

La Modelación Morfodinámica como herramienta de monitoreo de cauces hídricos

Caso de estudio:

Río Paraguay: Paso La Bretona

Equipo de trabajo:

Ing. Alberto Grisetti, MSc
Ing. María del Carmen Álvarez, MSc.
Lic. Mauricio Grisetti
Ing. Pamela Maldonado, MSc
Ing. Ana Espínola
Ing. Cesar López Areco

26 de marzo de 2026
San Lorenzo, Paraguay

Temas a desarrollar

Contexto

Alcance, situación, relevancia, problema

01

Resultados

Y análisis de las simulaciones

03

Modelación morfodinámica

Comparación con hidrodinámica, Análisis de datos, Metodología, Delft3D

02

Conclusiones

Observaciones & recomendaciones

04

Proyecto

“Adecuación del Canal de Navegación del Río Paraguay en Pasos Críticos de Fondo Duro”

Estado
WORK IN
PROGRESS



Fin

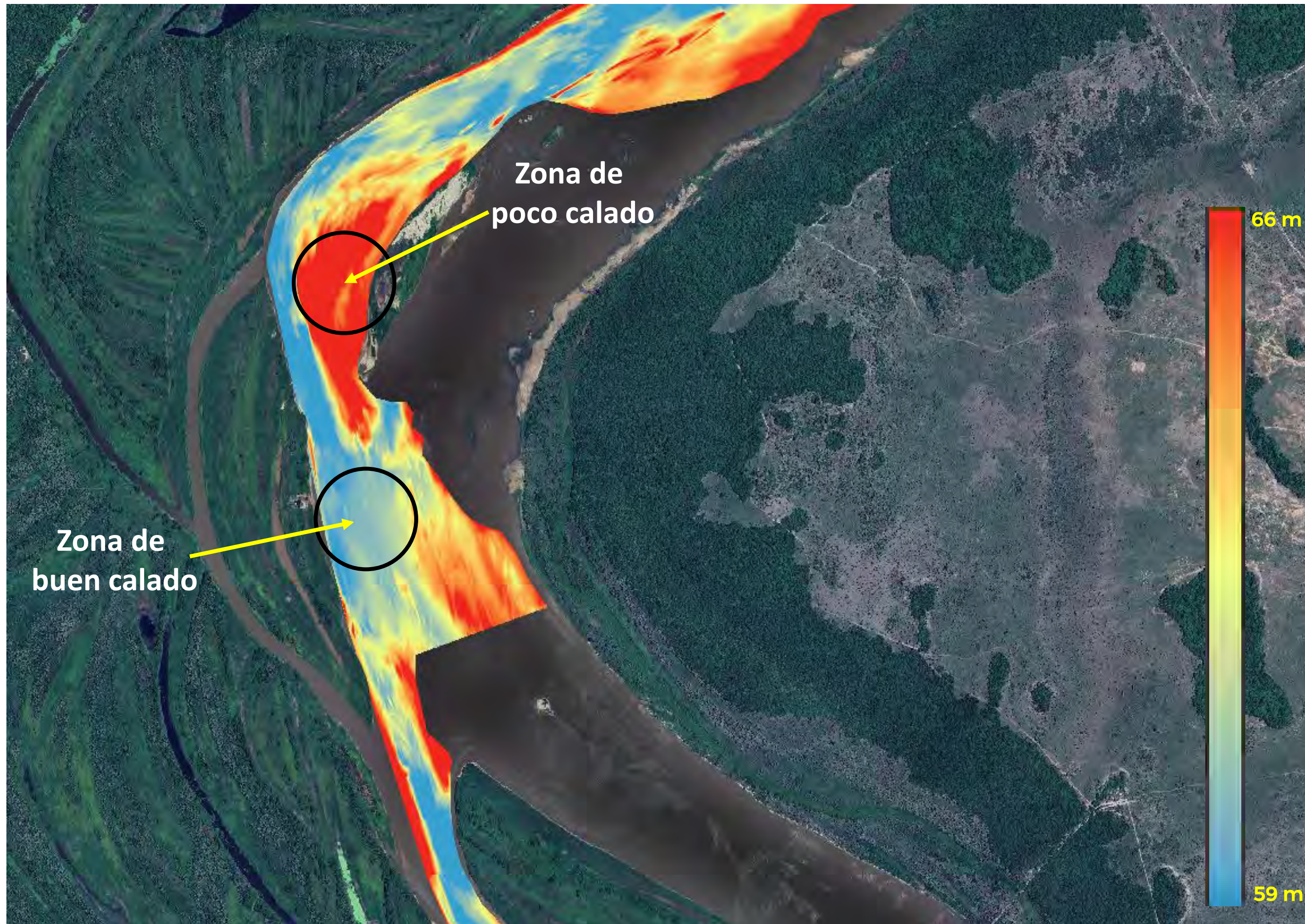
Evaluar los impactos generados por la remoción de fondos duros en los canales de navegación

Objeto

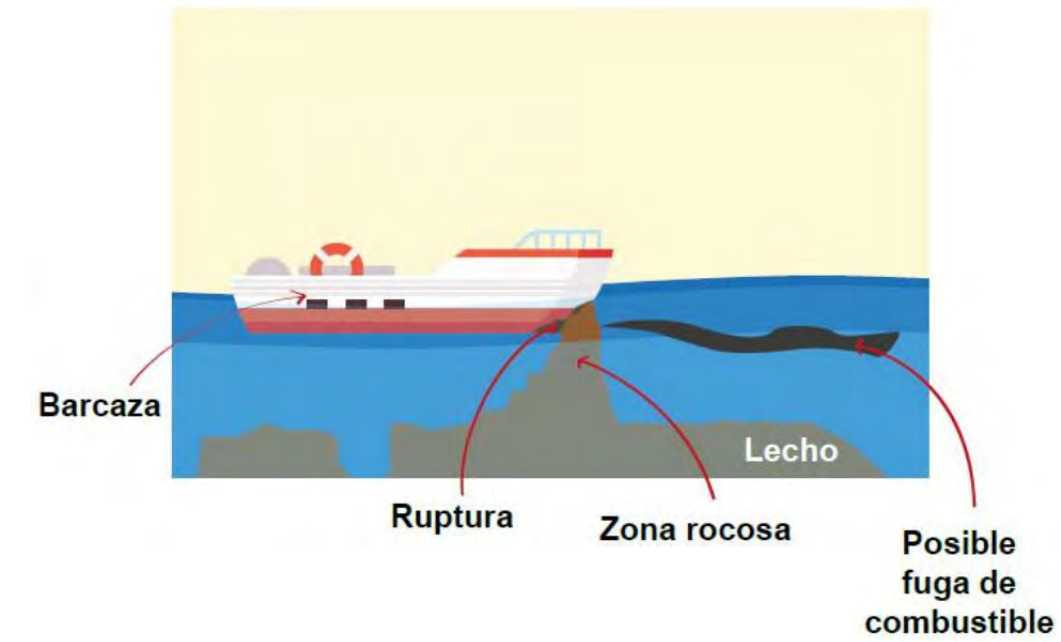
Dentro de las normativas del MADES, en el marco del PGA, el subcomponente del monitoreo físico requiere el análisis y modelación morfodinámica del río en los 13 pasos, denominados críticos



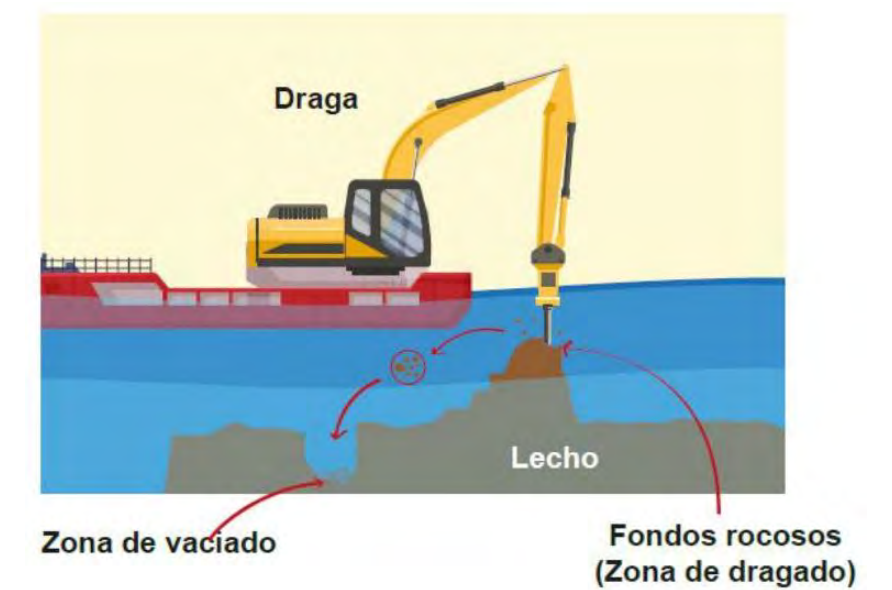
Situación Actual



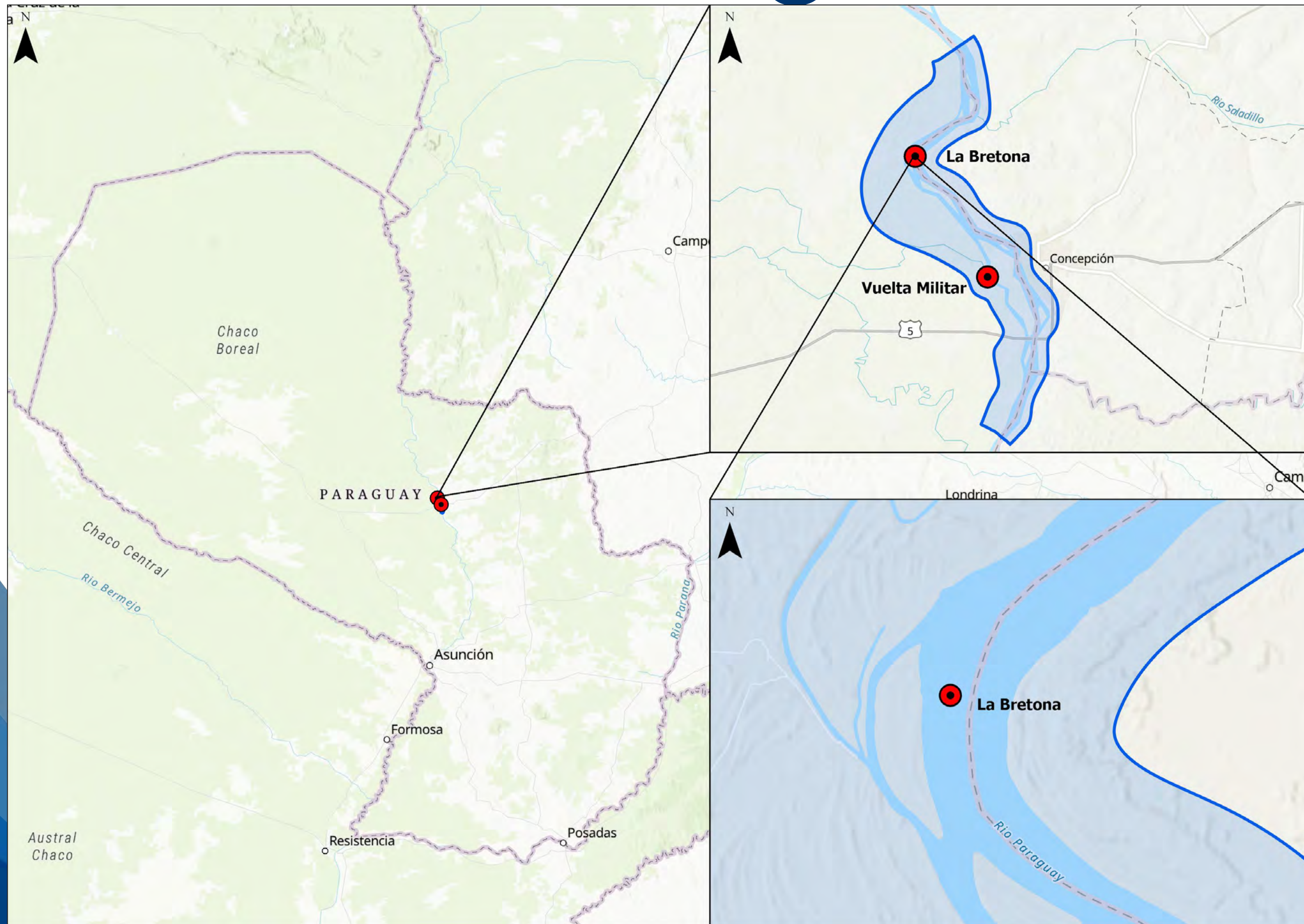
- **Problemática para las Barcazas**



- **Dragado en las zonas rocosas**



Alcance Geográfico



Movimiento histórico de bancos de arena en el área de estudio

Estabilidad relativa
(erosión lateral gradual)

