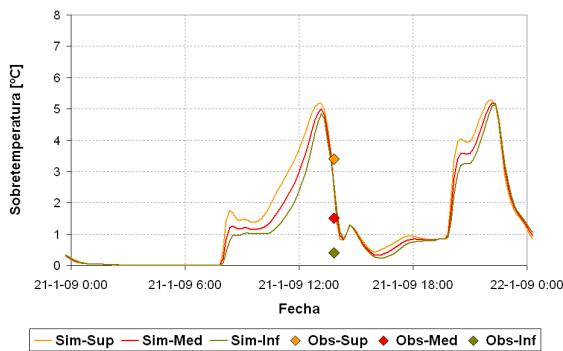
b) Estación 6.



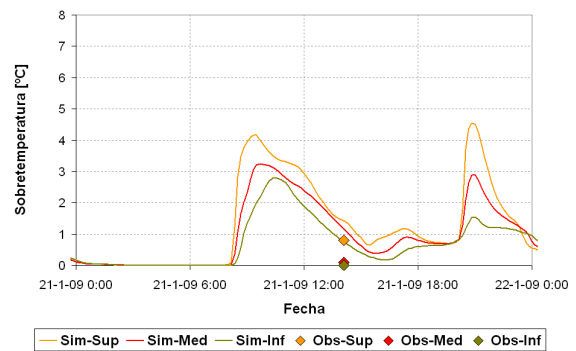
c) Estación 7.



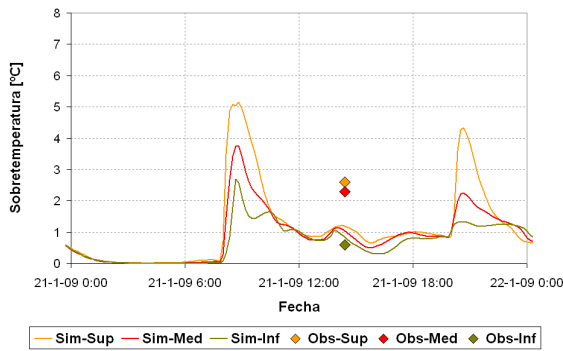
d) Estación 8.



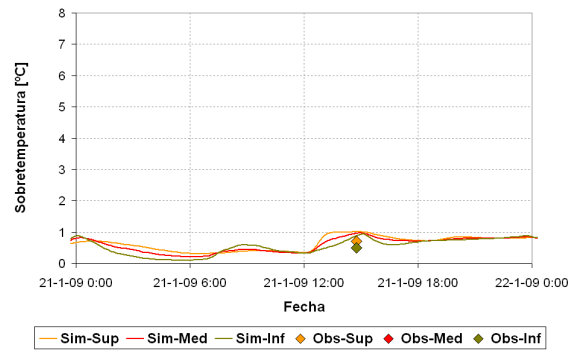
e) Estación 9.



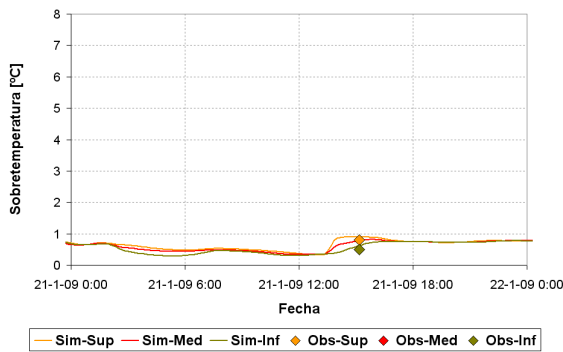
f) Estación 10.



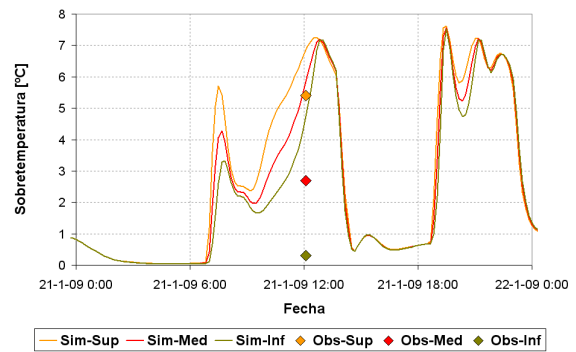
g) Estación 11.



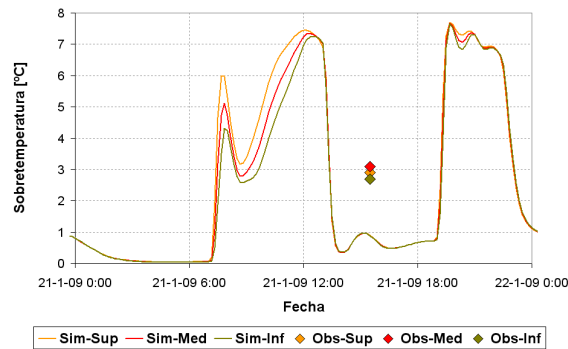
h) Estación 12.



i) Estación 13.



j) Estación 14.



j) Estación 15.

Figura 2.2.3. Comparación de sobrettemperaturas simuladas y observadas

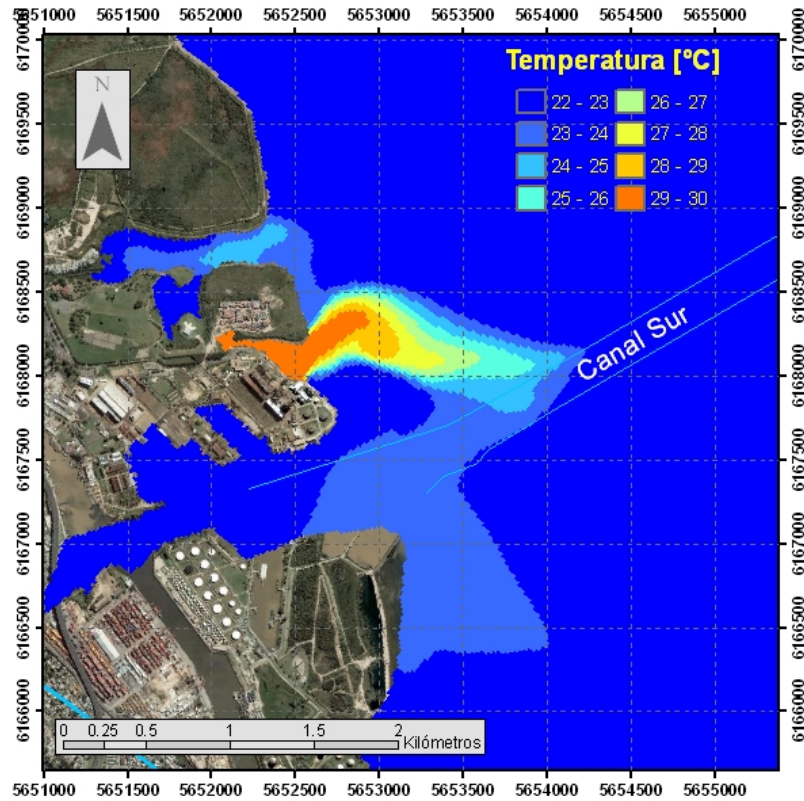
2.3 TRIDIMENSIONALIDAD

Para determinar el grado y extensión de los efectos de estratificación térmica, cuya resolución implica la utilización de un modelo 3D, se efectuó una comparación entre resultados obtenidos con los modelos bi y tridimensional (para el que se utilizaron 5 capas, con una distribución tipo 'n-Sigma').

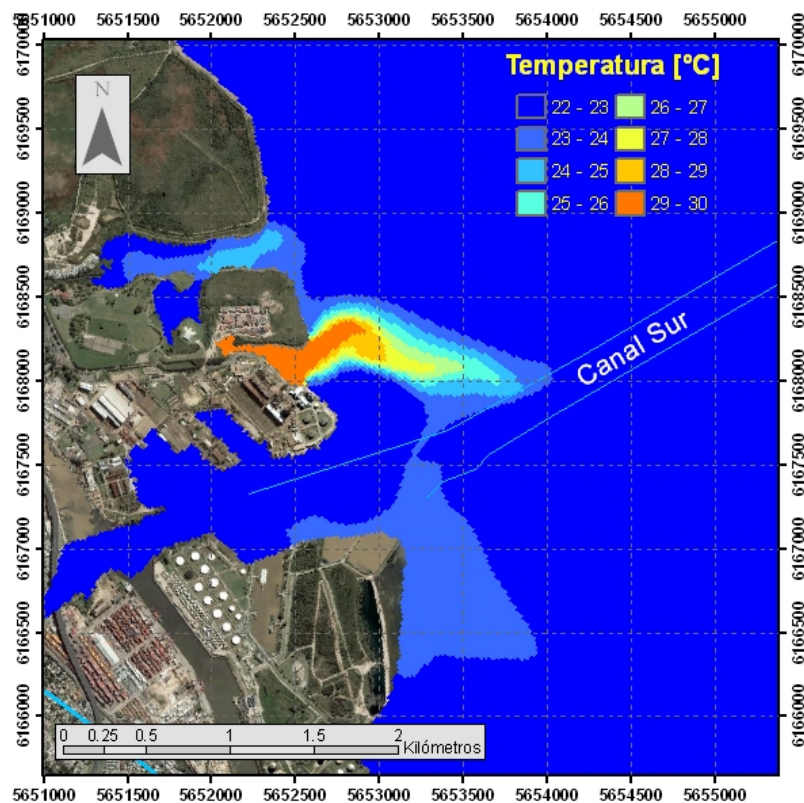
En la Figura 2.3.1 se muestran las plumas térmicas, correspondientes a un instante durante el desarrollo de la bajante, obtenidas con el modelo 3D, para el cual se representan las distribuciones en superficie y en profundidad, y con el modelo 2D. Esta comparación se considera representativa de lo que sucede en otros instantes. Se observa que:

- La estratificación térmica es notable pero no muy intensa, tal cual surge de comparar las distribuciones en superficie y en profundidad obtenidas con el modelo 3D.
- La pluma obtenida con el modelo 2D está más desarrollada longitudinalmente que la correspondiente al modelo 3D.

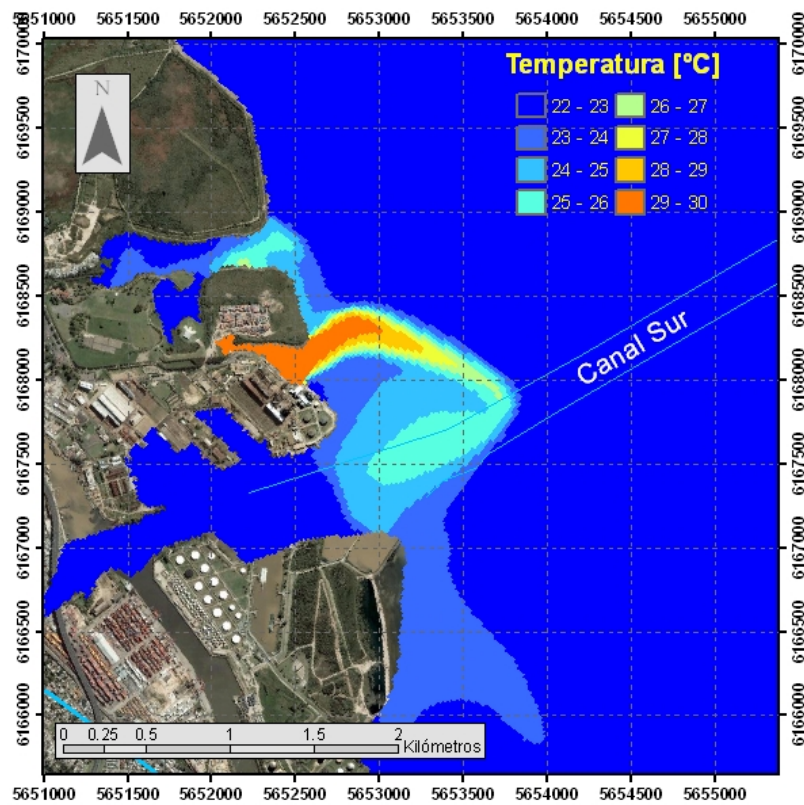
Dado, entonces, que el modelo 2D da una representación conservadora de los efectos térmicos, en el sentido de que sobrestima sus alcances, y que la estratificación térmica es poco significativa, se optó por utilizar el modelo bidimensional para determinar las zonas de impacto, dada su mucha mayor eficiencia computacional.



a) Modelo 3D, capa superficial.



b) Modelo 3D, capa profunda.



c) Modelo 2D.

Figura 2.3.1. Comparación entre plumas calculadas con el modelo 3D y 2D

3 APLICACIÓN

3.1 ESCENARIOS

Se estudiaron 5 escenarios de relleno, a saber:

- a) *Escenario SR*: Se trata del caso de referencia, sin relleno, representativo de las condiciones actuales.
- b) *Escenario CR*: Corresponde a la situación con el relleno de 11 ha, ya analizado en el Primer Informe de Avance (Figura 3.1.1a). Este relleno será el sitio de disposición de tierra y escombros resultantes de la construcción del aliviador del A° Maldonado.
- c) *Escenario IS*: Al relleno costero de 11 ha se le agrega un relleno en isla de 30 ha, a una distancia del orden de 100 m, y conectado al anterior con un puente, junto con un pequeño relleno costero, de 7 ha, en los terrenos de IRSA (Figura 3.1.1b).
- d) *Escenario IE*: Son las mismas condiciones que para el escenario *IS*, con el agregado de que los estribos del puente se montan sobre terraplenes, achicando la luz del puente (Figura 3.1.1c).
- e) *Escenario IC*: Esta es una variante del escenario *IS*, con otro diseño de isla, también de 30 ha, a una distancia del orden de 70 m, y sin relleno en los terrenos de IRSA (Figura 3.1.1d).

En los escenarios *IS* e *IE* se implementó un pequeño canal de acceso a los terrenos de IRSA para barcos de pequeño calado, tal como se observa en la Figura 3.1.2. En el escenario *IC* esta modificación no fue tenida en cuenta.