Cambios más acelerados
De canal pasa a formación de isla



33 años de diferencia

5 años de diferencia

1986

2019

2024

= Menor capacidad de transporte

Importancia del monitoreo hídrico

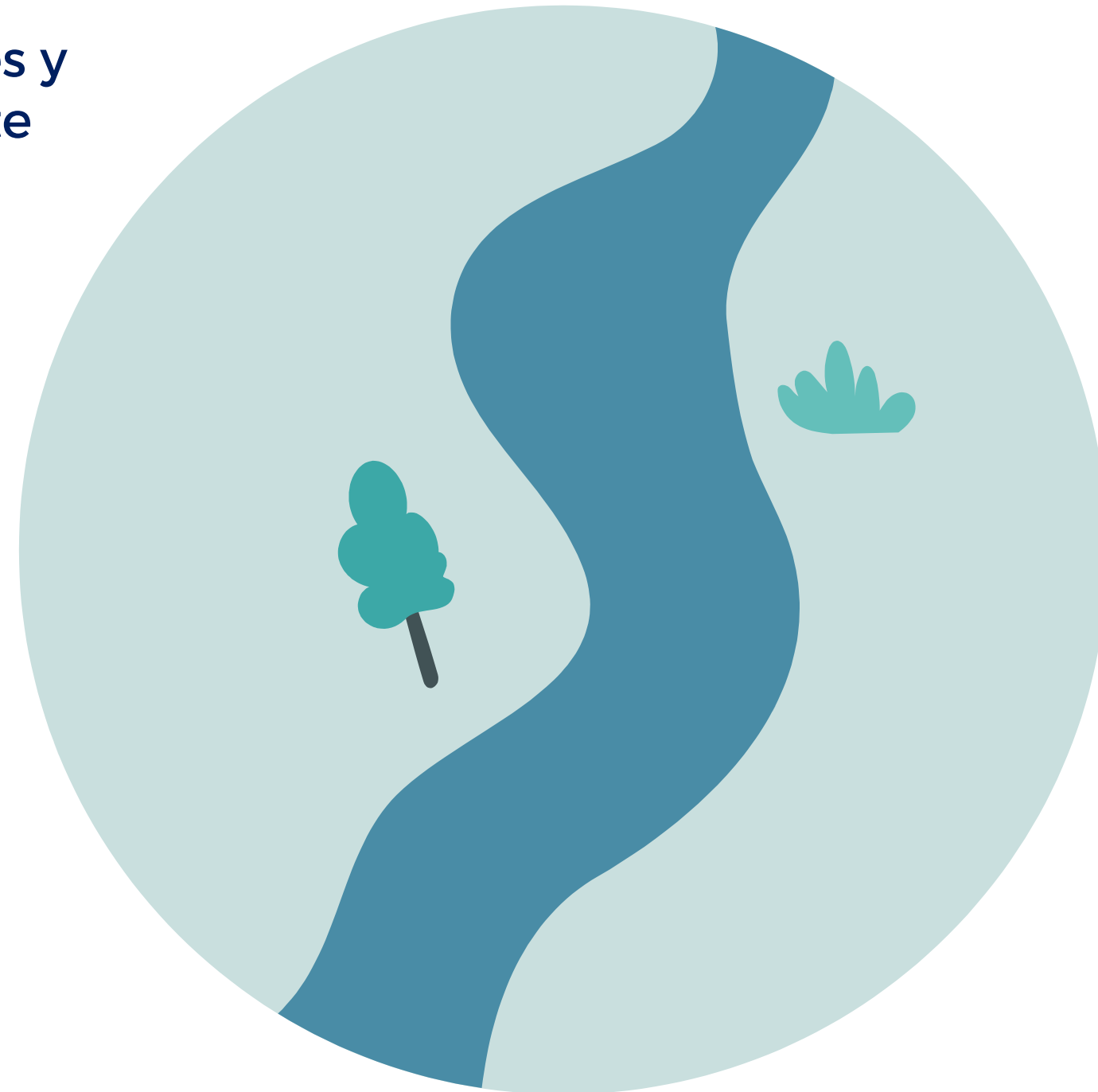
Impacto en la Economía

El monitoreo constante previene sobrecostos logísticos por bajantes y permite una planificación eficiente del dragado

Reducción de incertidumbre

La calidad de un modelo depende de la calidad de sus datos de entrada.

Más campañas = mejores resultados



Gestión de riesgo

Toma de decisiones basada en datos

DATO = Activo más valioso

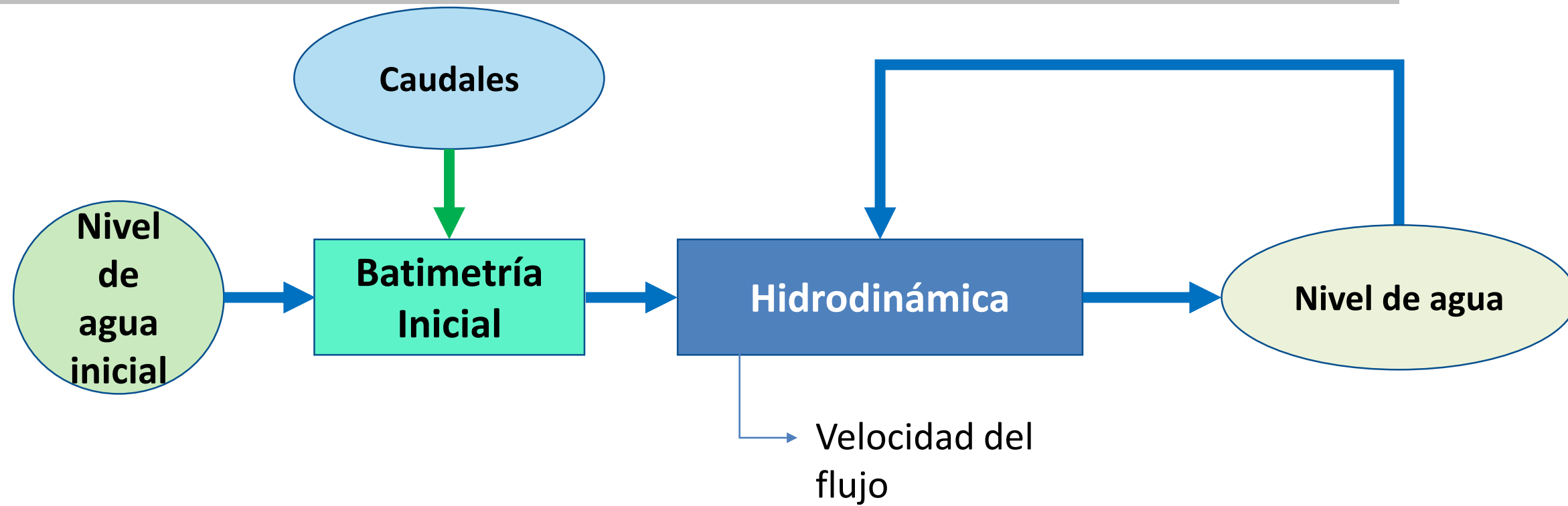
Sin un monitoreo constante, cualquier inversión se basaría en suposiciones

Modelación Morfodinámica

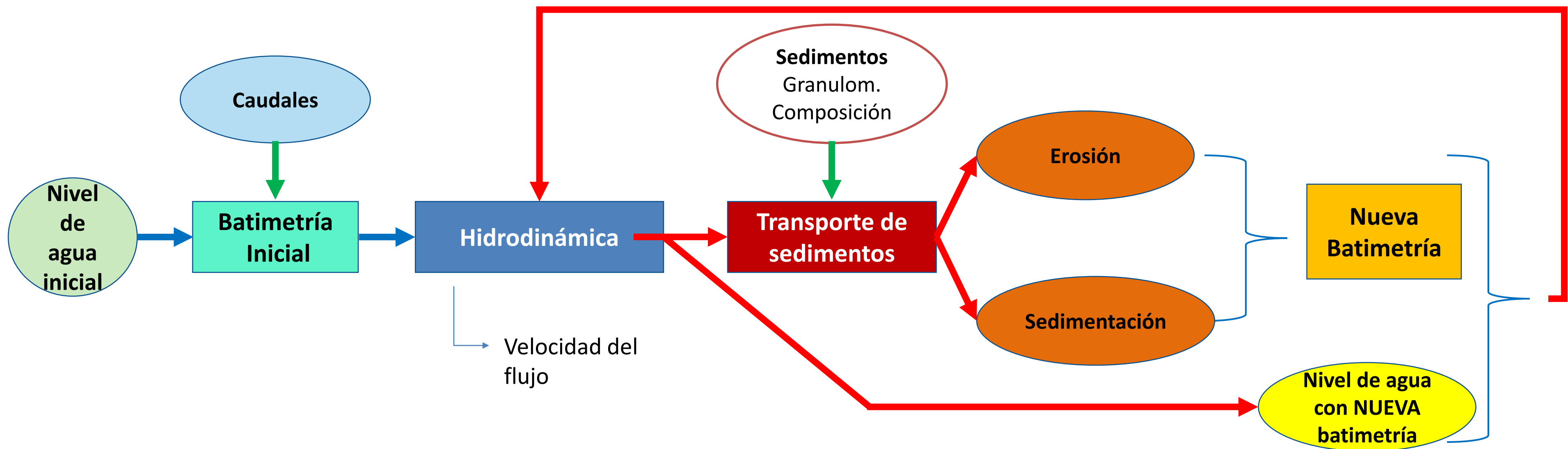
Vs. Hidrodinámica

Características	Monitoreo Hidrodinámico	Monitoreo Morfodinámico
Enfoque	Niveles de agua, caudales y velocidades	Erosión, transporte y deposición de sedimentos.
Geometría	El lecho del río se considera fijo (estático)	El lecho es móvil (evoluciona con el tiempo)
Resultado	Mapas de inundación y vectores de flujo	Cambios en la batimetría y formación de bancos
Visión	Corto plazo (Durante la crecida)	Mediano/Largo plazo (El canal en 5 años)

MODELO HIDRODINÁMICO



MODELO MORFODINÁMICO



Modelación morfodinámica

Bondades Vs. Limitaciones

Optimización del dragado

Permite identificar no solo dónde hay un banco de arena hoy, sino si ese lugar volverá a sedimentarse rápidamente después de dragarlo

Alta demanda de datos.

Requiere información de la granulometría y tasas de transporte de sedimentos

Protección de infraestructura

Predice procesos de socavación en pilas de puentes o erosión de márgenes que podrían comprometer puertos o defensas costeras

+ Costo computacional.

Son mucho más complejos y lentos de correr que los puramente hidráulicos

Sostenibilidad de la navegación

Ayuda a diseñar canales de navegación que aprovechen la energía natural del río para mantenerse limpios.

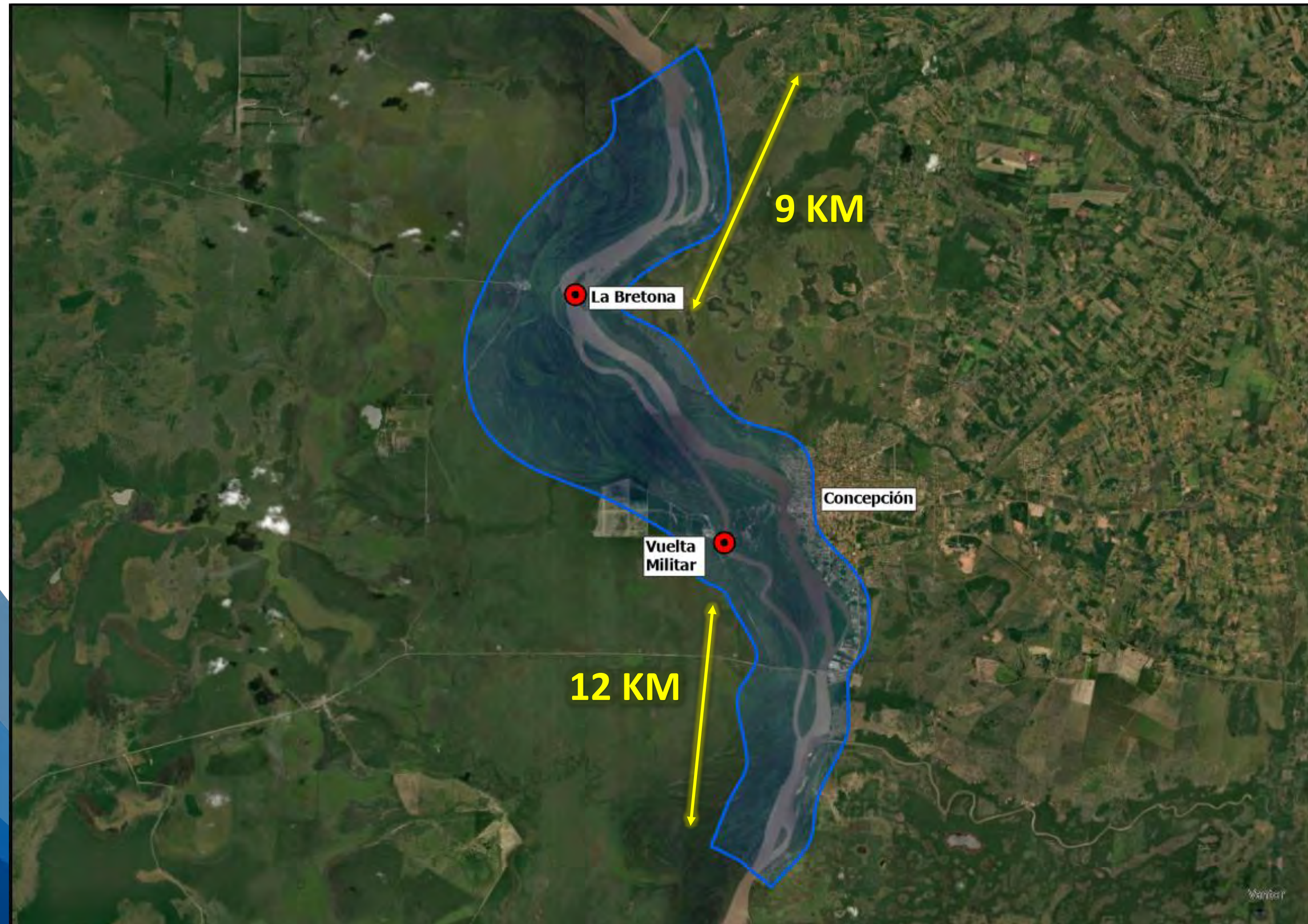
Incertidumbre en la calibración.

Los cambios en el lecho son procesos lentos y no lineales; calibrar estos modelos requiere series históricas de batimetría de buena calidad

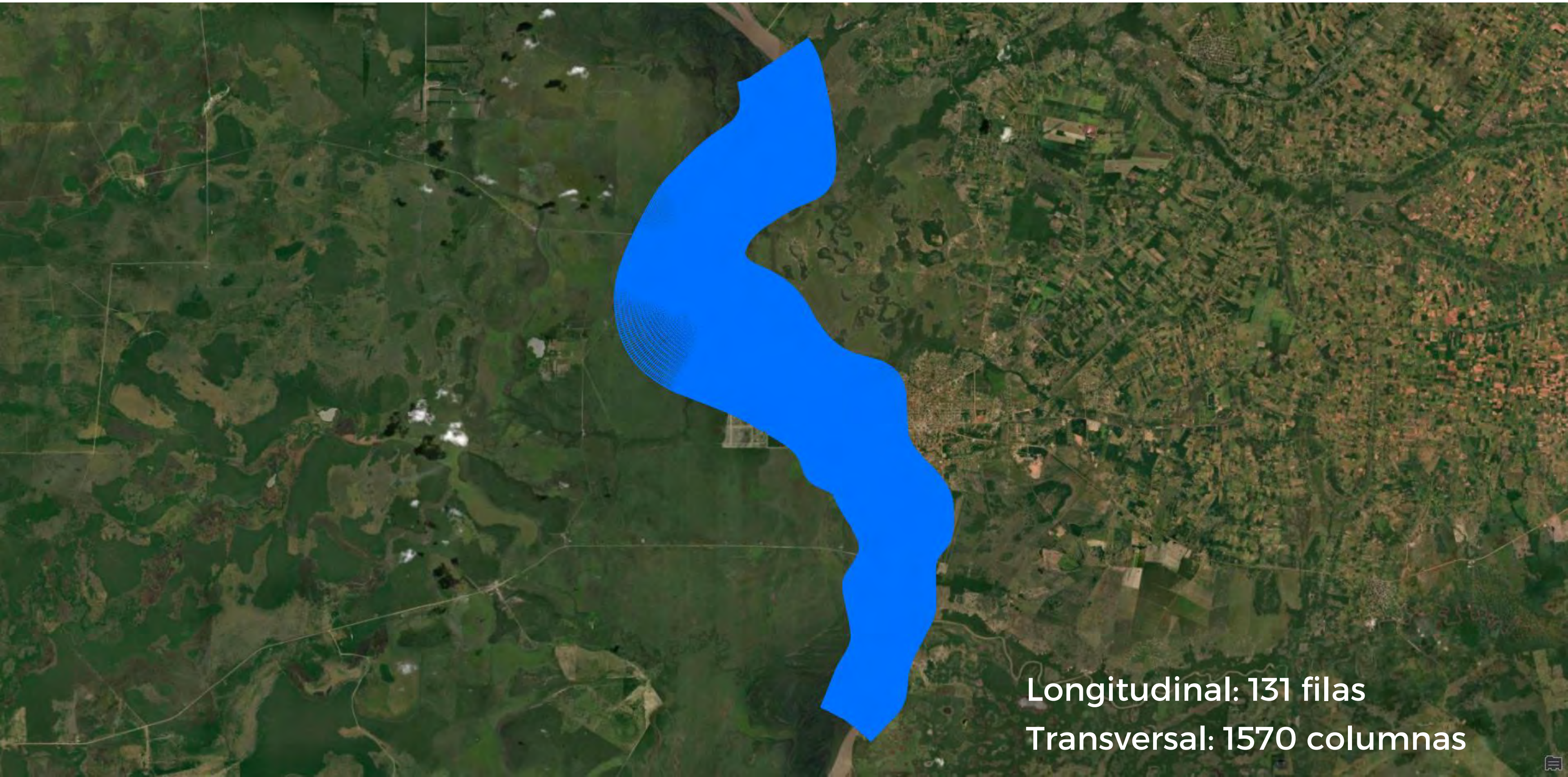
Software Delft3D

- **Delft3D-FLOW:** Es el núcleo hidrodinámico. Permite modelar flujos en 2D (promediados en profundidad) y 3D. Resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos incompresibles bajo la hipótesis hidrostática.
- **Delft3D-MOR (Morfodinámica):** Simula el transporte de sedimentos (fondo y suspensión) y los cambios resultantes en la batimetría. Permite usar "factores de aceleración morfológica" (*morfac*) para simular cambios de años en pocas horas de cómputo.
- **Delft3D-WAVE:** Simula la generación y propagación de olas, y cómo estas afectan el transporte de sedimentos en zonas costeras o grandes embalses.
- **Delft3D-FM (Flexible Mesh):** Es la versión más moderna que permite mallas no estructuradas (triángulos, polígonos), lo cual es ideal para seguir la curvatura de ríos complejos.