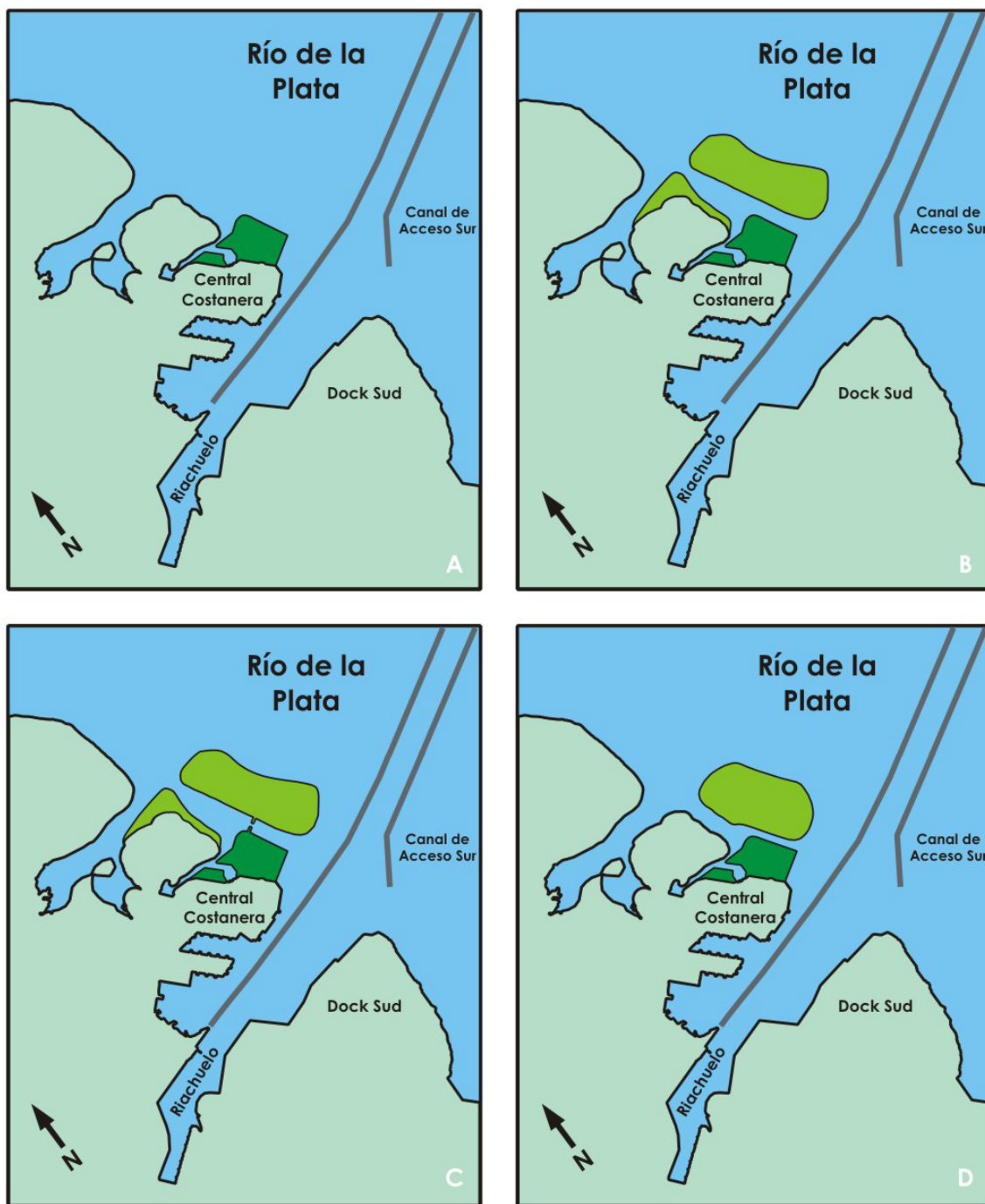
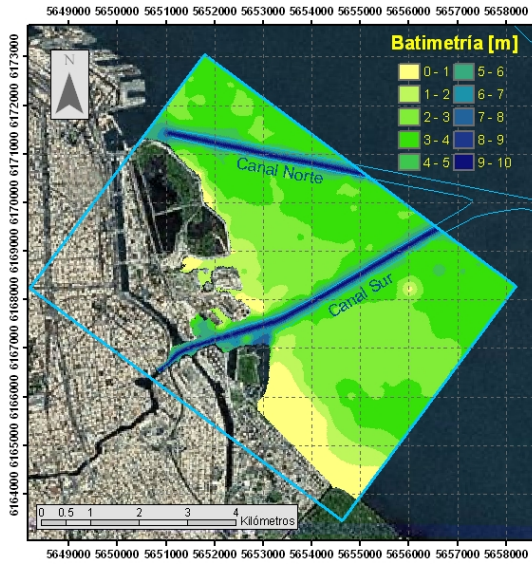
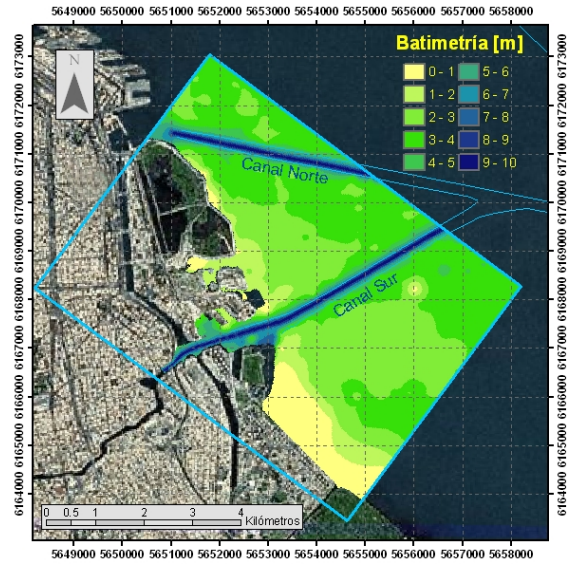


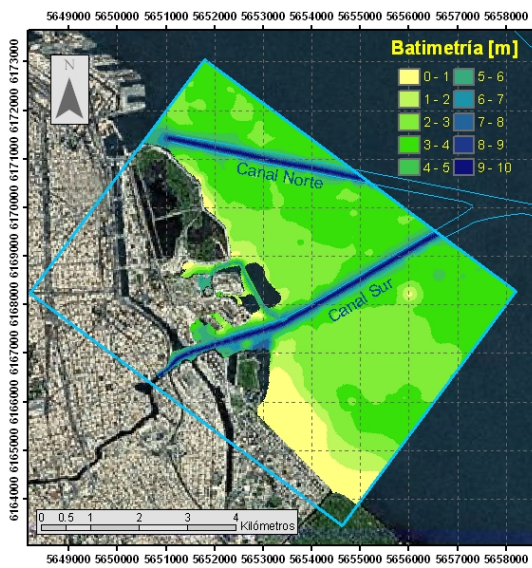
Figura 3.1.1. Escenarios de ensayo: A) Escenario CR, B) Escenario IS, C) Escenario IE, D) Escenario IC.



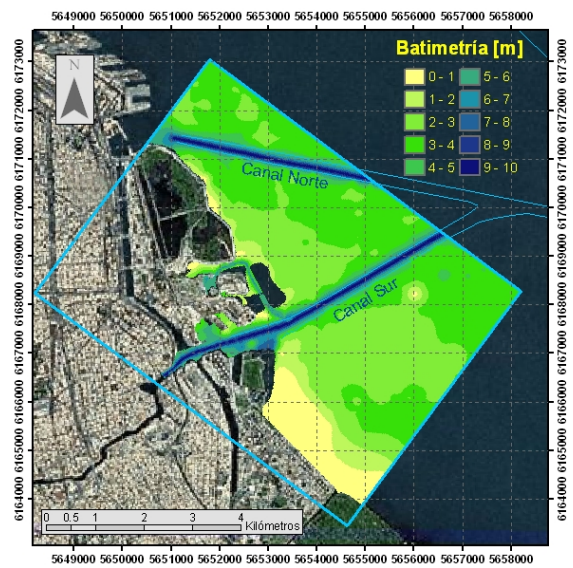
a) Escenario SR



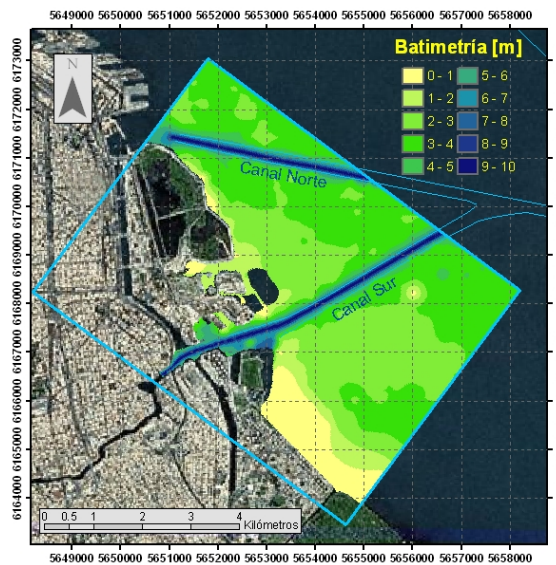
b) Escenario CR



c) Escenario IS



d) Escenario IE



e) Escenario IC

Figura 3.1.2. Batimetrías para los distintos escenarios de ensayo.

3.2 INDICADORES

Tomando como situación de referencia el escenario SR, se construyeron los siguientes indicadores de impacto hidráulico para los 4 escenarios de relleno (estos indicadores son, esencialmente, los utilizados en el Primer Informe de Avance):

- I. Módulo de la diferencia de velocidades para los instantes de máxima velocidad en creciente y máxima velocidad en bajante (que son los instantes de máximo impacto de la presencia del relleno), que es un indicador del cambio tanto de la intensidad como de la dirección de la velocidad. Este indicador es significativo para analizar impactos sobre la navegación.
- II. Diferencia del módulo de las velocidades para los instantes de máxima velocidad en creciente y máxima velocidad en bajante, que es un indicador del cambio de intensidad de la velocidad. Este indicador también es relevante para analizar afectación a la navegación.
- III. Diferencia de temperatura para los instantes de máxima velocidad en creciente y máxima velocidad en bajante, que es un indicador del impacto de la pluma térmica generada por la descarga de la Central Costanera.
- IV. Diferencia entre el valor medio del factor de Krone para un ciclo de mareas, que es un indicador del cambio en la tasa de sedimentación¹. Este indicador es especialmente

¹ Este indicador se considera más apropiado que utilizar el factor de Krone para los instantes de máxima creciente y máxima bajante, como se hizo en el Primer Informe de Avance, ya que tiene en cuenta que la sedimentación es un efecto acumulativo.

significativo para establecer el impacto sobre los dragados de mantenimiento de los canales de acceso a los puertos.

El factor de Krone se calcula como (van Rijn, 1993):

$$T_d = \begin{cases} 1 - \left(\frac{u_*}{u_{*,cr,d}} \right)^2 & \text{si } u_* < u_{*,cr,d} \\ 0 & \text{si } u_* \geq u_{*,cr,d} \end{cases}$$

donde u_* es la velocidad de corte, y $u_{*,cr,d}$ su valor crítico de deposición; un valor de T_d cercano a 0 significa escasa sedimentación, mientras que un valor cercano a 1 indica sedimentación cercana a la máxima tasa potencial. A partir de estudios antecedentes (Menéndez y Castellano, 2000) se ha establecido $u_{*,cr,d} = 1,0$ cm/s. Nótese que $0 \leq T_d \leq 1$. El factor de Krone afecta la tasa máxima potencial de sedimentación, que es el producto de la concentración de sedimento en suspensión y la velocidad de caída correspondiente a su diámetro medio, y constituye la parte de la tasa de sedimentación más directamente afectada por la hidrodinámica (en primera aproximación, puede despreciarse la modulación temporal de la tasa potencial).

3.3 RESULTADOS

En el capítulo anterior se explicó que la determinación de los límites de las zonas de impacto pueden ser establecidos en base al modelo 2D.

El período de simulación se extendió (al igual que lo efectuado en el Primer Informe de Avance), entre el 19/Mar/04 y el 24/Mar/04.

3.3.1 Velocidades

Las Figuras 3.3.1 y 3.3.2 presentan el módulo de la diferencia de velocidades entre los escenarios de relleno y la situación actual (escenario *SR*) para los instantes de máxima velocidad en bajante y máxima velocidad en creciente (indicador 'I'), respectivamente. Si se toma una velocidad de 2 cm/s como el umbral de detección, se obtienen los valores estimados de extensión longitudinal total y extensión lateral (desde la costa actual) de la zona de impacto indicados en la Tabla 3.3.1. Obviamente, el centro de gravedad de la zona de impacto tiene, respecto del centro de gravedad del relleno, un desplazamiento hacia el NO en el caso de creciente, y hacia el SE en el caso de bajante (el desplazamiento total del centro de gravedad de la zona de impacto es de alrededor de 450 m).

Se observa que la construcción de la isla, en cualquiera de sus variantes, en general más que duplica (2,4 a 3,5 veces) tanto la extensión longitudinal como la lateral de la zona de impacto en creciente correspondiente a la situación con sólo el relleno costero (escenario *CR*). En el caso de bajante, hay prácticamente una duplicación de la extensión longitudinal; la extensión lateral se incrementa en alrededor del 50%, salvo para el escenario *IS*, en que disminuye levemente (alrededor del 15%). Por otra parte, la inclusión de los estribos del puente (escenario *IE*) implica, respecto del caso sin estribo (escenario *IS*), un incremento del orden del 15% en la extensión longitudinal de la zona de impacto, mientras que la extensión lateral aumenta alrededor del 30% en creciente, alcanzando aproximadamente el 80% en bajante.

Es importante notar que, para todos los escenarios, se produce un impacto sobre un tramo del Canal Sur, pero en ningún caso sobre el Canal Norte.

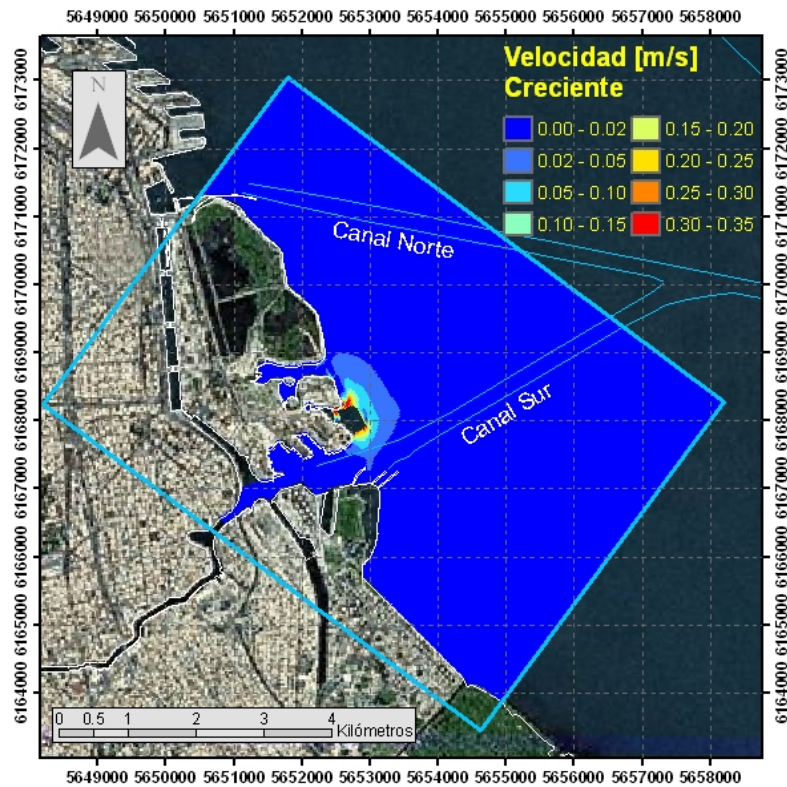
Tabla 3.3.1. Extensión de la zona de impacto.

Escenario	Máxima creciente		Máxima bajante	
	Extensión longitudinal (m)	Extensión lateral (m)	Extensión longitudinal (m)	Extensión lateral (m)
CR	1700	600	2000	700
IS	4000	1600	3700	600
IE	4700	2100	4100	1100
IC	4400	1700	3800	1100

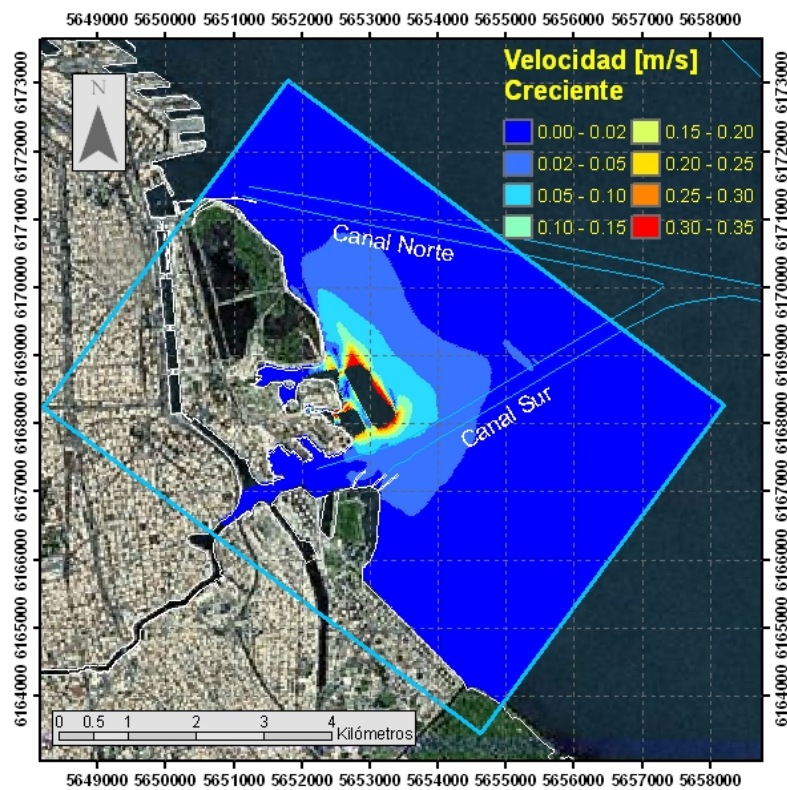
En las Figuras 3.3.3 y 3.3.4 se muestra la diferencia entre los módulos de las velocidades para los mismos escenarios (indicador 'II'). Con este indicador se detectan dos 'orejas' de disminución de velocidad en las direcciones sudeste y noroeste, y una oreja de aumento de velocidad en la dirección noreste. De esta manera se concluye que, en creciente, el impacto sobre el Canal Sur, para todos los escenarios, es una disminución de la intensidad de la corriente; en cambio, en bajante se da un tramo de incremento y uno de disminución. La disminución de la intensidad de la corriente en el Canal Sur puede considerarse un impacto positivo sobre la navegación comercial, ya que la velocidad de la corriente tiende a ser casi normal al eje del canal. Por su parte, el aumento de intensidad de la velocidad de corriente que se da en bajante sólo supera los 5 cm/s para el escenario IC.

En síntesis, de estos dos indicadores surge que prácticamente no se produce impacto negativo (aumento de la velocidad de la corriente) sobre la navegación comercial que transcurre a lo largo de los canales Norte y Sur, salvo por un pequeño tramo del Canal Sur en el caso del escenario IC. Además, existe un impacto positivo (disminución de la velocidad de la corriente) sobre la navegación comercial en un tramo del Canal Sur para todos los escenarios.

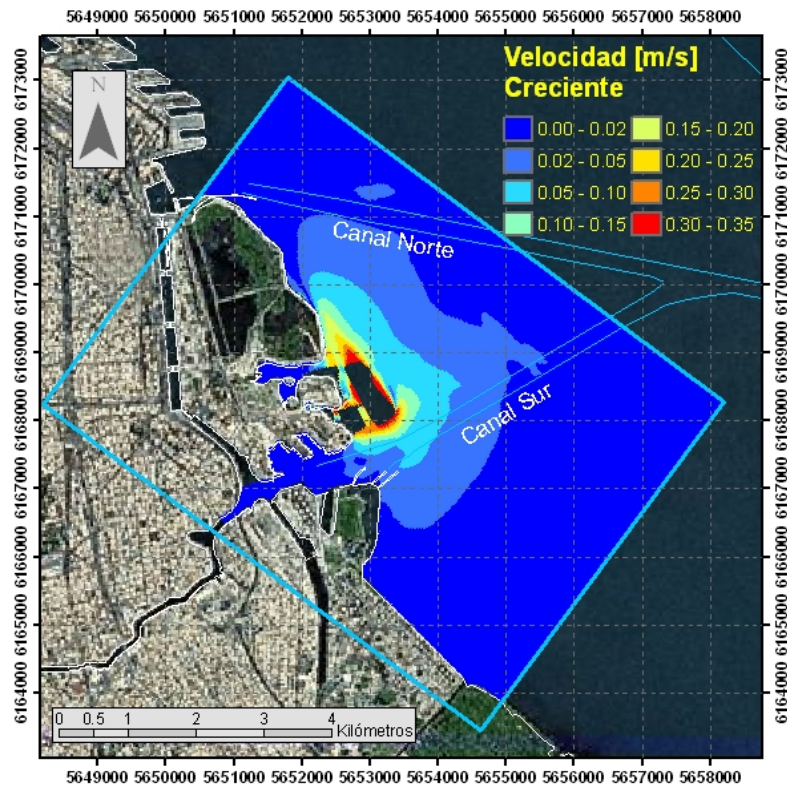
Los rellenos sí afectan (positiva o negativamente) a la navegación deportiva que se desarrolle dentro de las respectivas zonas de impacto indicadas en las figuras.



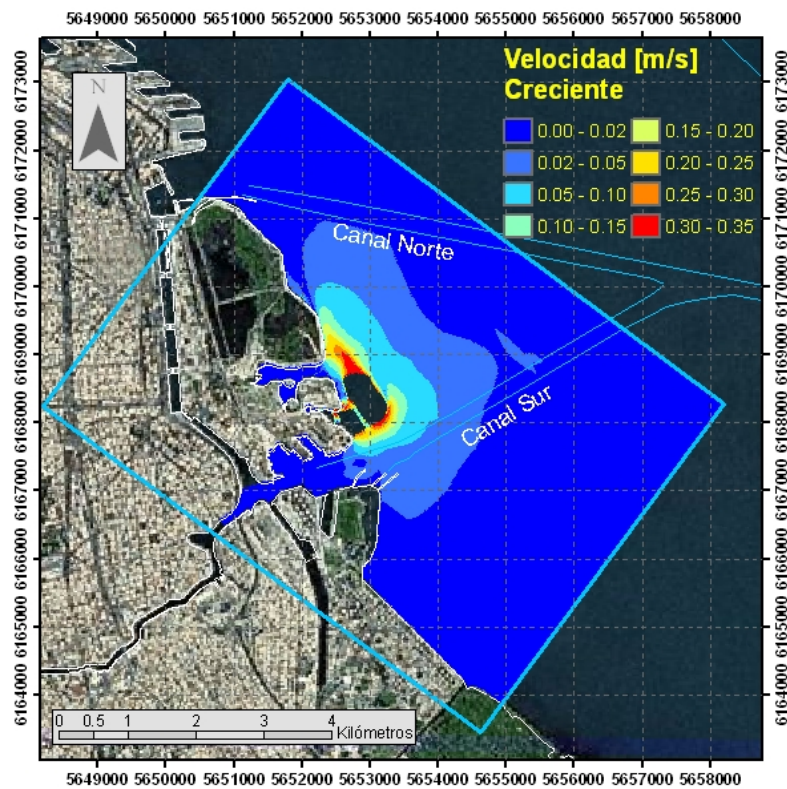
a) Diferencia CR - SR



b) Diferencia IS - SR

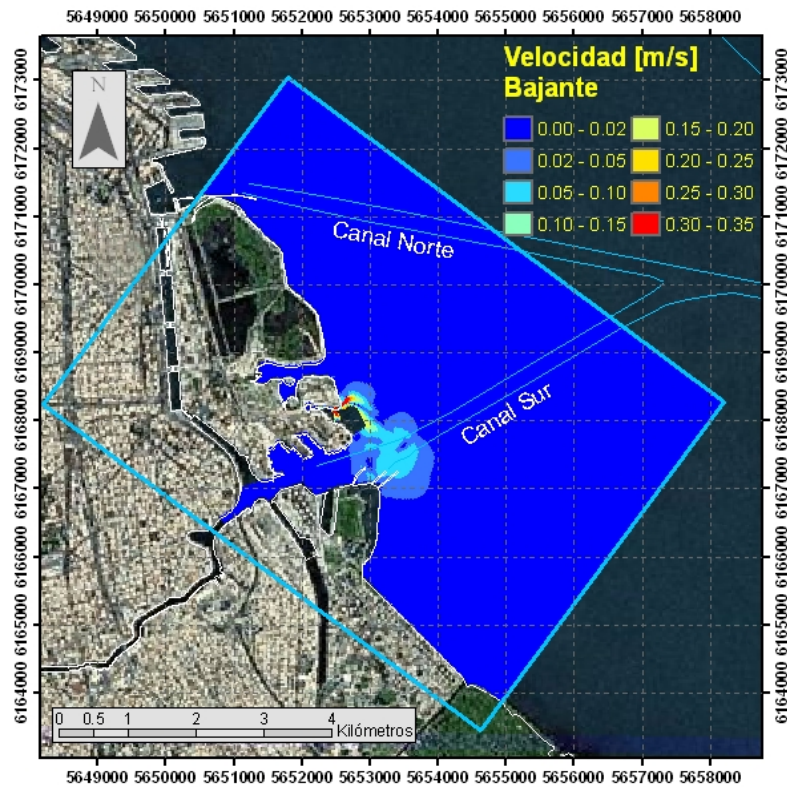


c) Diferencia IE - SR

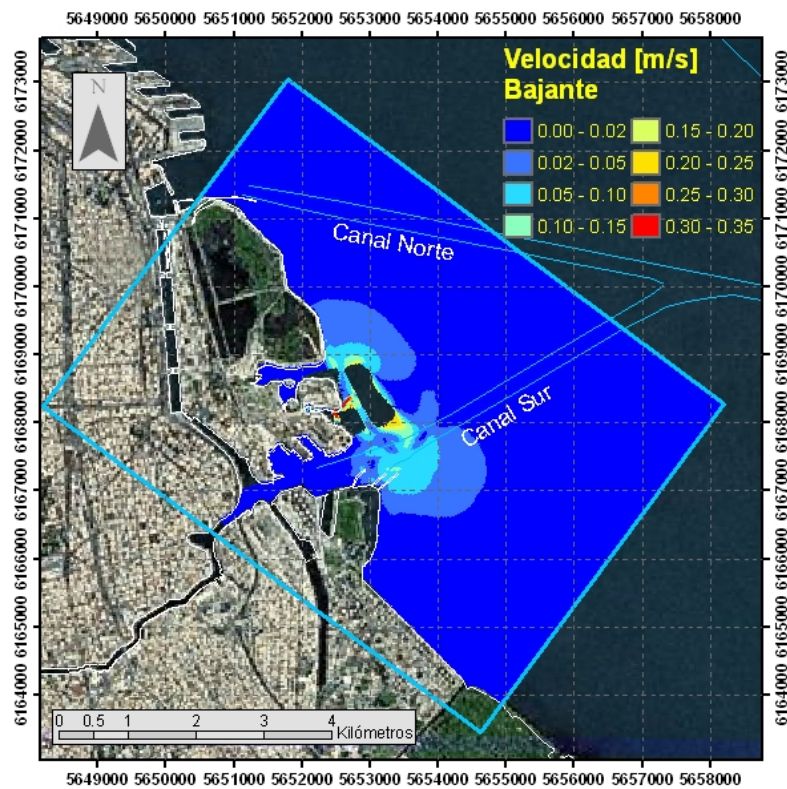


d) Diferencia IC - SR

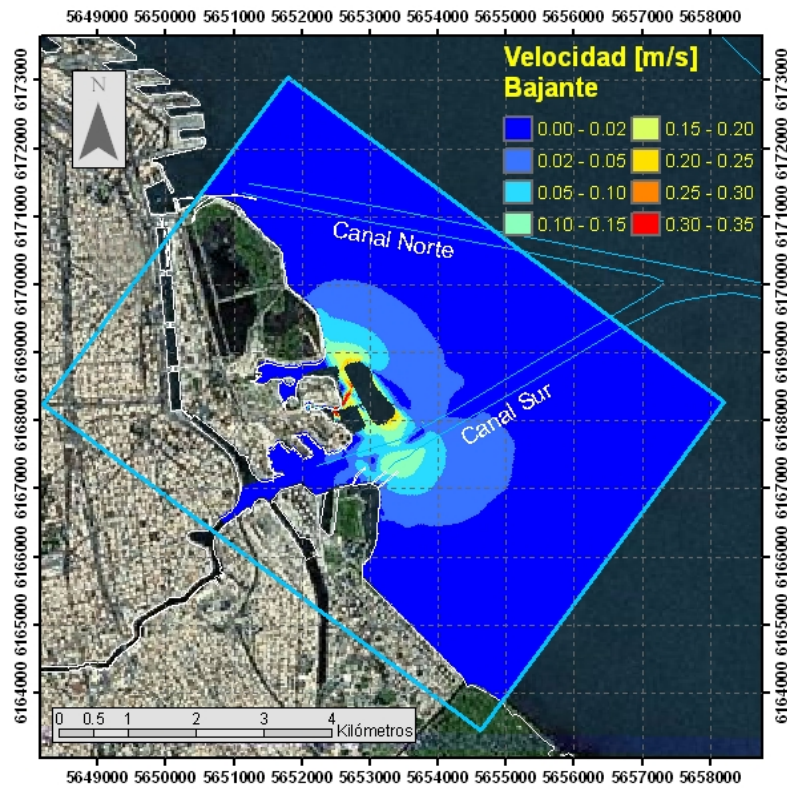
Figura 3.3.1. Módulo de la diferencia de velocidad en máxima velocidad de creciente.