Dominio del Modelo de estudio

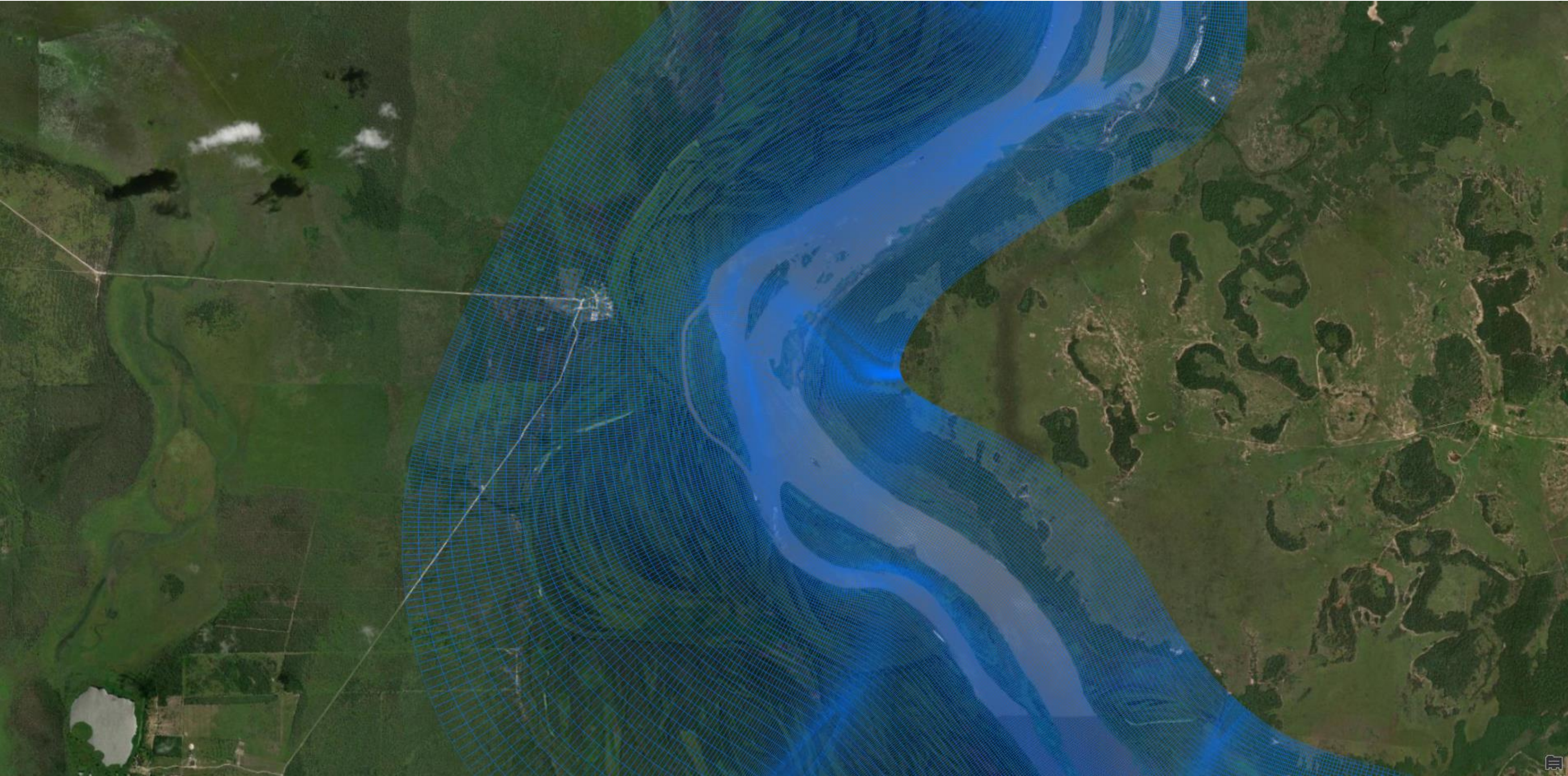


Dominio del Modelo de estudio

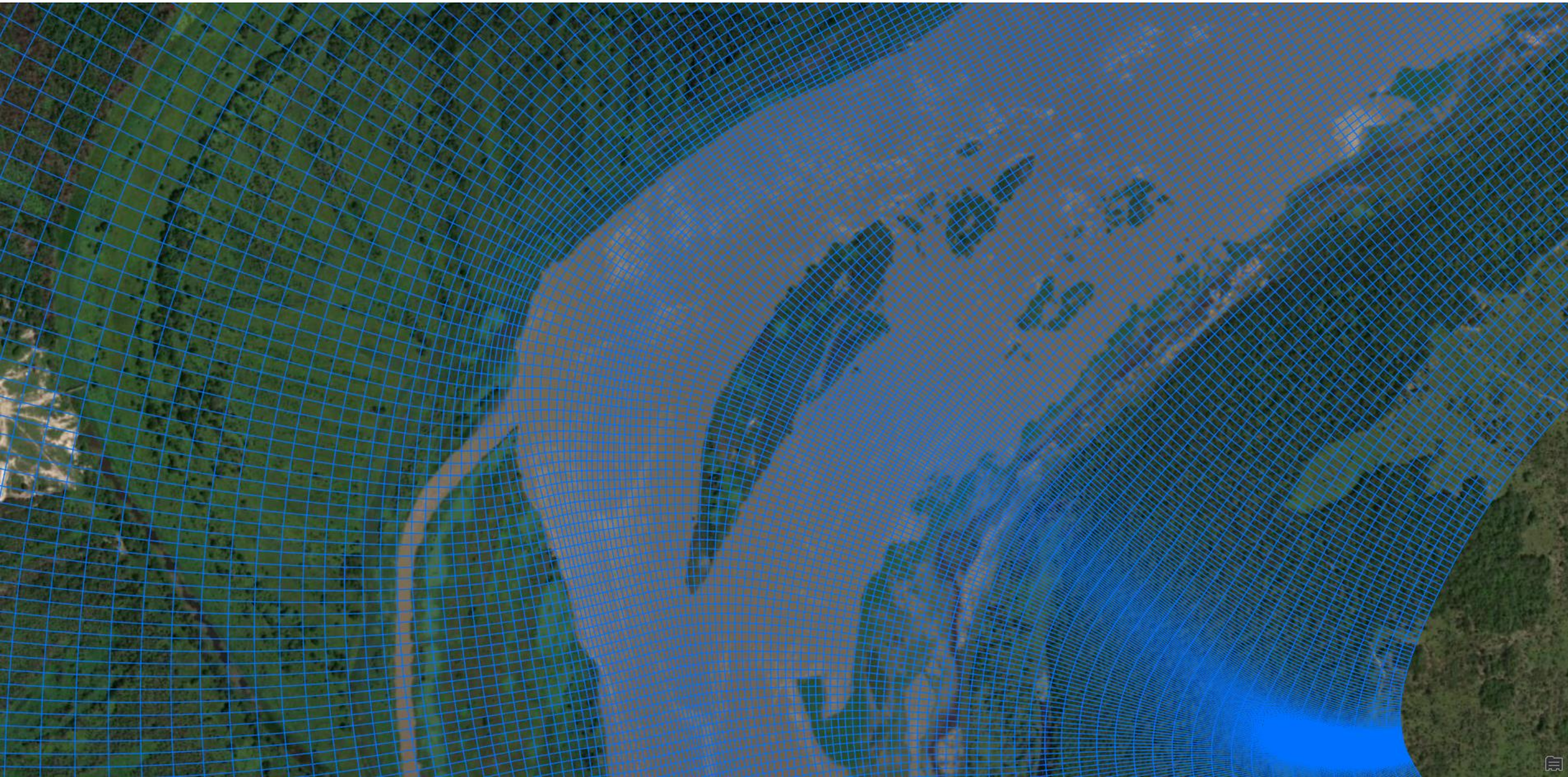


Longitudinal: 131 filas
Transversal: 1570 columnas

Domino del Modelo

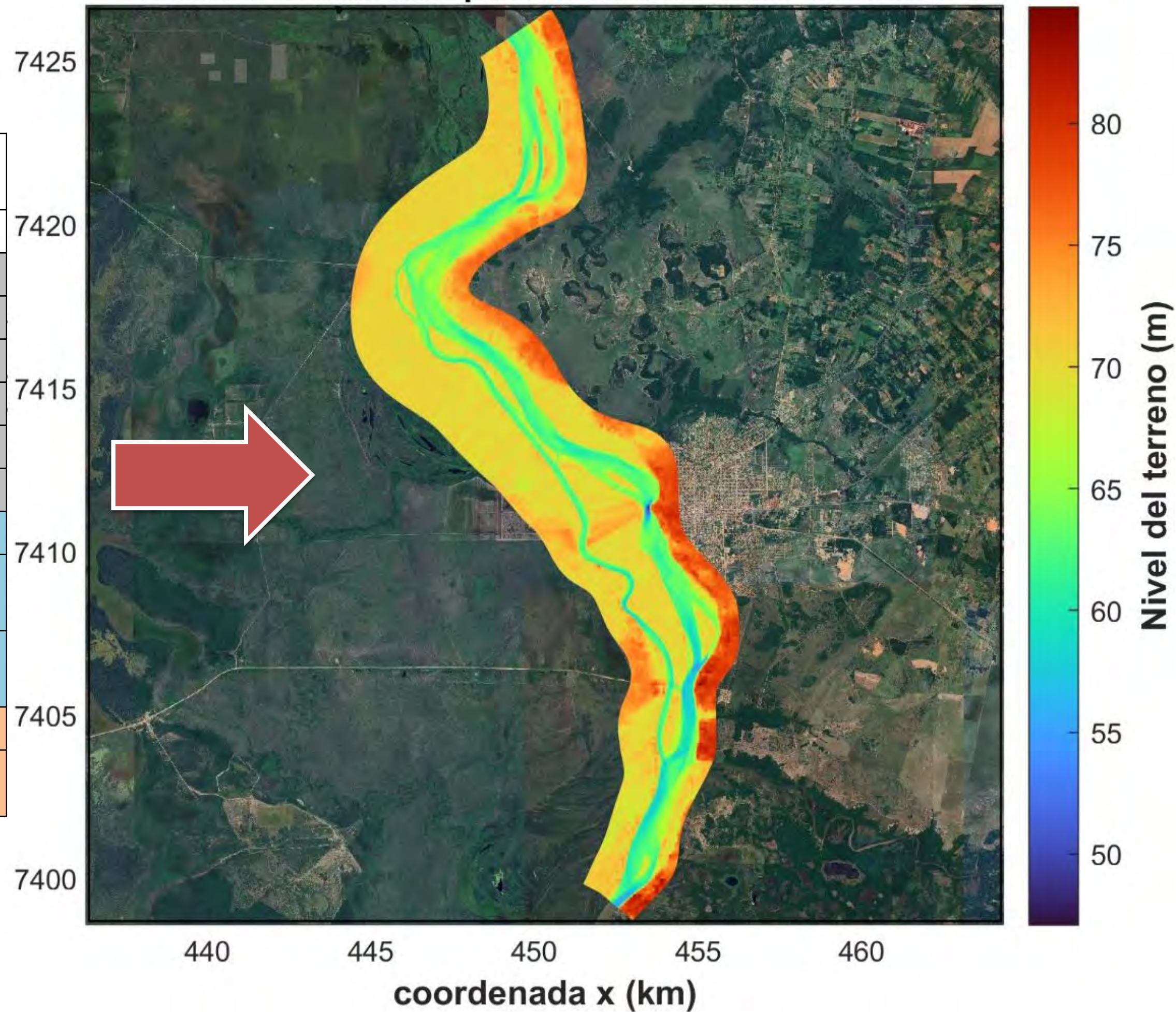


Dominio del Modelo de estudio



	MERIT DEM SRTM	1987-2017	Yamazaki, D.
	ALOS PALSAR	2007-2010	JAXA
LINEA BASE	La Bretona	23-02-2024	Latincomp
	Guggiari	23-04-2024	Serman
	La Bretona	01-07-2024	Latincomp
	Guggiari	18-05-2024	Serman
	Vuelta Militar (I, II)	19-05-2024	Serman
	La Bretona	21-05-2024	Serman
PRE DRAGADO	La Bretona	13-01-2025	Ambilev
	Vuelta Militar	06-02-2025	Latincomp
	La Bretona	06-02-2025	Latincomp
POS DRAGADO	Vuelta Militar	25-10-2025	Latincomp
	La Bretona	11-11-2025	Latincomp

Batimetria utilizada para el modelo hidrodinamico



4 Calibración y Validación

Colocación de Reglas

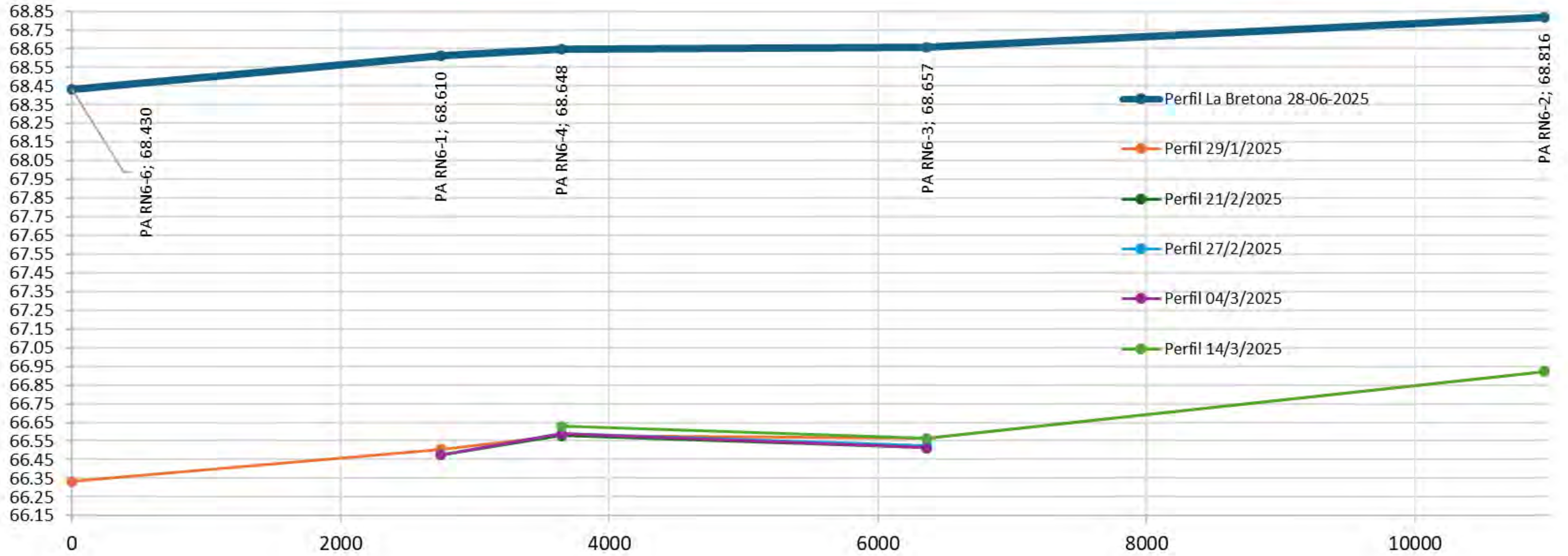


4 dic 2024 14:3
21K 447943 741
Altitud:8
Velocidad:3.2
Número de índice

Colocación de Reglas

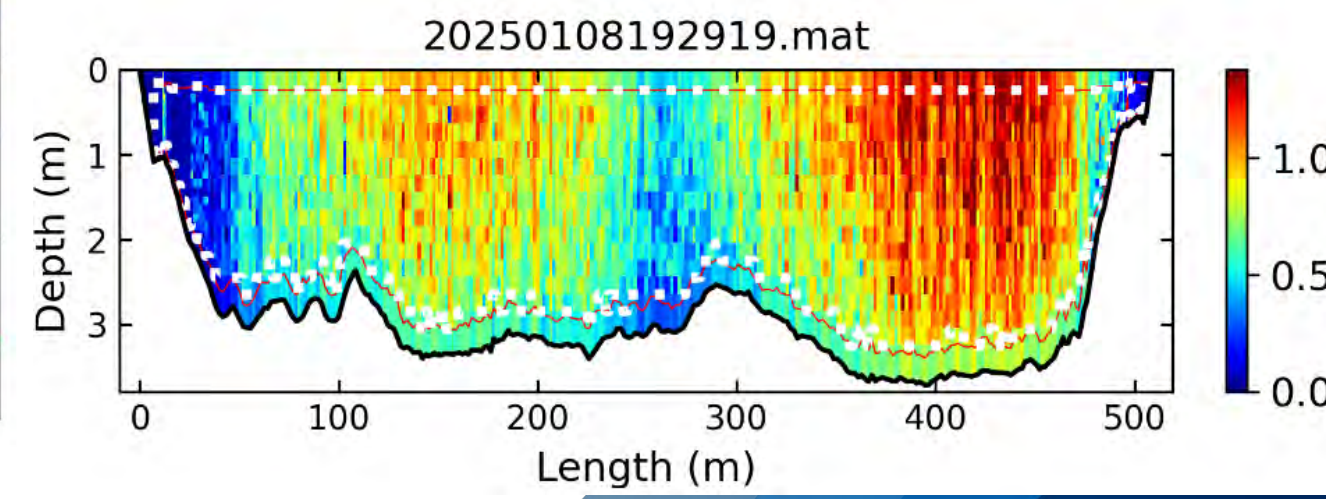
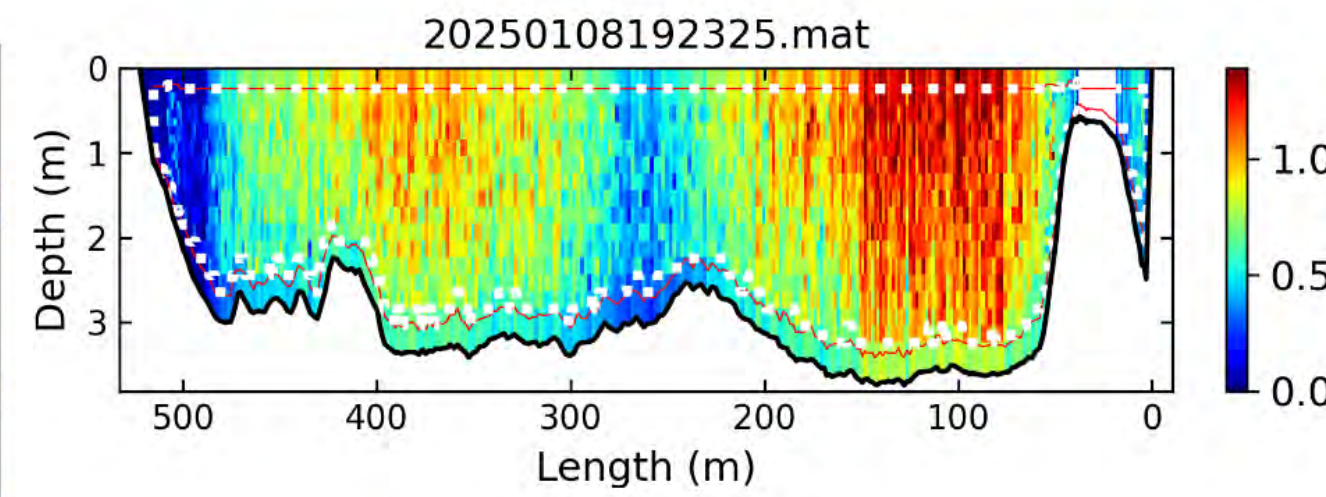
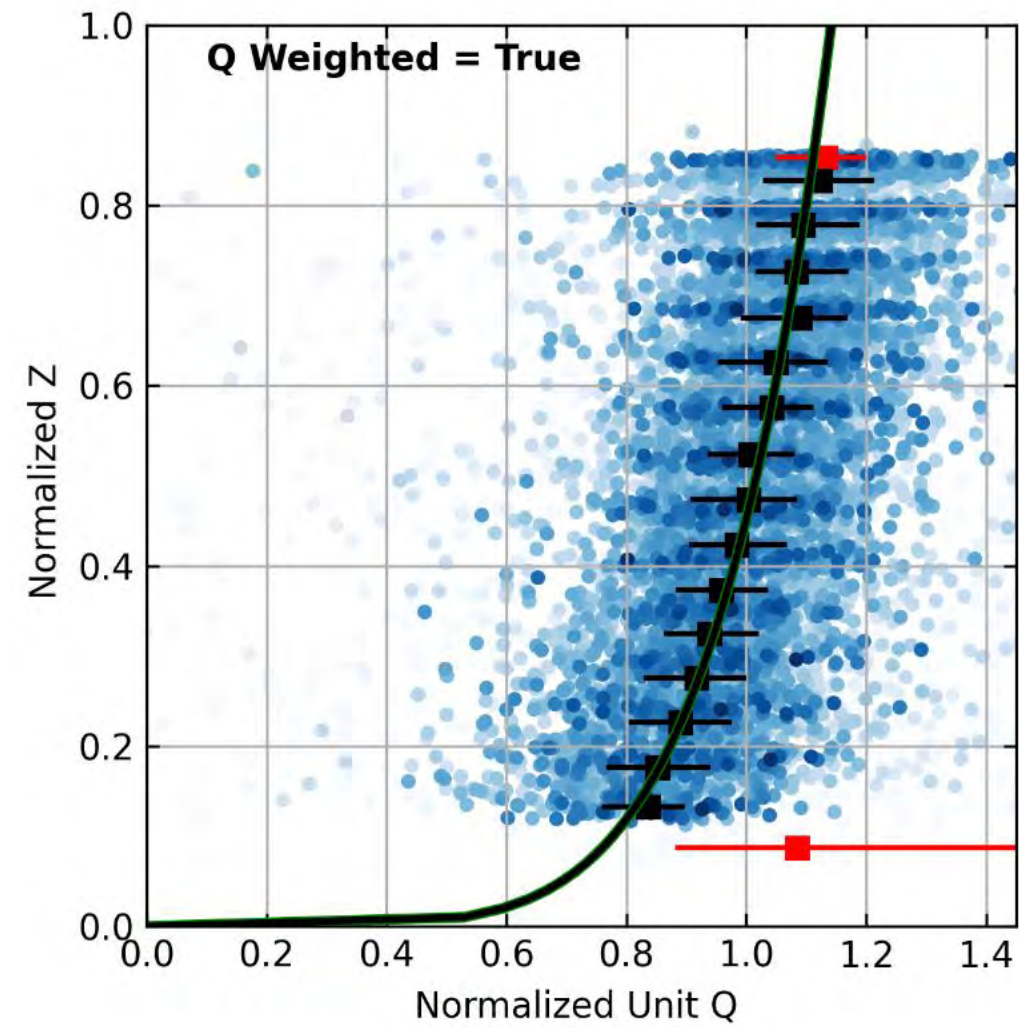


Perfiles Hidráulicos La Bretona



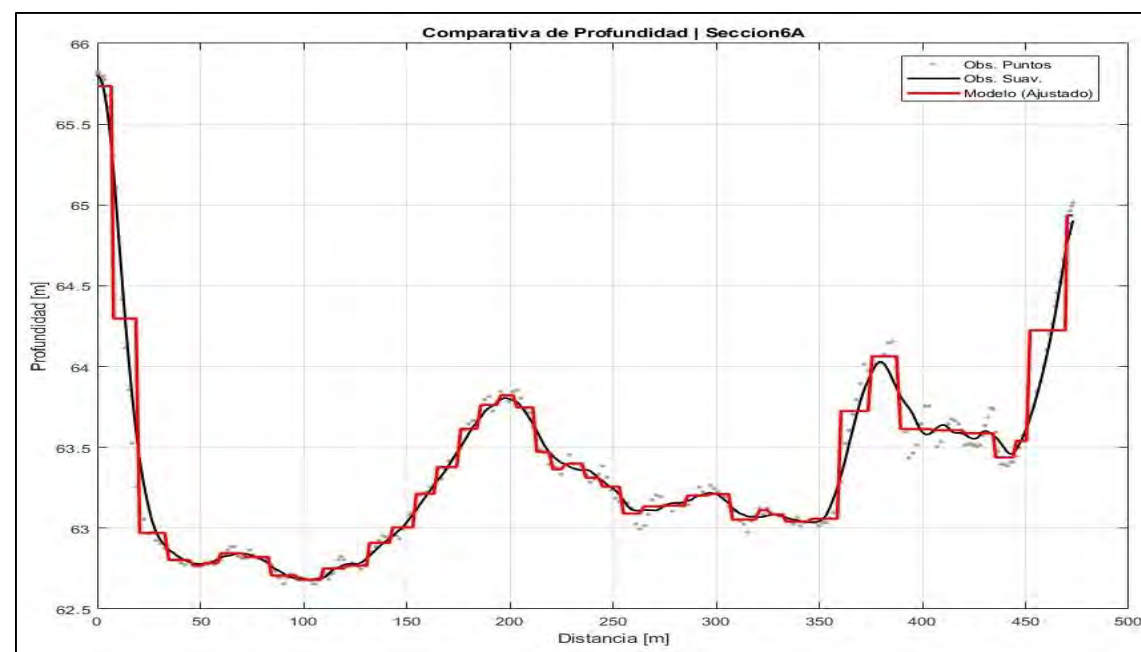
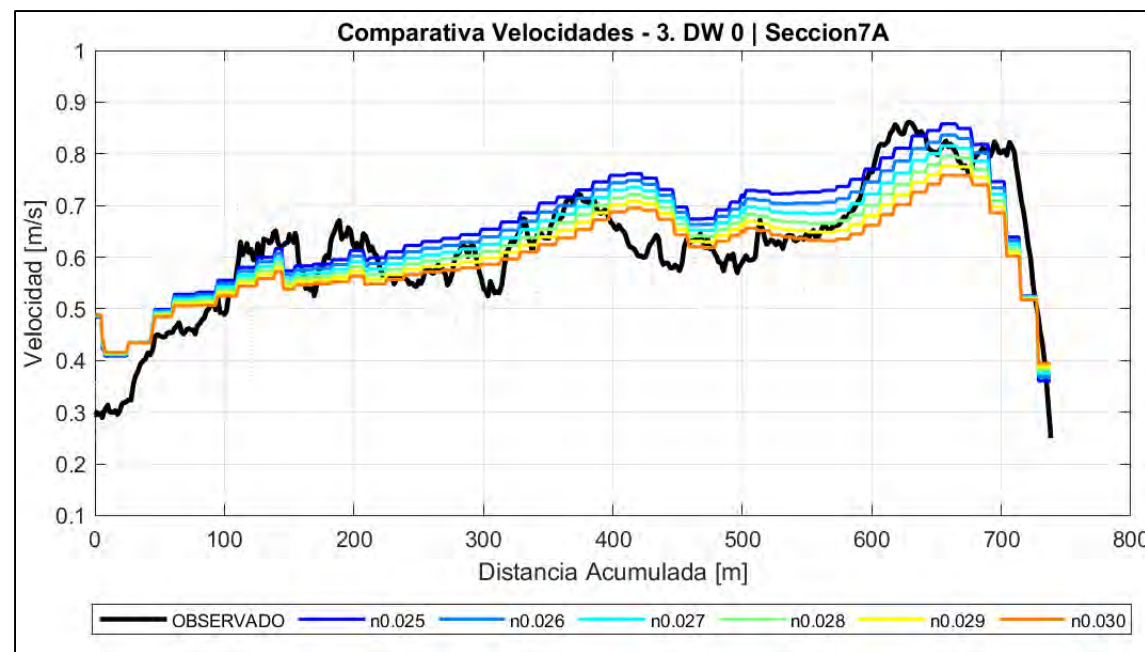
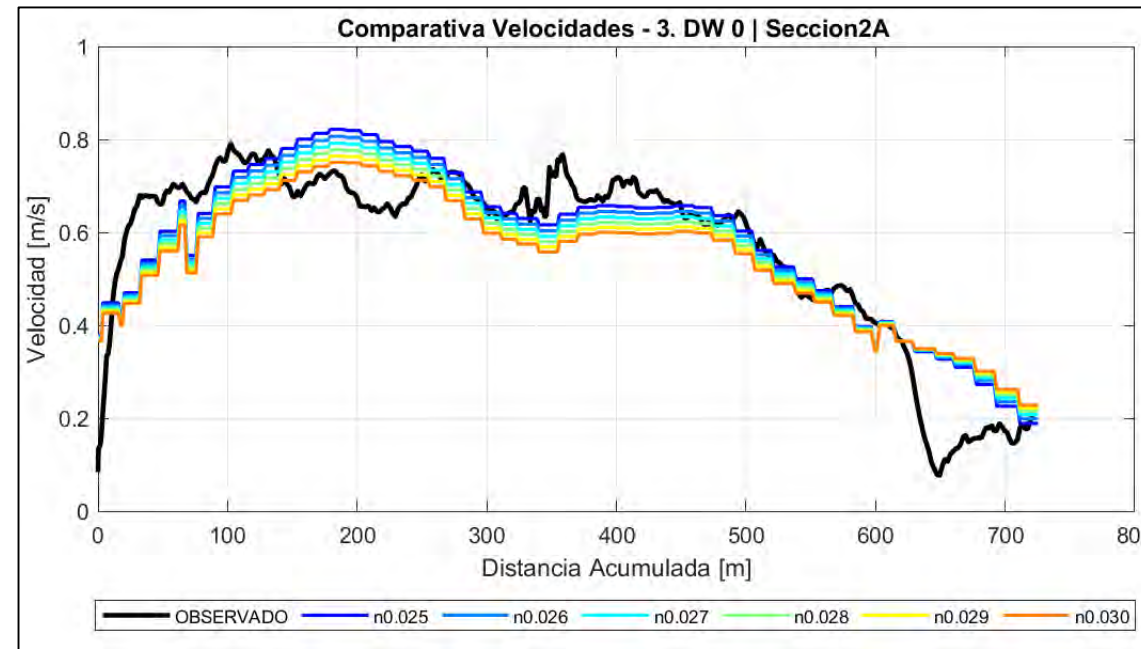
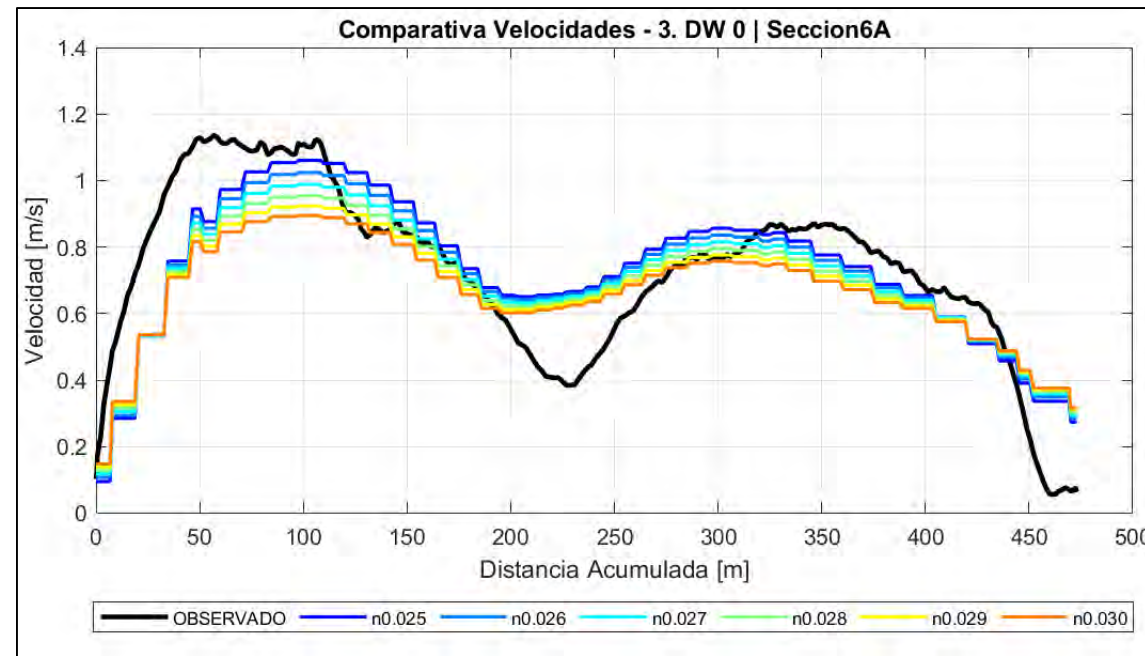
Calibración y validación