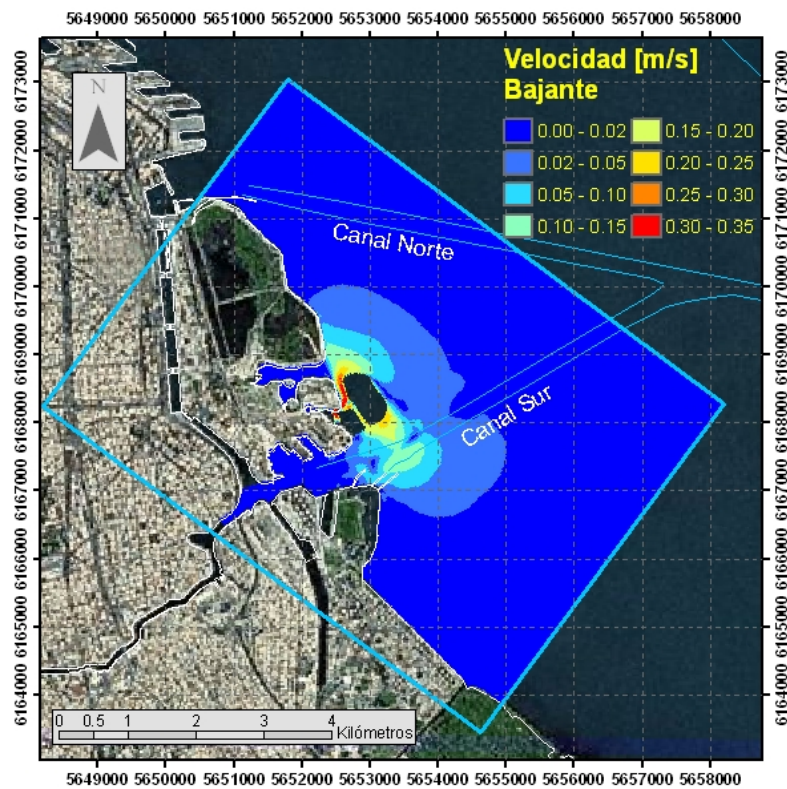
a) Diferencia CR - SR



b) Diferencia IS - SR

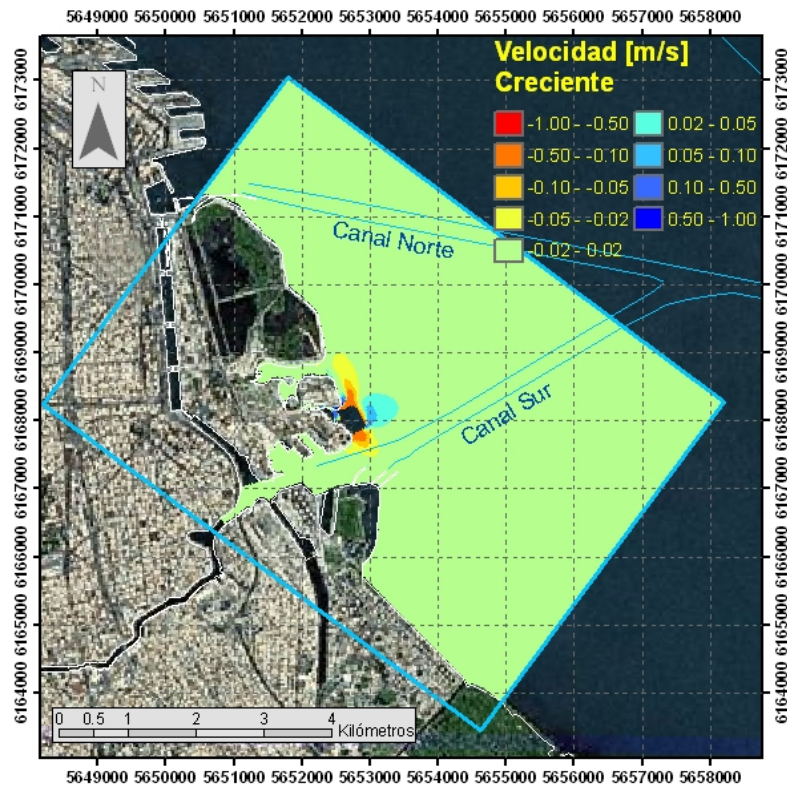


c) Diferencia IE - SR

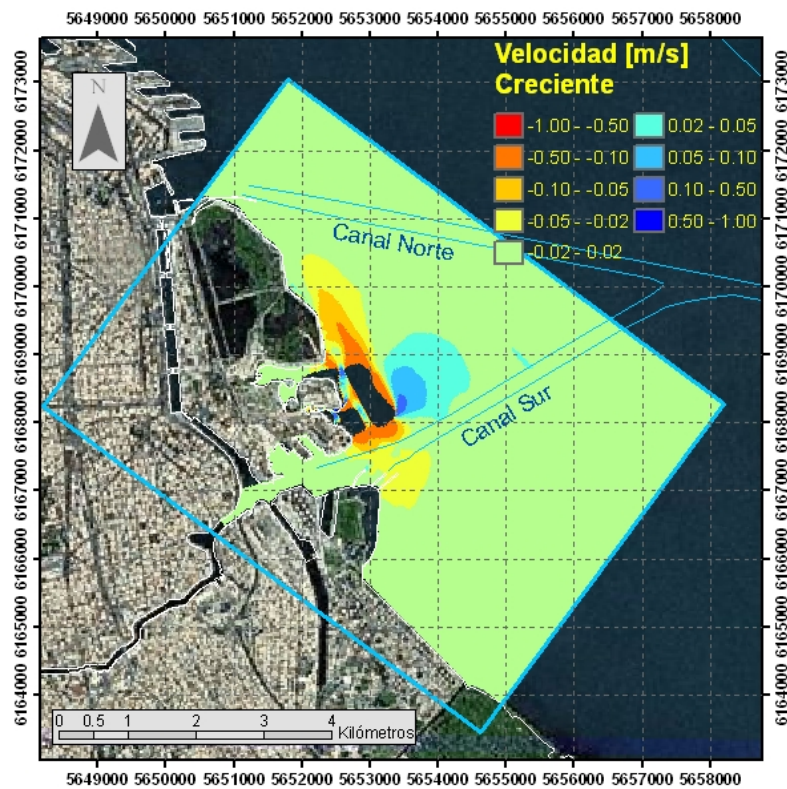


d) Diferencia IC - SR

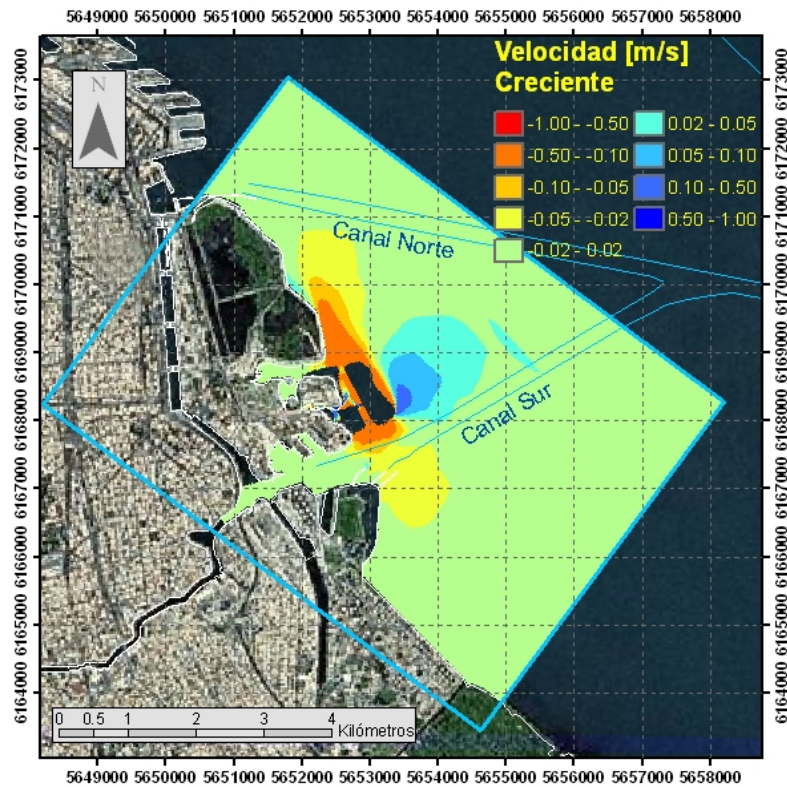
Figura 3.3.2. Módulo de la diferencia de velocidad en máxima velocidad de bajante.



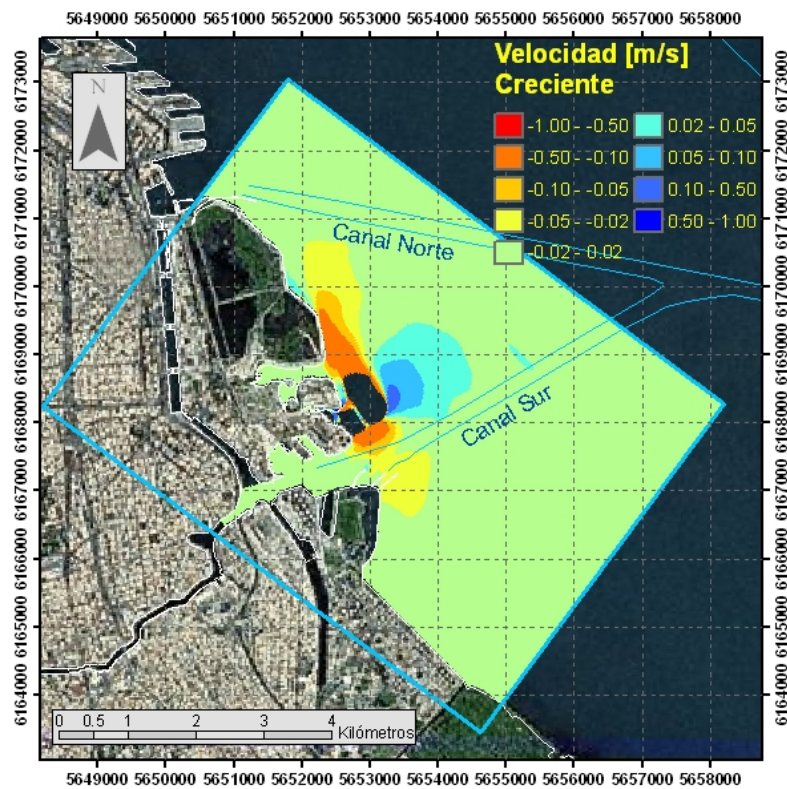
a) Diferencia CR - SR



b) Diferencia IS - SR

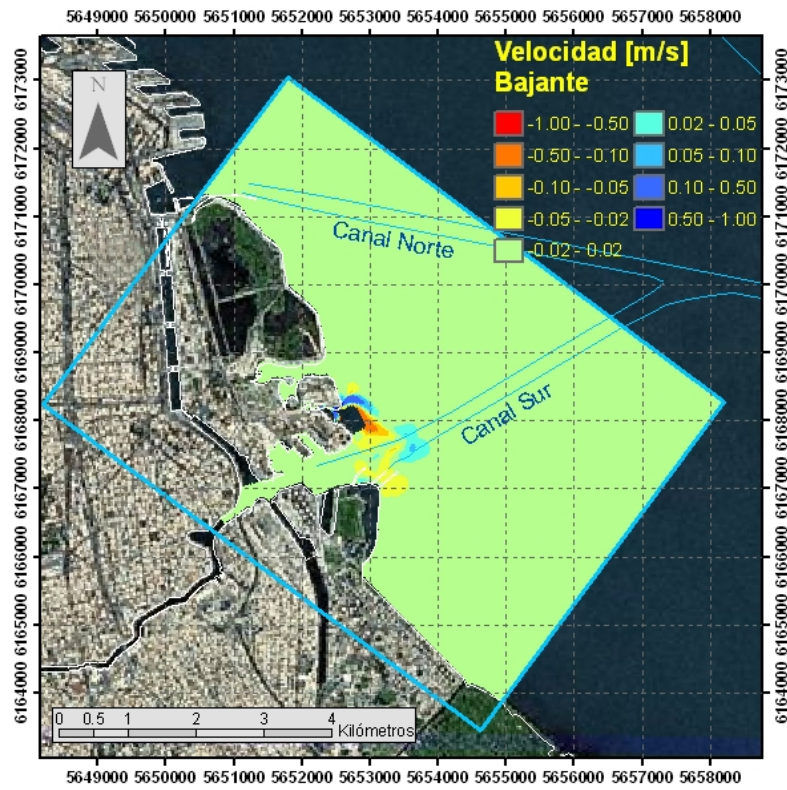


c) Diferencia IE - SR

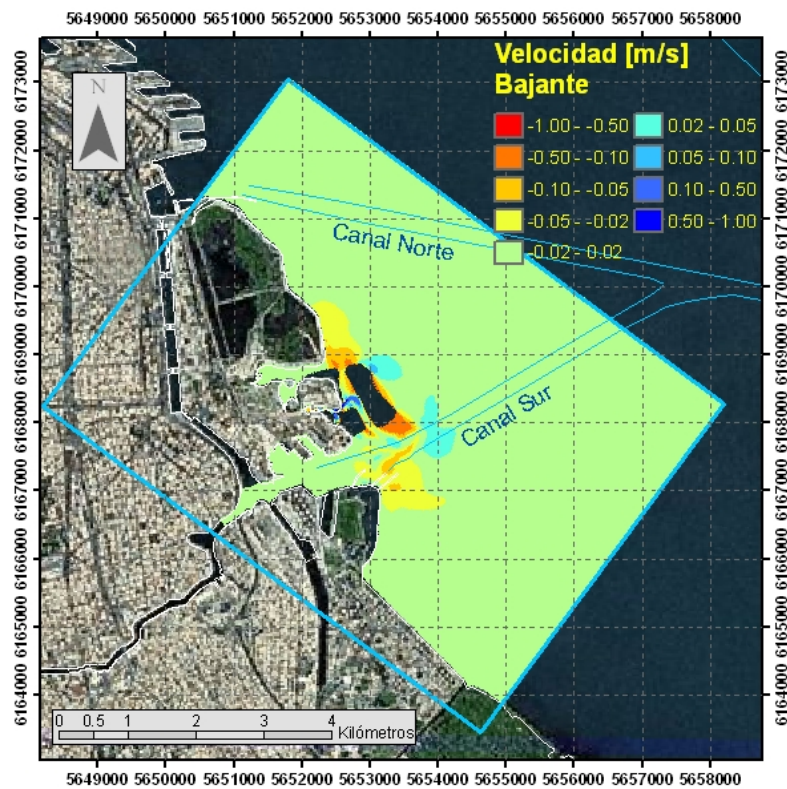


d) Diferencia IC - SR

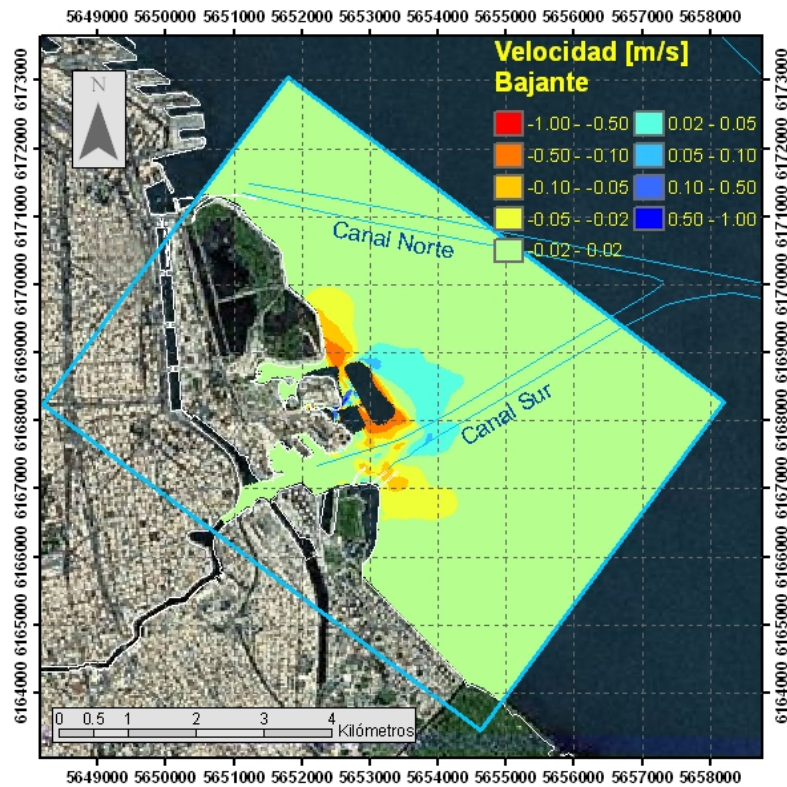
Figura 3.3.4. Diferencia del módulo de la velocidad en máxima velocidad de creciente.



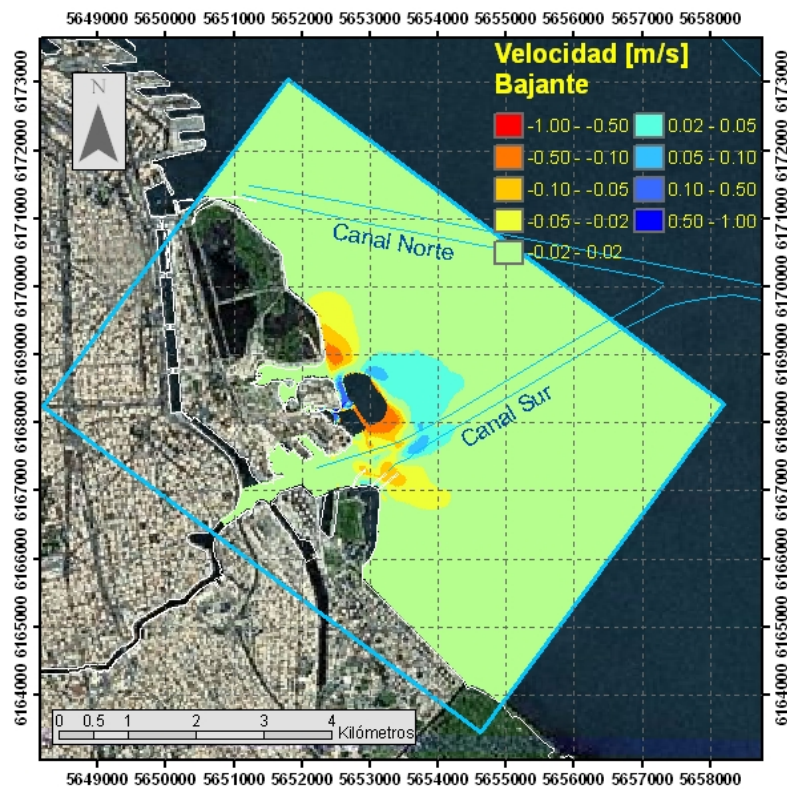
a) Diferencia CR - SR



b) Diferencia IS - SR



c) Diferencia IE - SR



d) Diferencia IC - SR

Figura 3.3.5. Diferencia del módulo de la velocidad en máxima velocidad de bajante.

3.3.2 Temperaturas

La distribución de temperatura para todos los escenarios se muestra en las Figuras 3.3.6 y 3.3.7 (suponiendo una temperatura del agua del Río de la Plata de 22°C). Se observa que la presencia de los rellenos no cambia significativamente la extensión longitudinal de la pluma en ninguno de los dos sentidos, ni en bajante ni en creciente. Lo más notorio es un desplazamiento de la pluma costa afuera, el cual prácticamente no supera los 300 m.

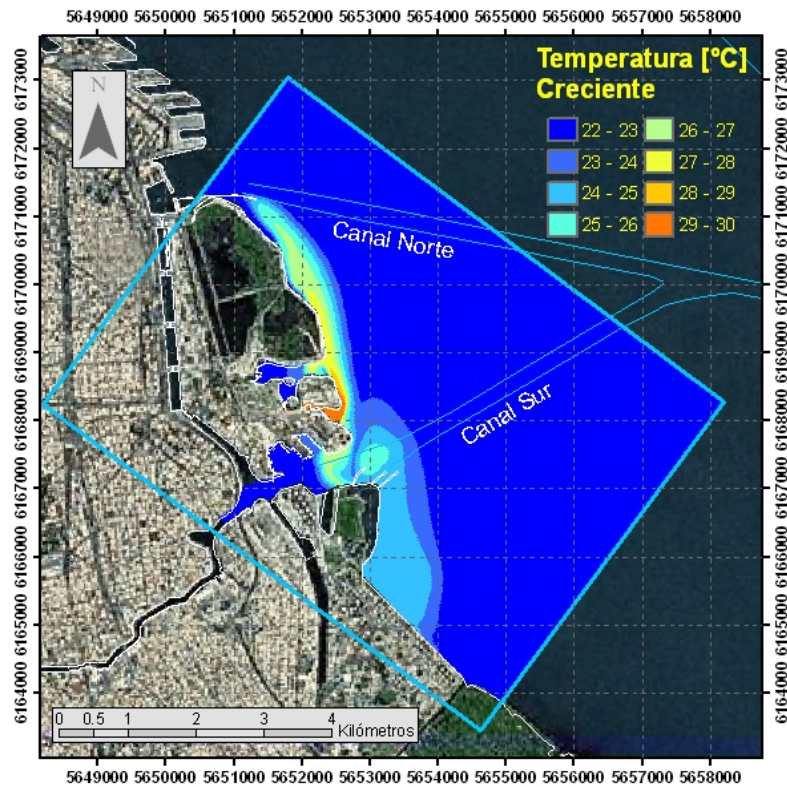
Las Figuras 3.3.8 y 3.3.9 presentan la diferencia de temperatura entre los escenarios de relleno y la situación actual (escenario *SR*) para los instantes de máxima velocidad en bajante y máxima velocidad en creciente. Si se toma una diferencia de temperatura de 3°C como el umbral de impacto significativo de la pluma térmica, se observa que tanto el relleno costero (escenario *CR*) como el que incluye la isla sin estribo (escenario *IS*) sólo producen impacto en bajante, con incrementos de la temperatura que no superan los 4°C (impacto negativo), y decrementos que pueden llegar hasta 5°C (impacto positivo). Para los dos escenarios restantes se generan incrementos de hasta 5°C en creciente, e incrementos y decrementos de hasta 5°C en bajante. Resulta particularmente notable el efecto de la presencia de los estribos (escenario *IE*) en relación al caso sin estribo (escenario *IS*), ya que es el aumento de resistencia al flujo que ellos producen lo que conduce al incremento de la temperatura en la zona ubicada al NO de los estribos. Por la misma causa, esta vez asociada al angostamiento del canal entre relleno costero e isla, el escenario *IC* también produce mayores incrementos de temperatura.

Nótese que, con el criterio adoptado, en los escenarios *CR* (sólo relleno costero) e *IS* (isla sin estribo) no se producen impactos negativos (aumentos de la temperatura en más de 3°C) sobre la línea de costa existente.

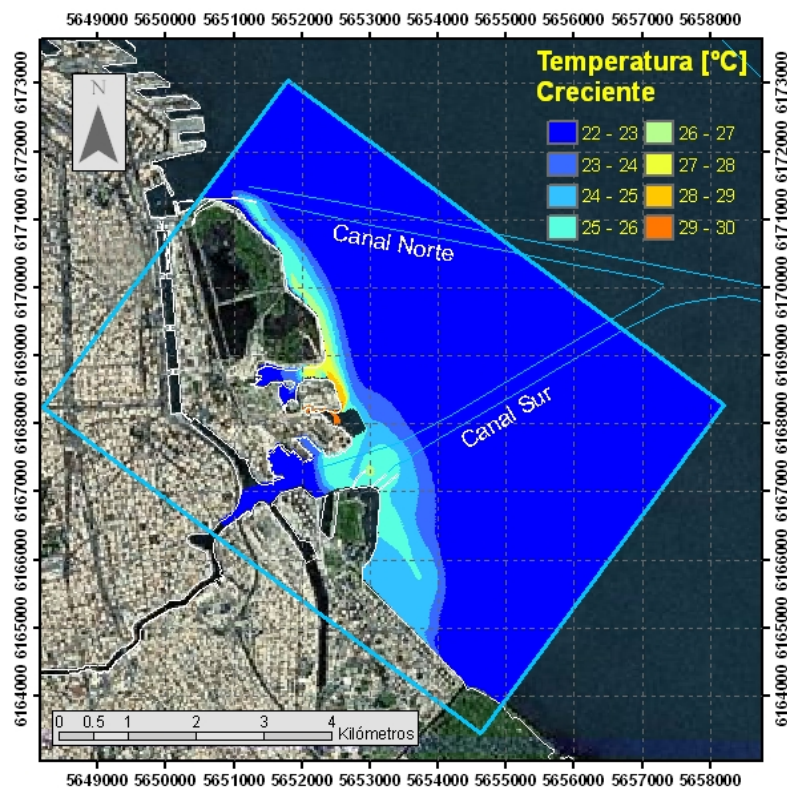
3.3.3 Sedimentación

La Figura 3.3.10 muestra la distribución del indicador de sedimentación para todos los escenarios. Como era de esperarse, se observa que los mayores valores se dan en la zona costera, en las ensenadas (artificiales) y en el canal de navegación. La introducción de los rellenos produce un desplazamiento costa afuera de la zona de tasa máxima de sedimentación.

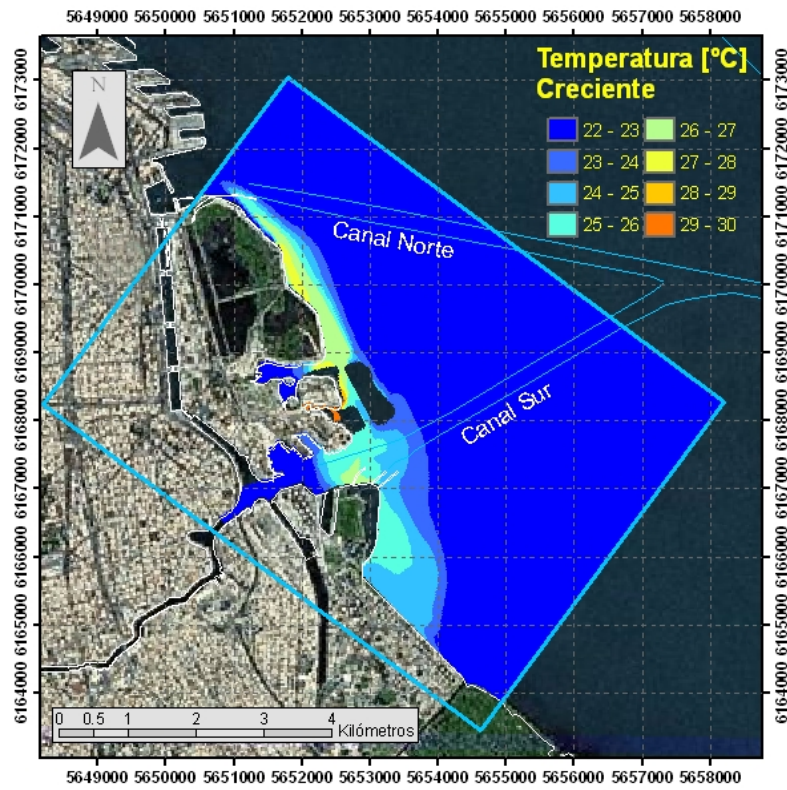
En la Figura 3.3.11 se muestra la diferencia entre los indicadores de sedimentación correspondientes a los escenarios con relleno respecto del caso sin relleno. Considerando un valor de 0,1 como un cambio significativo en el valor del indicador, se observa que se producen 'aureolas' de aumento significativo de sedimentación en torno a los rellenos, con mayor elongación hacia el NO, mientras que hay disminución de la sedimentación en las regiones donde la velocidad aumenta, es decir, en la zona lateral a los rellenos (en dirección NE) y en los canales entre la isla y la costa, salvo en el canal entre isla y relleno costero para los escenarios *IE* e *IC*, debido a su relativamente alta resistencia hidráulica. Nótese que la zona de impacto en ningún caso incluye a los canales de navegación, de modo que se puede concluir que no debe esperarse una variación apreciable en la sedimentación a lo largo de los canales (no habrá impacto significativo, entonces, sobre los dragados de mantenimiento).