Campaña - 08/01/2025 - HydroBock



Calibración

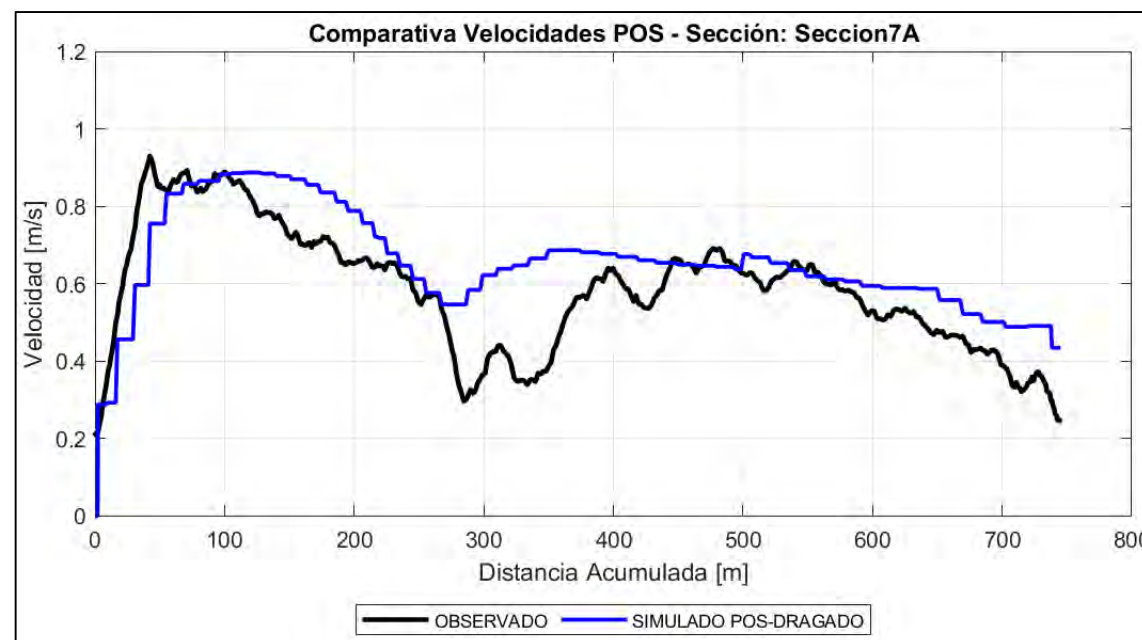
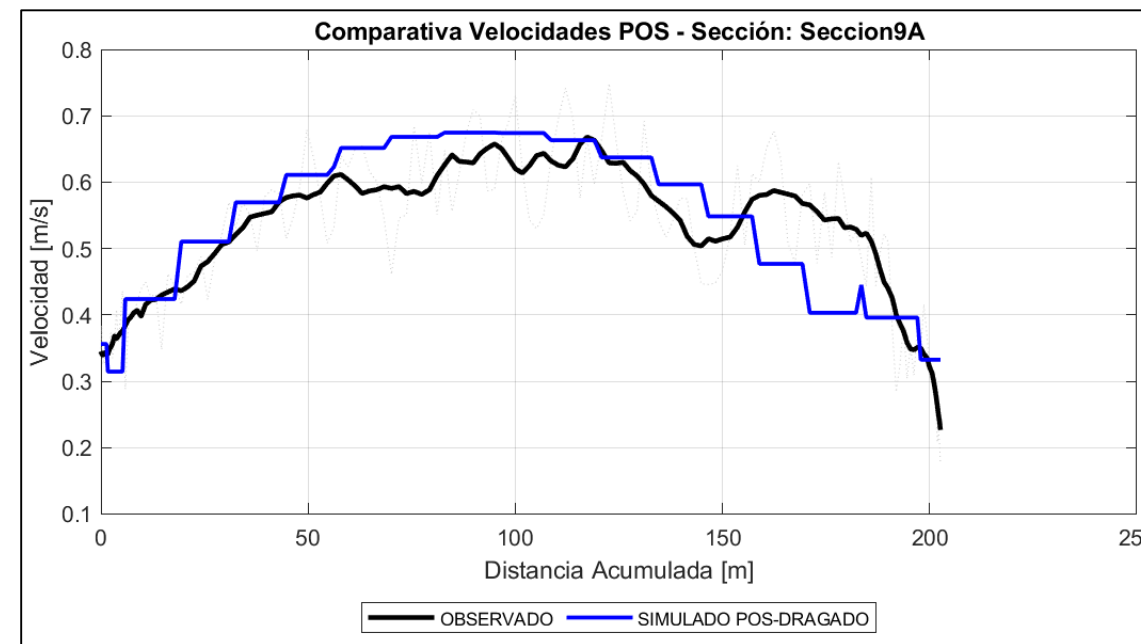
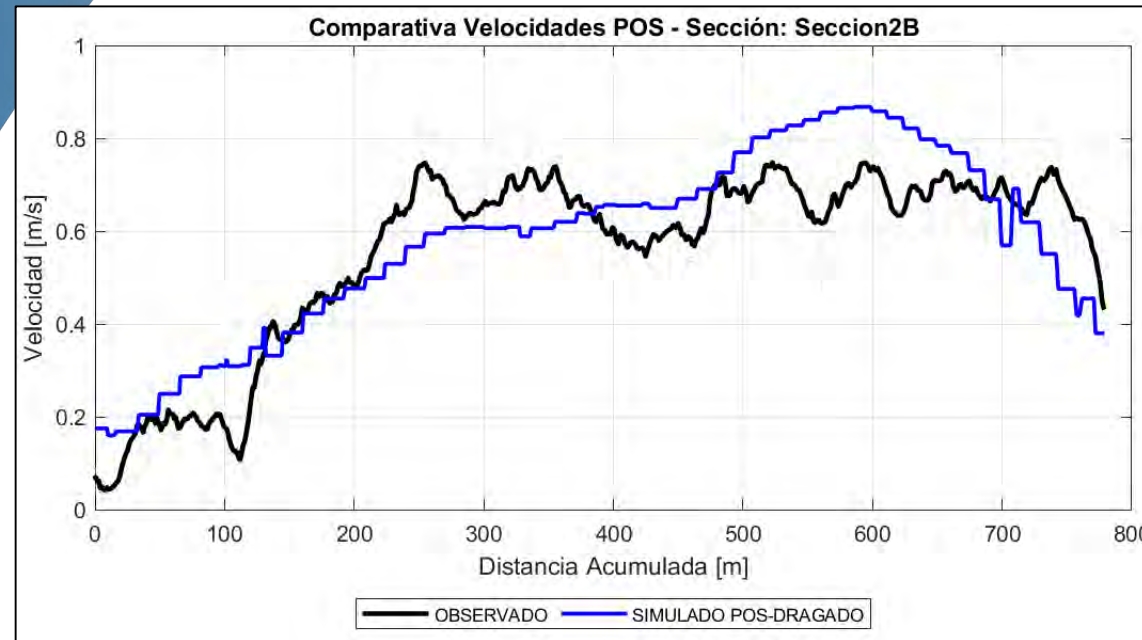
Comparación de velocidades



Sección: Secc02A					
MAE					
n	DW -0.50 (%)	DW -0.25 (%)	DW 0 (%)	DW +0.25 (%)	DW +0.50 (%)
0.025	12.02	12.02	12.05	12.15	12.35
0.026	12.27	12.32	12.40	12.58	12.90
0.027	12.71	12.79	12.93	13.17	13.58
0.028	13.31	13.41	13.58	13.86	14.30
0.029	13.98	14.10	14.29	14.59	15.04
0.030	14.69	14.81	15.02	15.33	15.81
RMSE					
n	DW -0.50 (%)	DW -0.25 (%)	DW 0 (%)	DW +0.25 (%)	DW +0.50 (%)
0.025	16.41	16.37	16.34	16.31	16.35
0.026	16.45	16.44	16.46	16.53	16.69
0.027	16.66	16.70	16.76	16.90	17.17
0.028	17.03	17.09	17.21	17.40	17.74
0.029	17.53	17.61	17.76	18.01	18.41
0.030	18.12	18.23	18.41	18.69	19.14
KGE					
n	DW -0.50 (%)	DW -0.25 (%)	DW 0 (%)	DW +0.25 (%)	DW +0.50 (%)
0.025	20.10	20.29	20.63	21.17	22.01
0.026	21.94	22.16	22.49	23.02	23.83
0.027	23.76	23.95	24.31	24.85	25.71
0.028	25.55	25.77	26.13	26.70	27.53
0.029	27.34	27.57	27.93	28.51	29.34
0.030	29.09	29.33	29.70	30.26	31.08