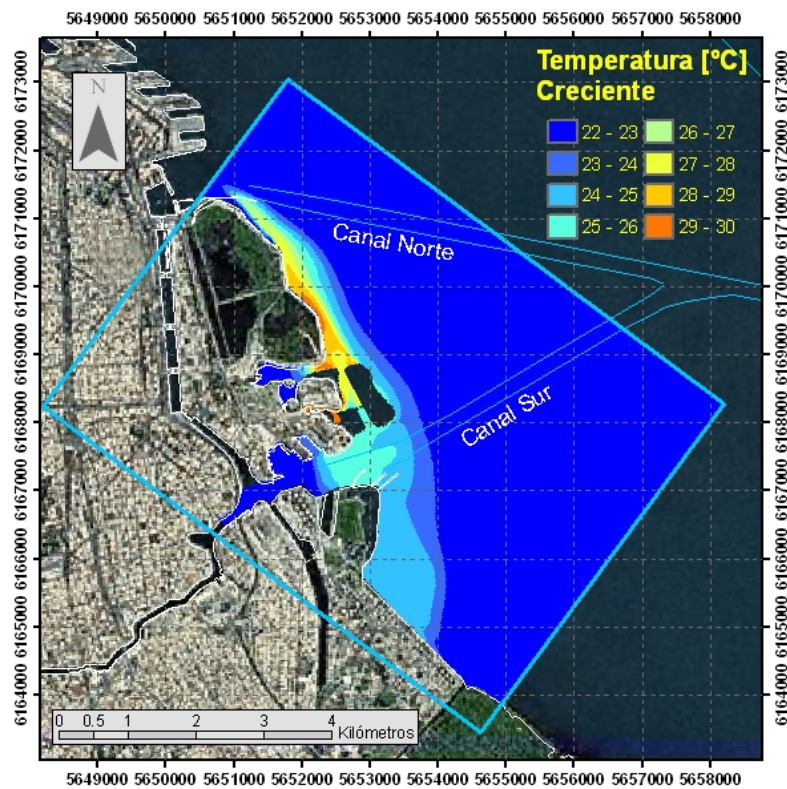
a) Escenario SR



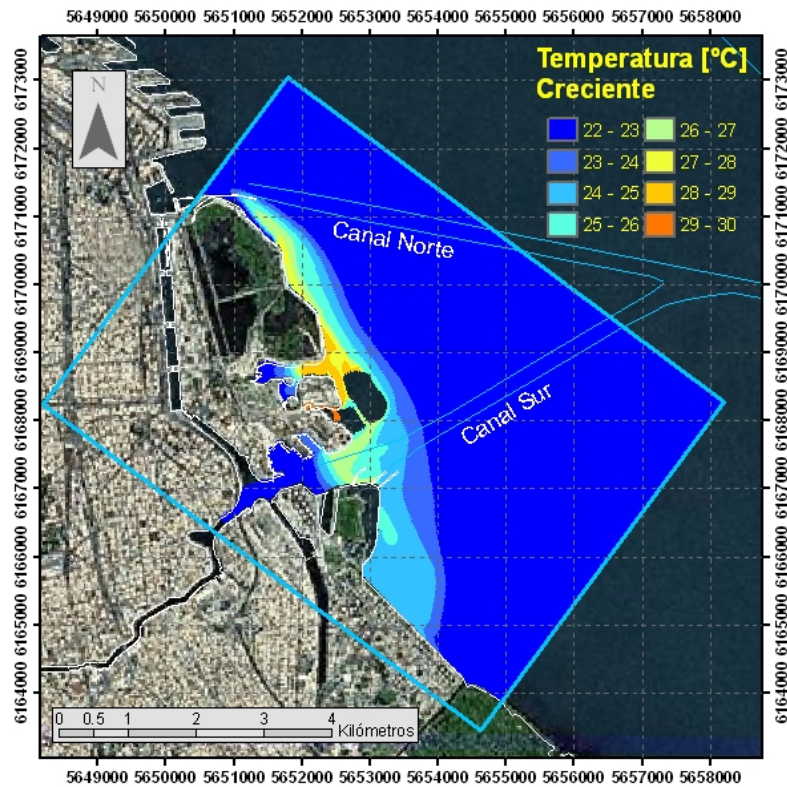
b) Escenario CR



c) Escenario IS

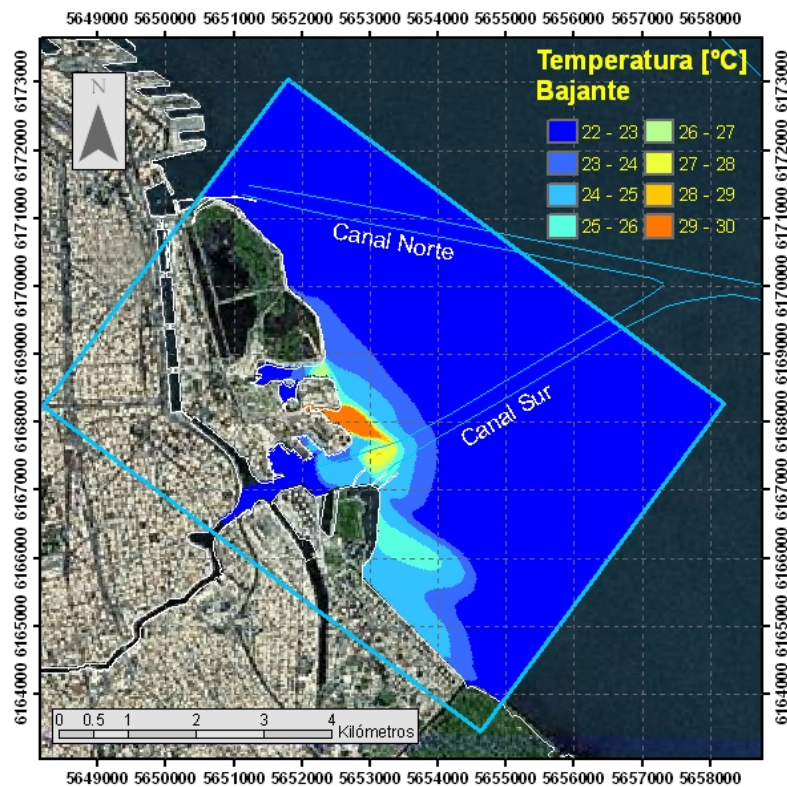


d) Escenario IE

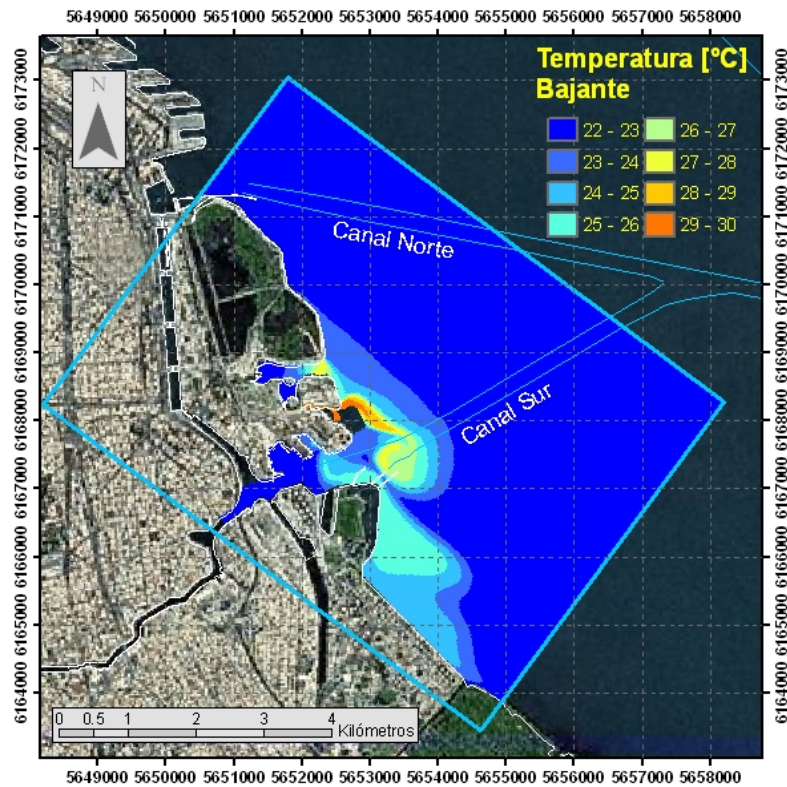


e) Escenario IC

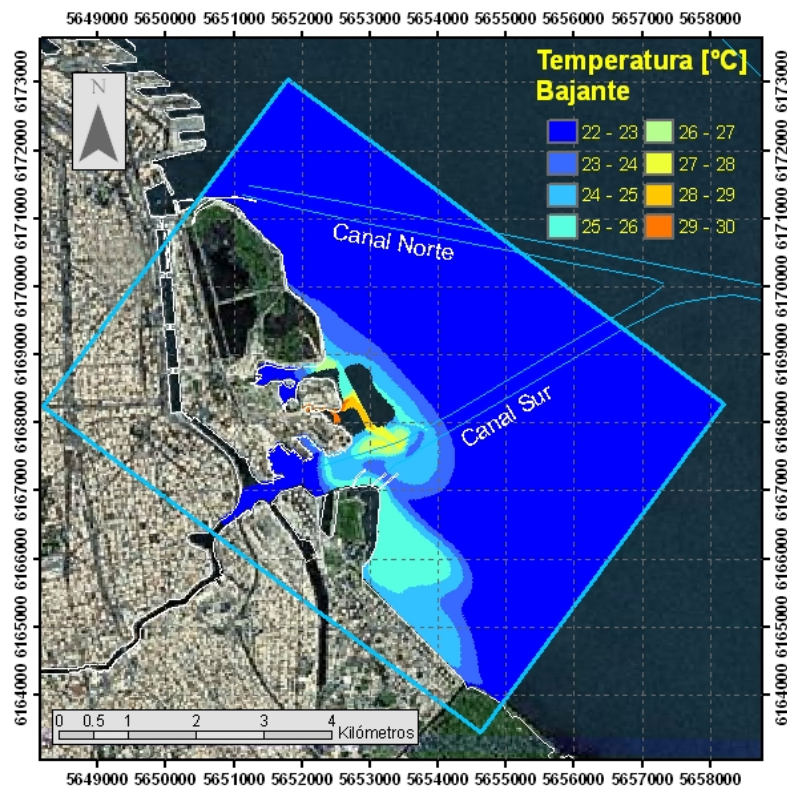
Figura 3.3.6. Pluma de temperatura en el instante de máxima velocidad de creciente.



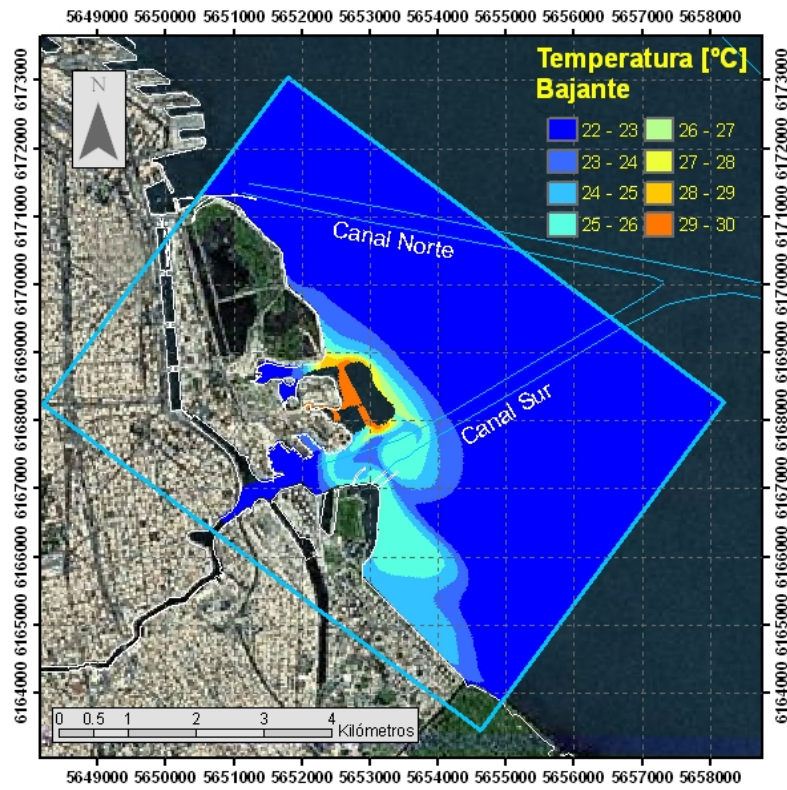
a) Escenario SR



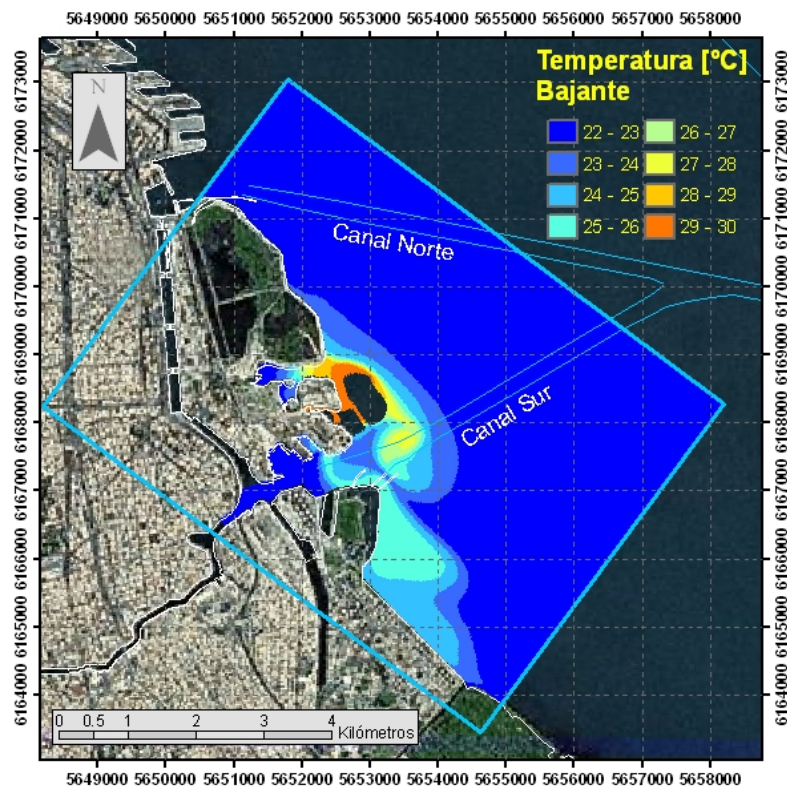
b) Escenario CR



c) Escenario IS

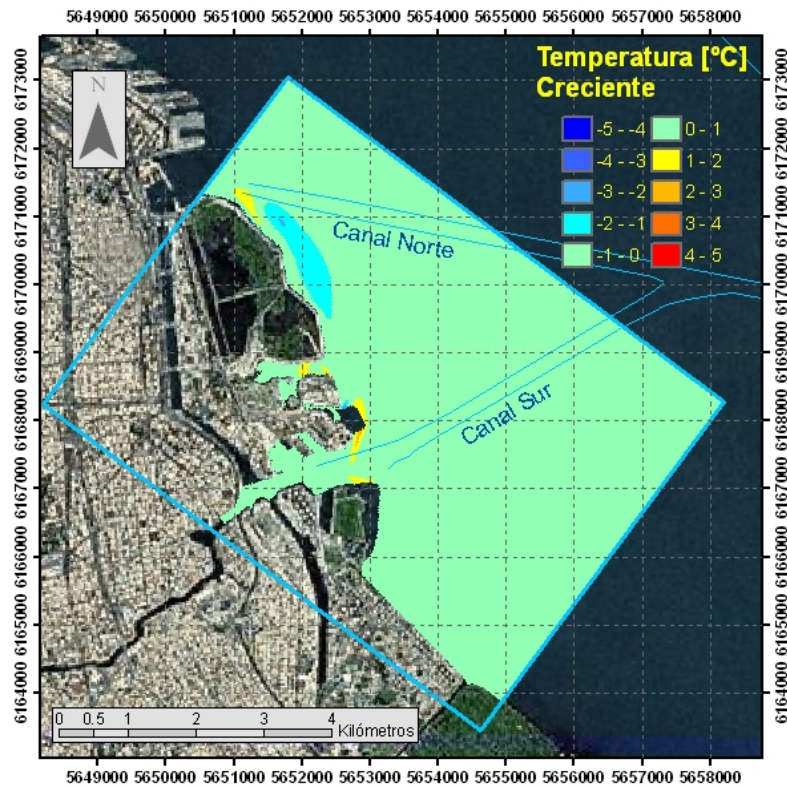


d) Escenario IE

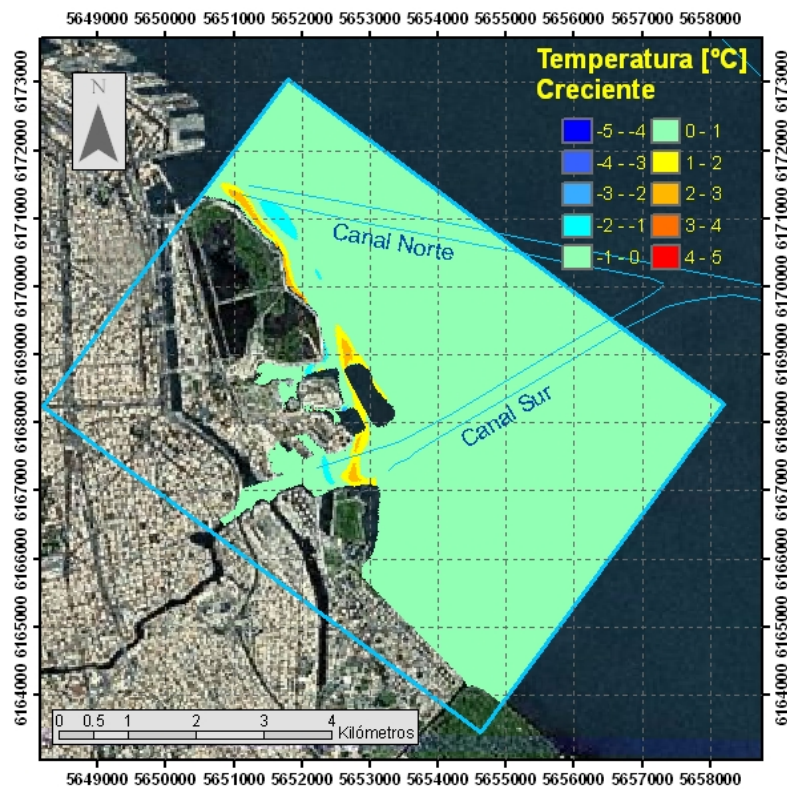


e) Escenario IC

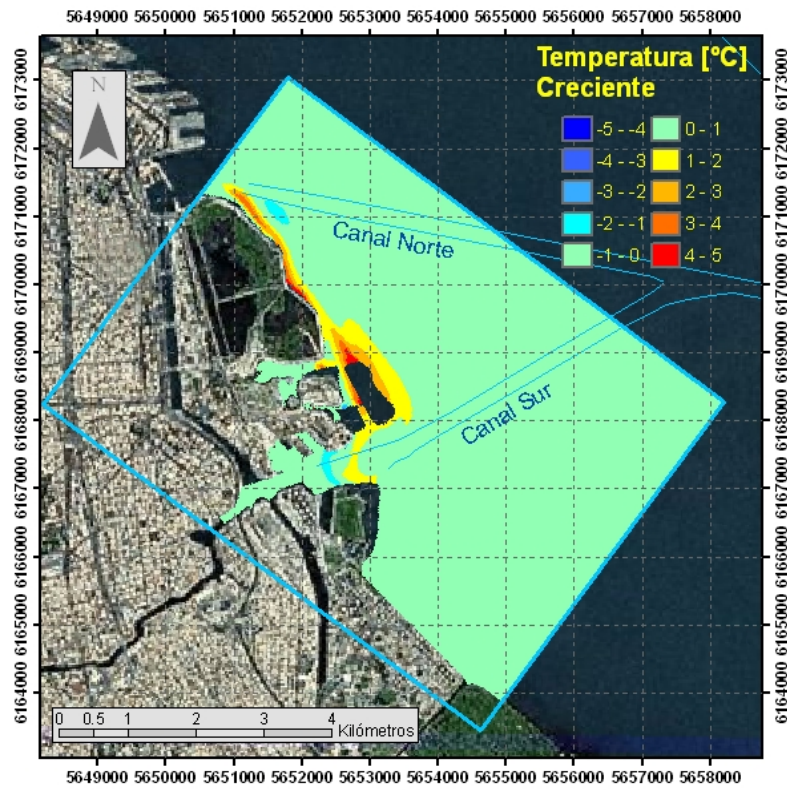
Figura 3.3.7. Pluma de temperatura en el instante de máxima velocidad de bajante.