Validación

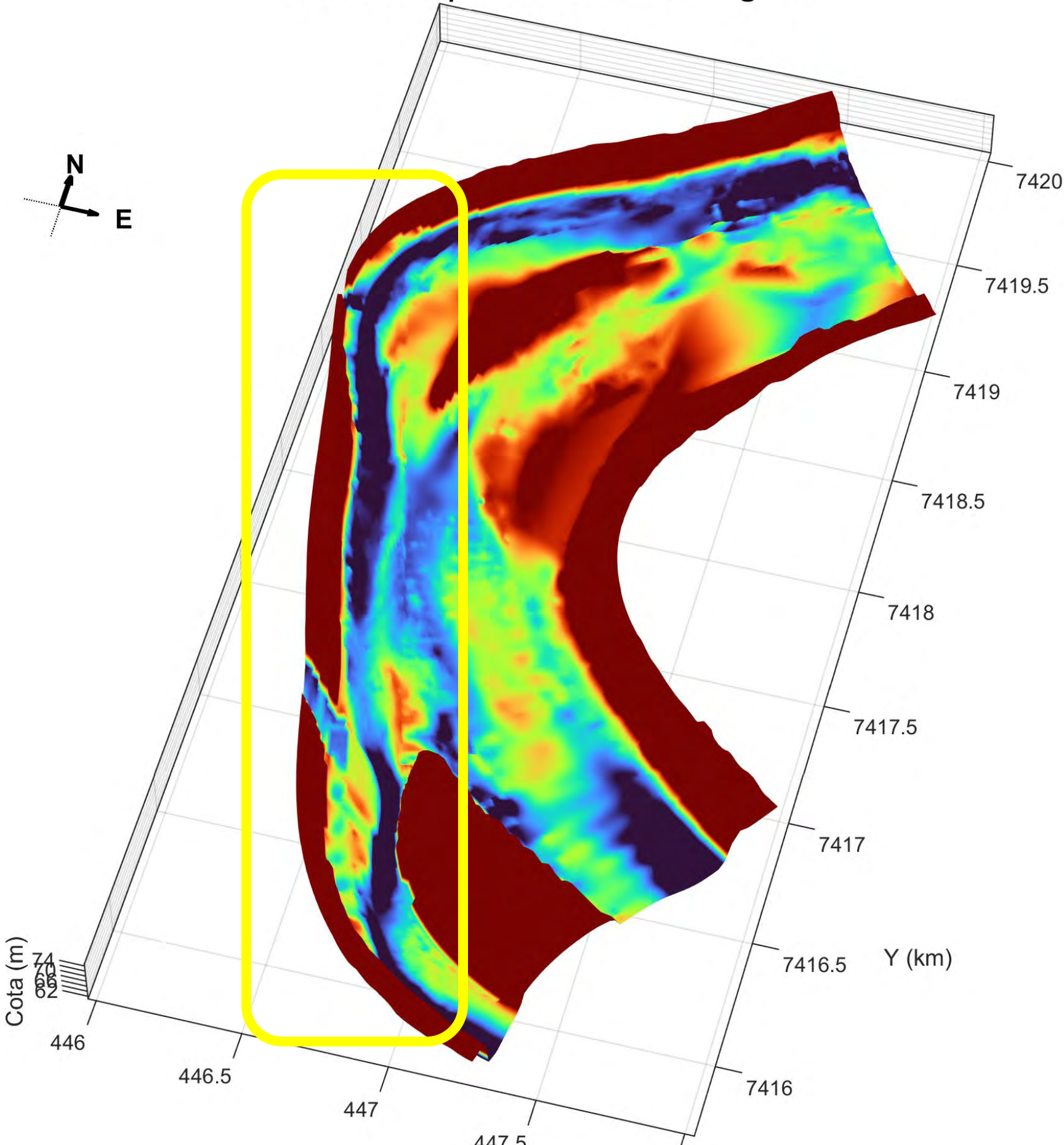
Comparación de velocidades



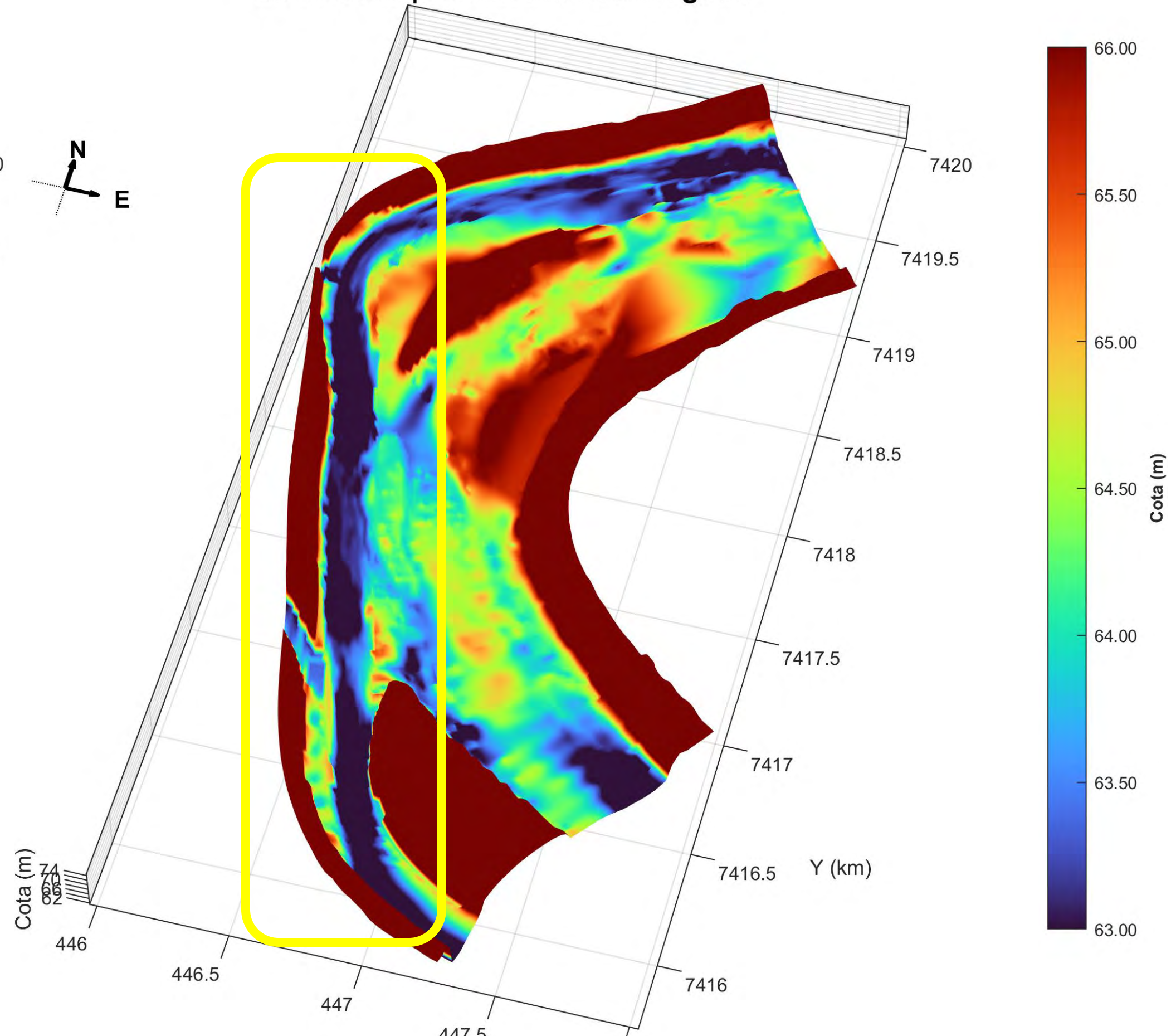
Sección	MAE (%)	RMSE (%)	KGE (%)
S1A	19.51	27.65	50.32
S1B	25.37	32.28	56.40
S1C	27.51	35.41	57.86
S2A	19.02	26.42	33.09
S2B	16.93	19.93	15.48
S3A	28.46	33.21	42.41
S3B	32.67	37.55	53.02
S4A	82.94	88.50	91.58
S4B	77.31	81.22	80.09
S5A	35.53	47.17	63.60
S5B	40.60	50.73	46.37
S6A	33.16	36.72	28.94
S6B	31.65	33.61	32.17
S7A	17.86	22.57	28.02
S7B	16.25	21.24	33.83
S8A	21.55	27.64	59.51
S8B	21.60	27.83	64.98
S9A	9.27	11.74	15.81
S9B	10.44	12.09	36.01