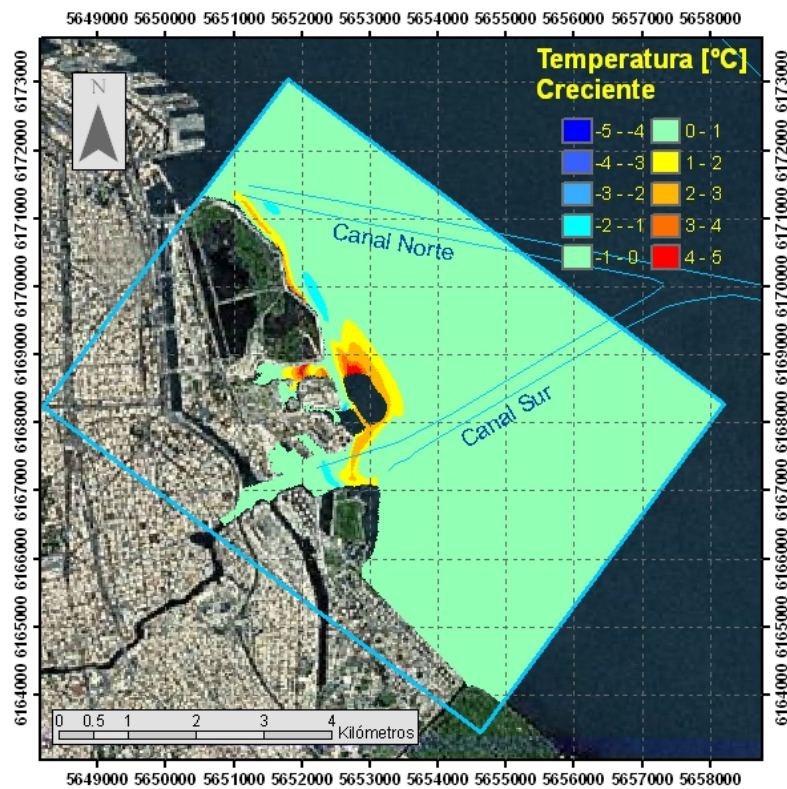
a) Diferencia CR - SR



b) Diferencia IS - SR

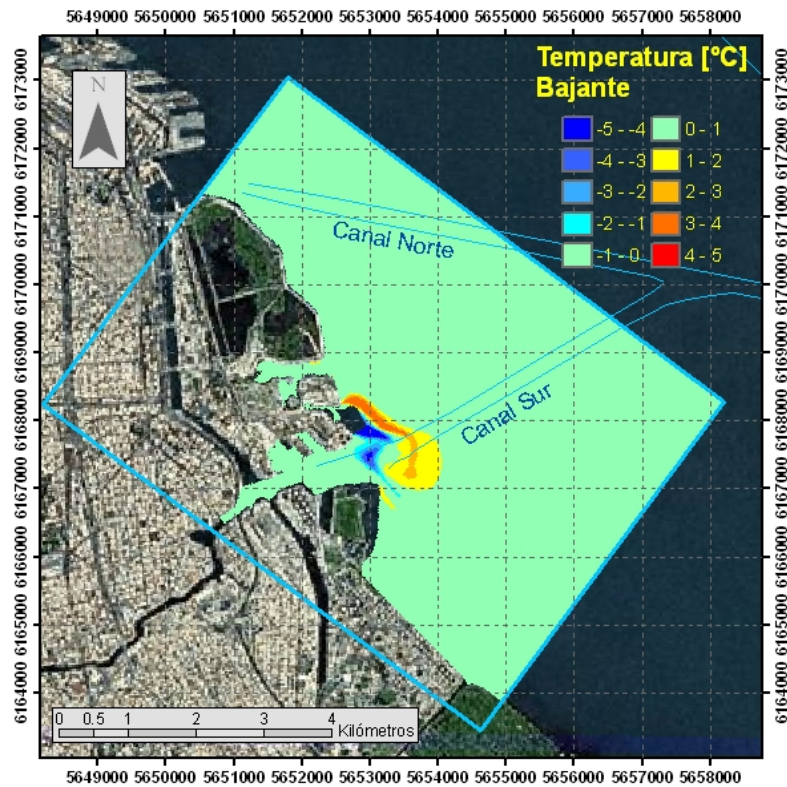


c) Diferencia IE - SR

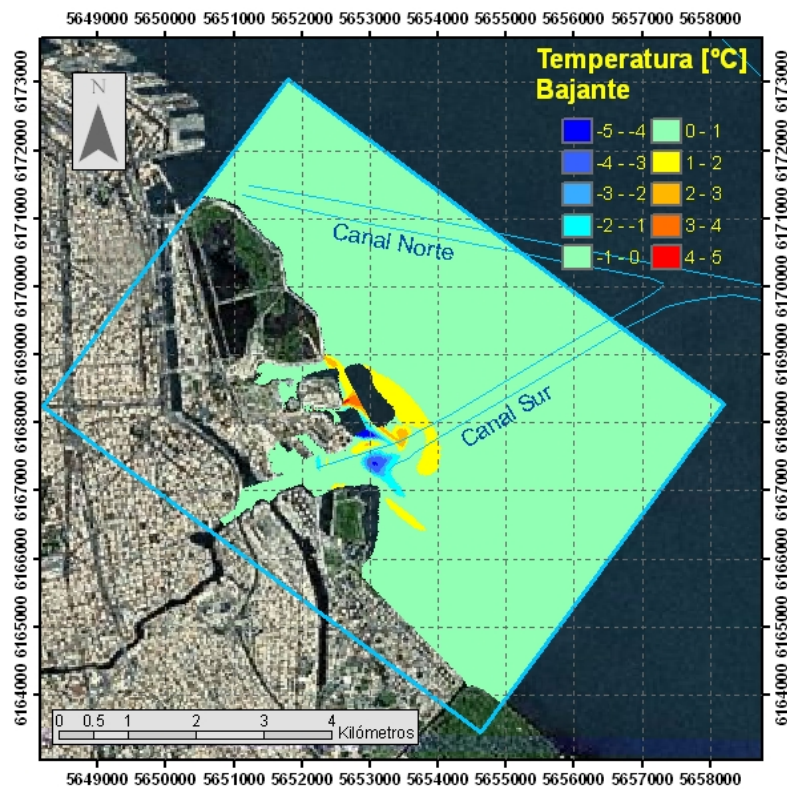


d) Diferencia IC - SR

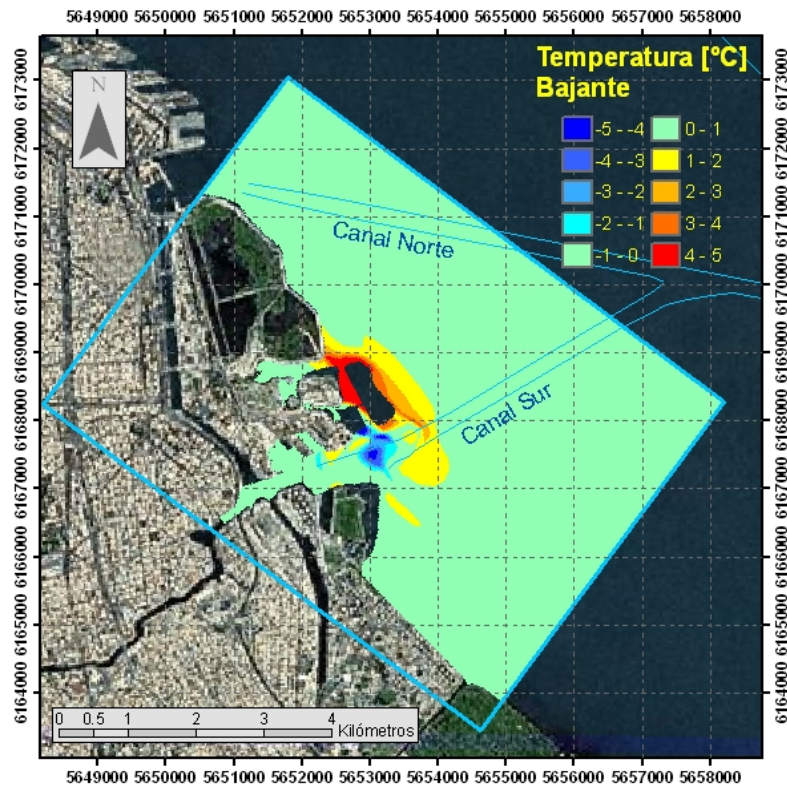
Figura 3.3.8. Diferencia de temperaturas en el instante de máxima velocidad de creciente.



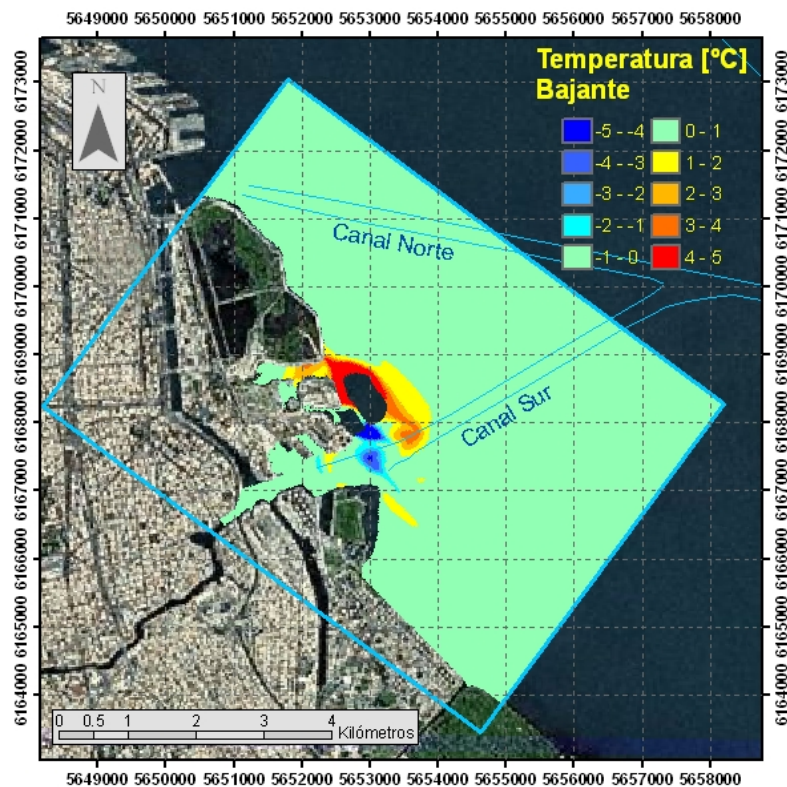
a) Diferencia CR - SR



b) Diferencia IS - SR

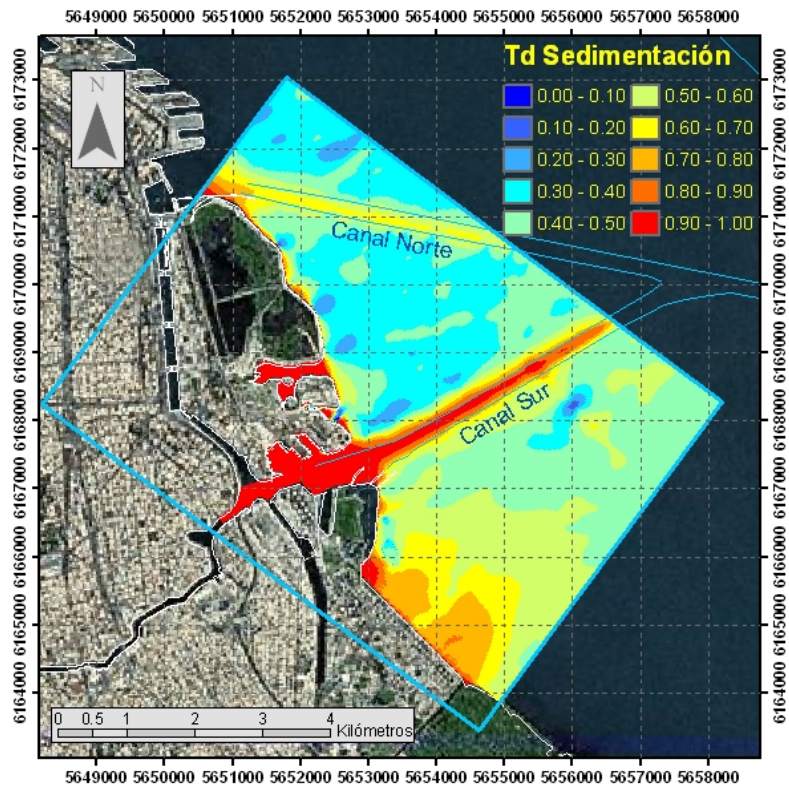


c) Diferencia IE - SR

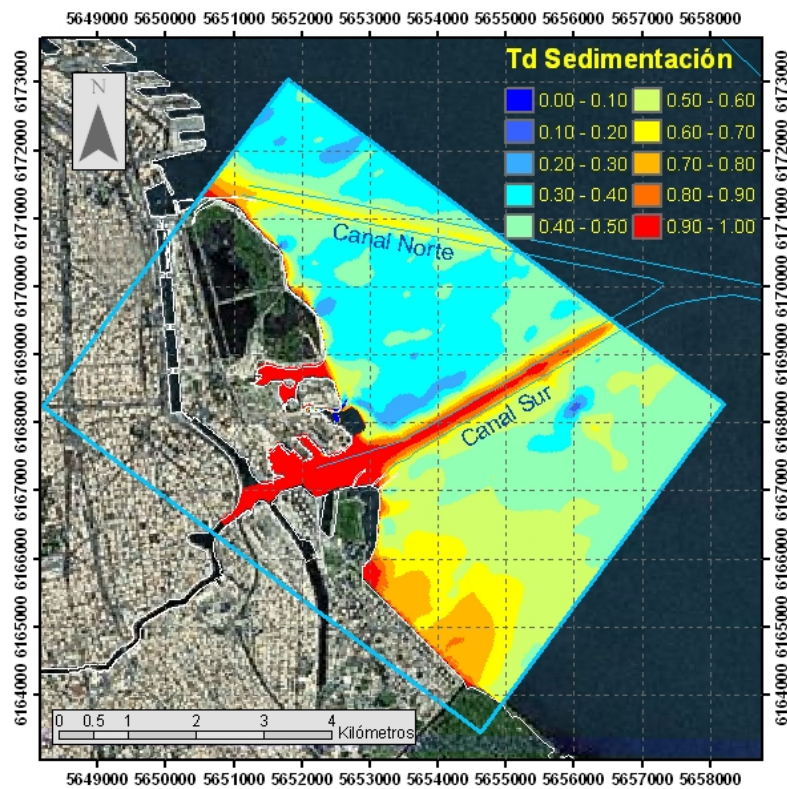


d) Diferencia IC - SR

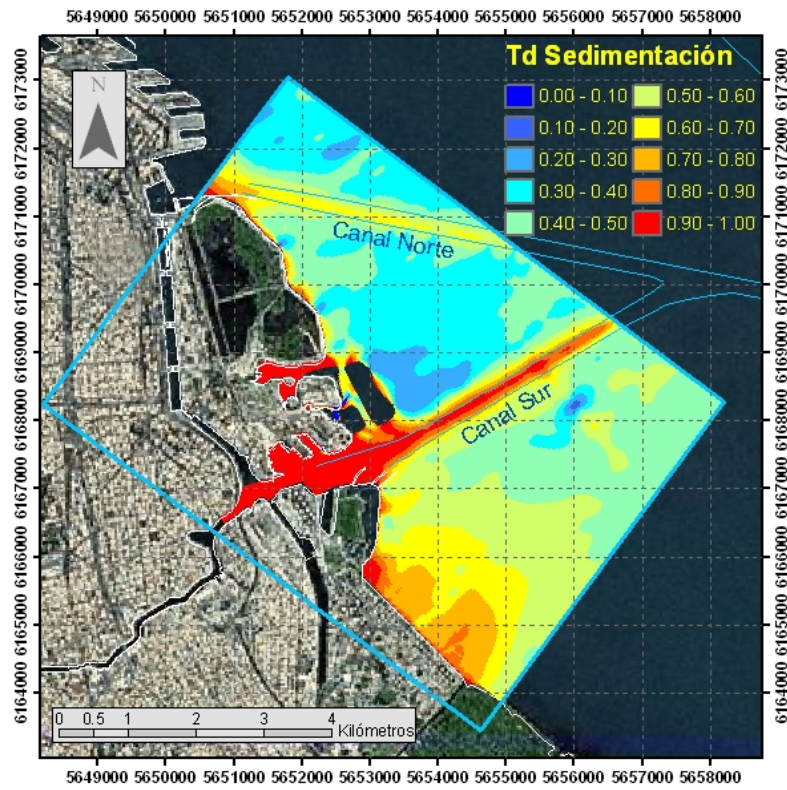
Figura 3.3.9. Diferencia de temperaturas en el instante de máxima velocidad de bajante



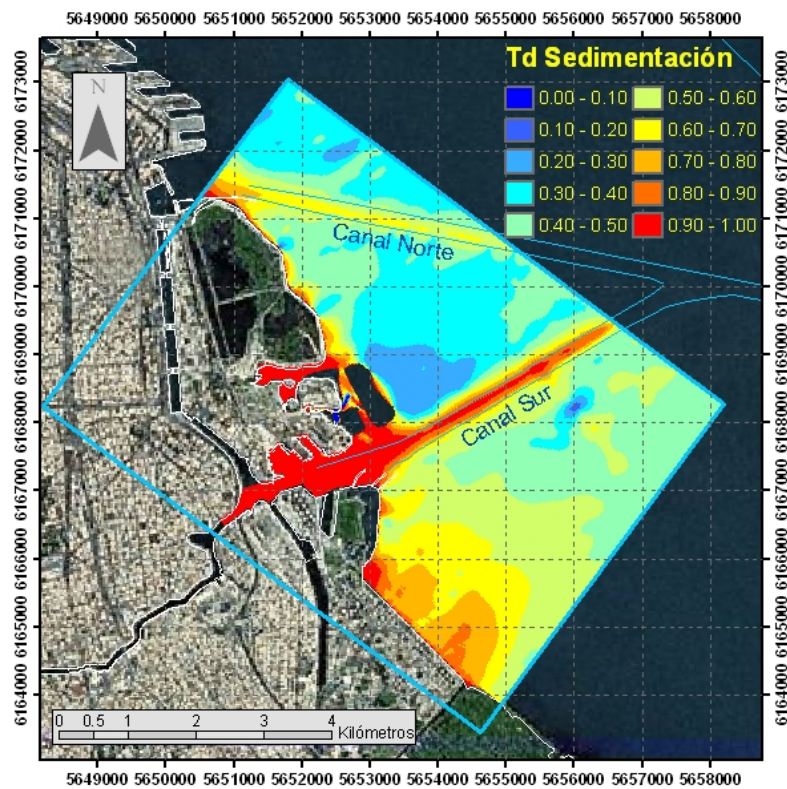
a) Escenario SR



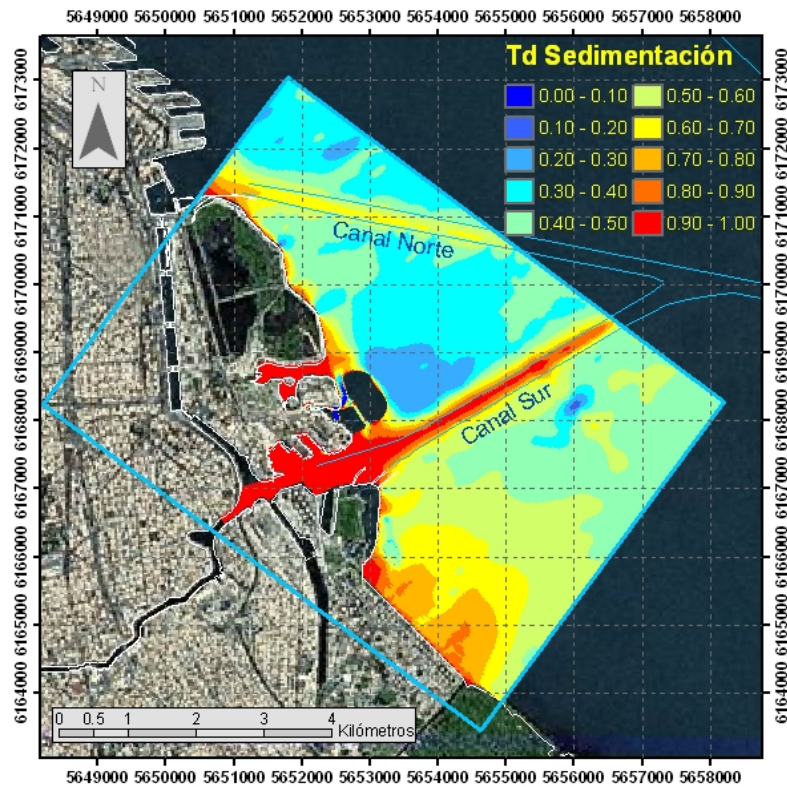
b) Escenario CR



c) Escenario IS

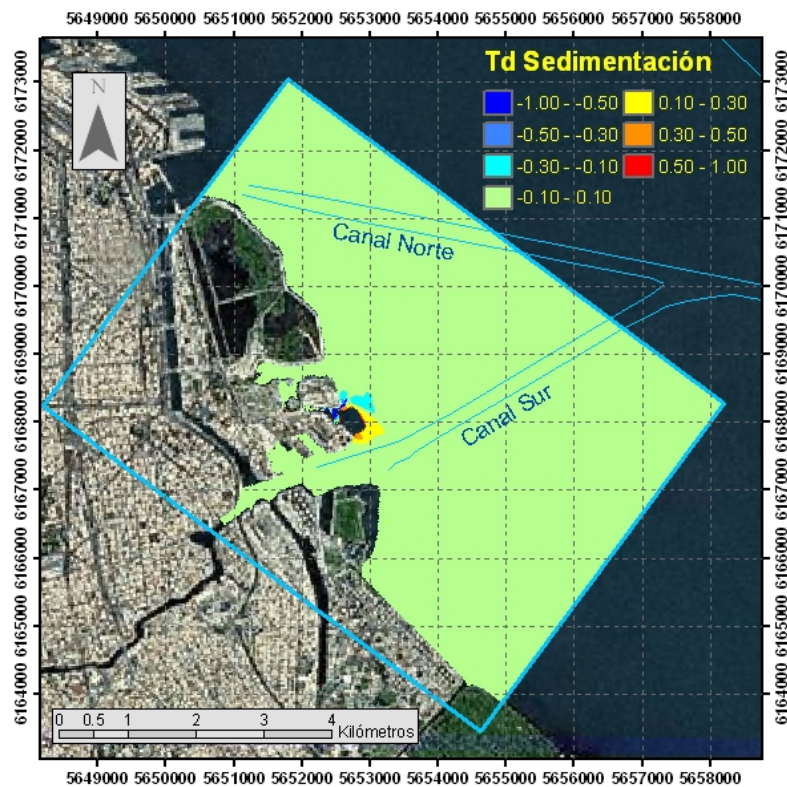


d) Escenario IE

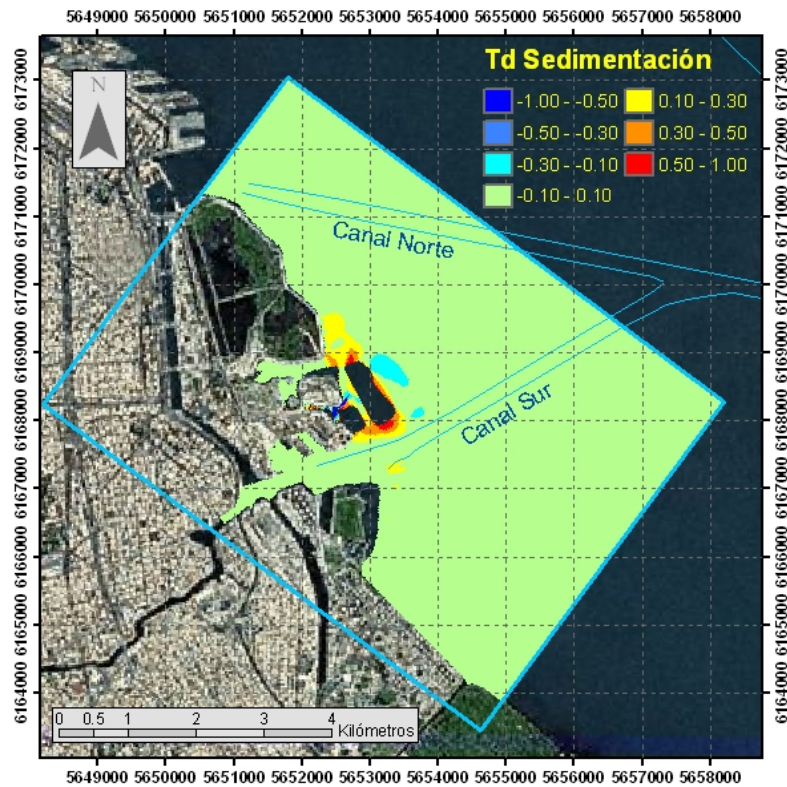


e) Escenario IC

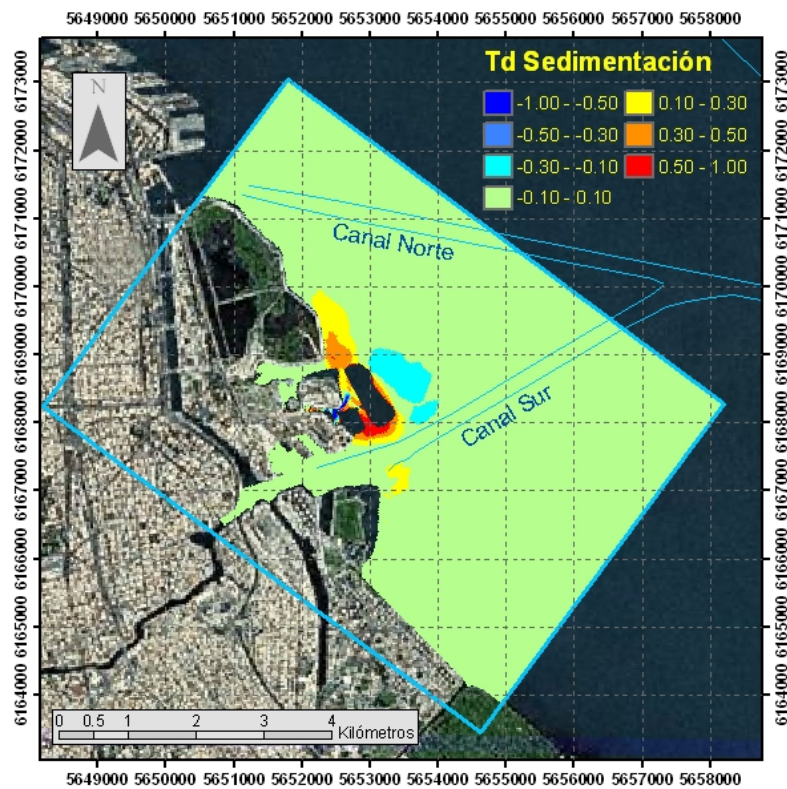
Figura 3.3.10. Distribución del indicador de sedimentación.



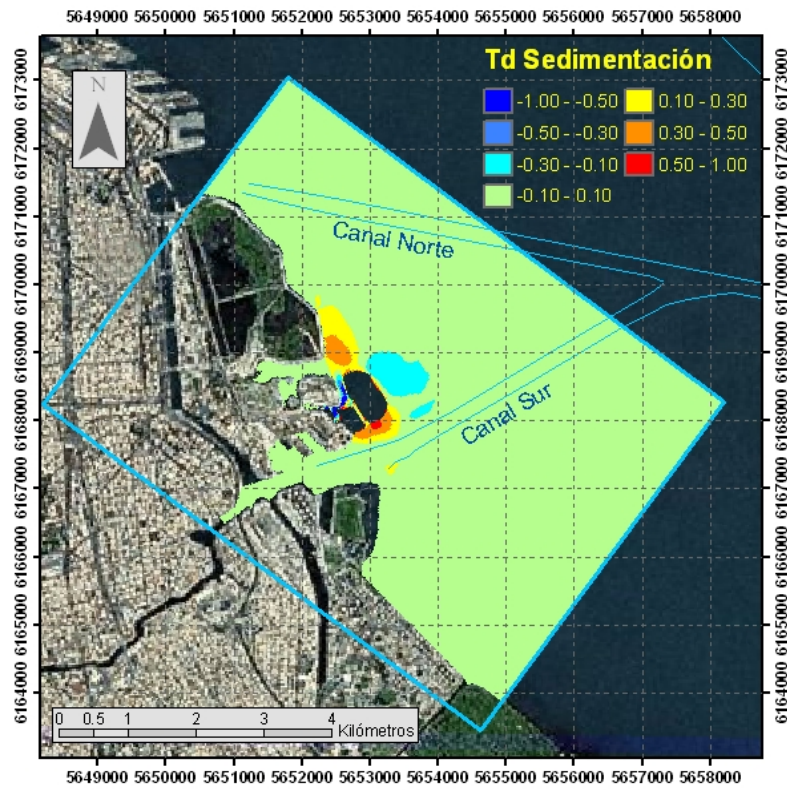
a) Diferencia CR - SR



b) Diferencia IS - SR



c) Diferencia IE - SR



d) Diferencia IC - SR

Figura 3.3.11. Diferencia entre indicadores de sedimentación.

4 CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una herramienta de modelación hidrodinámica validada para poder estudiar los impactos hidráulicos de los rellenos planteados, la cual se encuentra disponible para futuros estudios.

Se ha mostrado que los efectos tridimensionales (estratificación térmica) no son muy significativos, por lo que la determinación de los límites de las zonas de impacto pueden ser establecidos en base a una modelación bidimensional, que tiende a sobrestimar los alcances del impacto, lo cual resulta conservador.

El estudio indica los siguientes impactos hidráulicos debido a la presencia de los rellenos analizados:

- Si se toma una velocidad de 2 cm/s como el umbral de detección, el relleno costero (escenario *CR*) produce una zona de impacto de alrededor de 1700 m de extensión longitudinal y 600 m de extensión lateral (desde la línea costera actual). La construcción de la isla, en cualquiera de sus variantes, en general más que duplica tanto la extensión longitudinal como la lateral de la zona de impacto en máxima creciente, mientras que en máxima bajante, hay prácticamente una duplicación de la extensión longitudinal y un incremento menor (alrededor del 50%) de la extensión lateral, salvo para el escenario *IS*, en que este último disminuye levemente (alrededor del 15%). Por otra parte, la inclusión de los estribos del puente (escenario *IE*) implica, respecto del caso sin estribo (escenario *IS*), un incremento del orden del 15% en la extensión longitudinal de la zona de impacto, y de entre el 30 y el 80% en la extensión lateral.
- Para todos los escenarios se produce un impacto sobre las velocidades en un tramo del Canal Sur, pero en ningún caso sobre el Canal Norte. En creciente, el impacto sobre el Canal Sur, para todos los escenarios, es una disminución de la intensidad de la corriente, que es un impacto positivo sobre la navegación comercial; en cambio, en bajante se da un tramo de incremento y uno de disminución, aunque ese aumento de intensidad (impacto negativo) sólo supera los 5 cm/s para el escenario *IC*.
- Los rellenos afectan (positiva o negativamente) a la navegación deportiva que se desarrolle dentro de las respectivas zonas de impacto (indicadas en las figuras de los indicadores I y II).
- La presencia de los rellenos no cambia significativamente la extensión longitudinal de la pluma térmica (resultante de la descarga de la Central Costanera) en ninguno de los dos sentidos, ni en bajante ni en creciente, pero produce un desplazamiento de la pluma costa afuera, el cual prácticamente no supera los 300 m.
- Si se toma una diferencia de temperatura de 3°C como el umbral de impacto significativo de la pluma térmica, tanto el relleno costero (escenario *CR*) como el que incluye la isla sin estribo (escenario *IS*) sólo producen impacto en bajante, con incrementos de la temperatura que no superan los 4°C (impacto negativo), y decrementos que pueden llegar hasta 5°C (impacto positivo). Para los dos

escenarios restantes se generan incrementos de hasta 5°C en creciente, e incrementos y decrementos de hasta 5°C en bajante.

- Resulta particularmente notable el efecto de la presencia de los estribos (escenario *IE*) en relación al caso sin estribo (escenario *IS*), ya que es el aumento de resistencia al flujo que ellos producen lo que conduce al incremento de la temperatura en la zona ubicada al NO de los estribos. Por la misma causa, esta vez asociada al angostamiento del canal entre relleno costero e isla, el escenario *IC* también produce mayores incrementos de temperatura.
- Para los escenarios *CR* (sólo relleno costero) e *IS* (isla sin estribo) no se produce impacto negativo por sobretemperatura a lo largo de la línea de costa existente.
- Las mayores tasas de sedimentación se dan en la zona costera, en las ensenadas (artificiales) y en el canal de navegación. La introducción de los rellenos produce un desplazamiento costa afuera de la zona de tasa máxima de sedimentación.
- Considerando un valor de 0,1 como un cambio significativo en el valor del indicador de sedimentación, se observa que se producen 'aureolas' de aumento de sedimentación en torno a los rellenos, con mayor elongación hacia el NO, mientras que hay disminución de la sedimentación en la zona lateral a los rellenos (en dirección NE) y en los canales entre la isla y la costa, salvo en el canal entre isla y relleno costero para los escenarios *IE* e *IC*, debido a su relativamente alta resistencia hidráulica.
- No hay impacto significativo sobre la sedimentación en los Canales Norte y Sur, de modo que no debe esperarse una variación apreciable de los dragados de mantenimiento.

REFERENCIAS

- Menéndez, A.N., Castellano, R., 2000. Simulation of sedimentation in an estuary due to an artificial island, 4th International Conference Hydroinformatics 2000, Cedar Rapids, Iowa, USA, July.
- van Rijn, L.C., 1993, Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas, Aqua Publ.