Análisis de datos observados

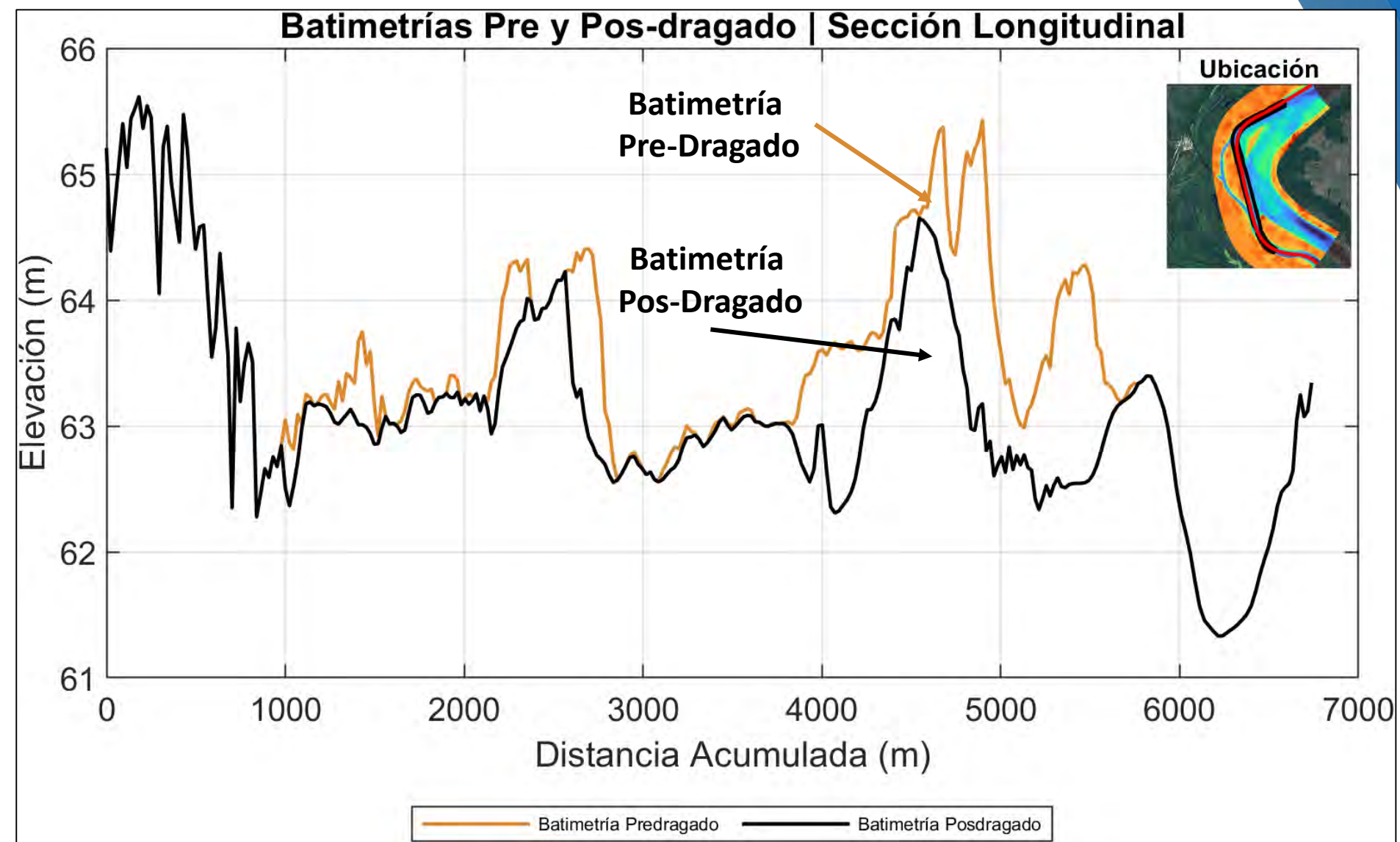
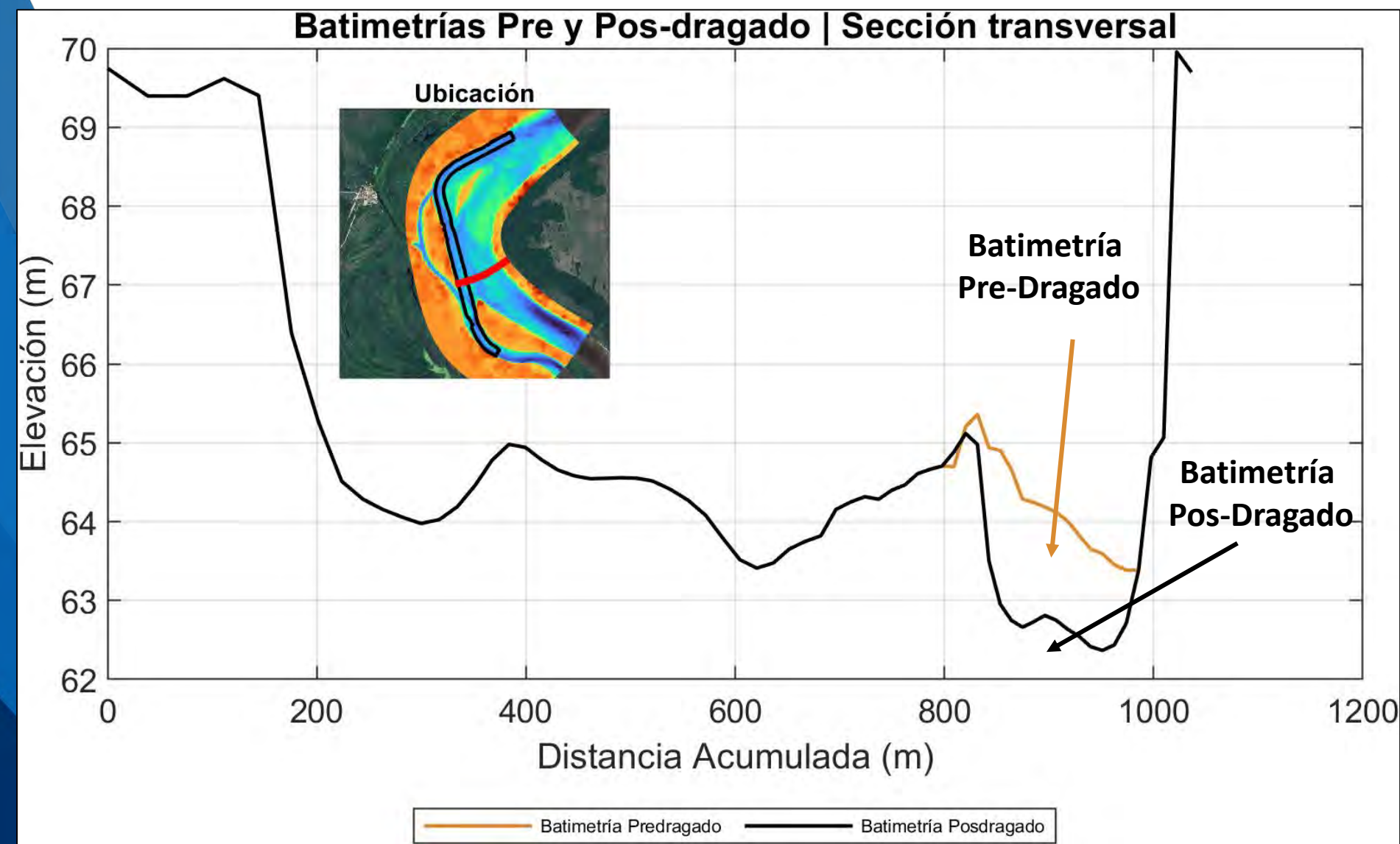
La Bretona | Batimetría Pre-dragado



La Bretona | Batimetría Pos-dragado



Análisis de datos observados



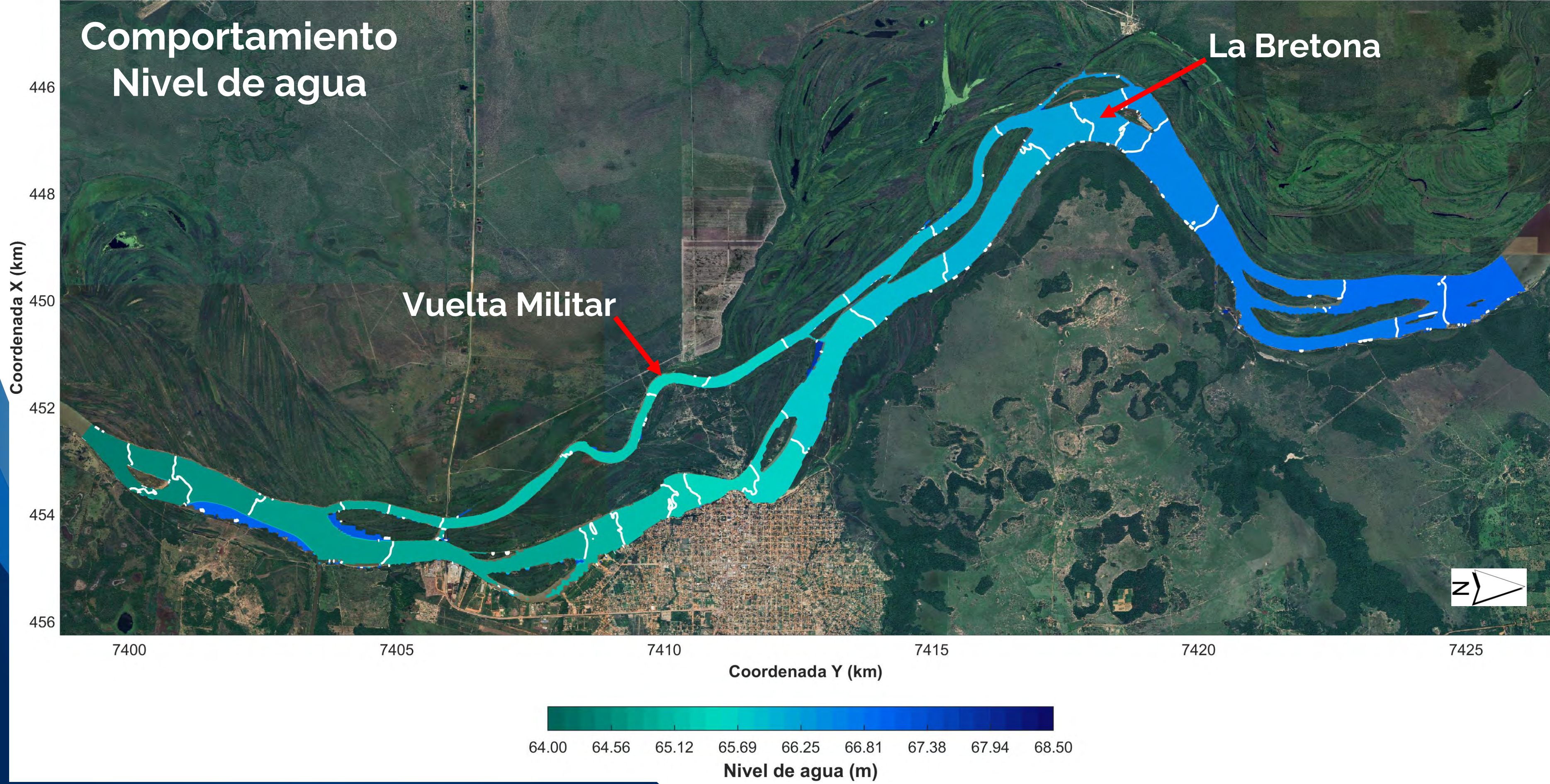
5 Resultados

Modelación Hidrodinámica

Nivel de Agua

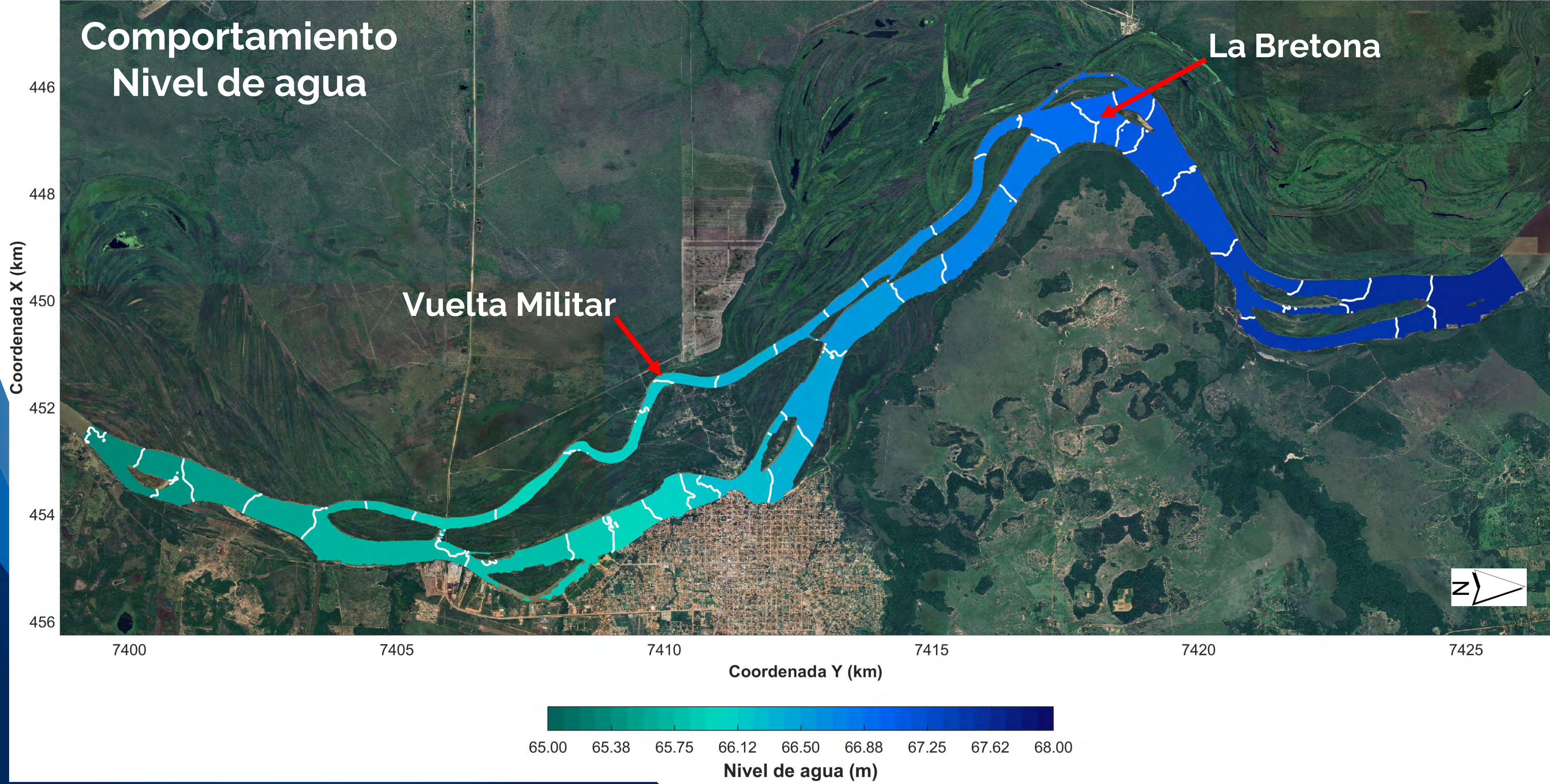
Resultados Hidrodinámicos

Escenario Pre-Dragado | Nivel de Agua (Q = 1250 m³/s)



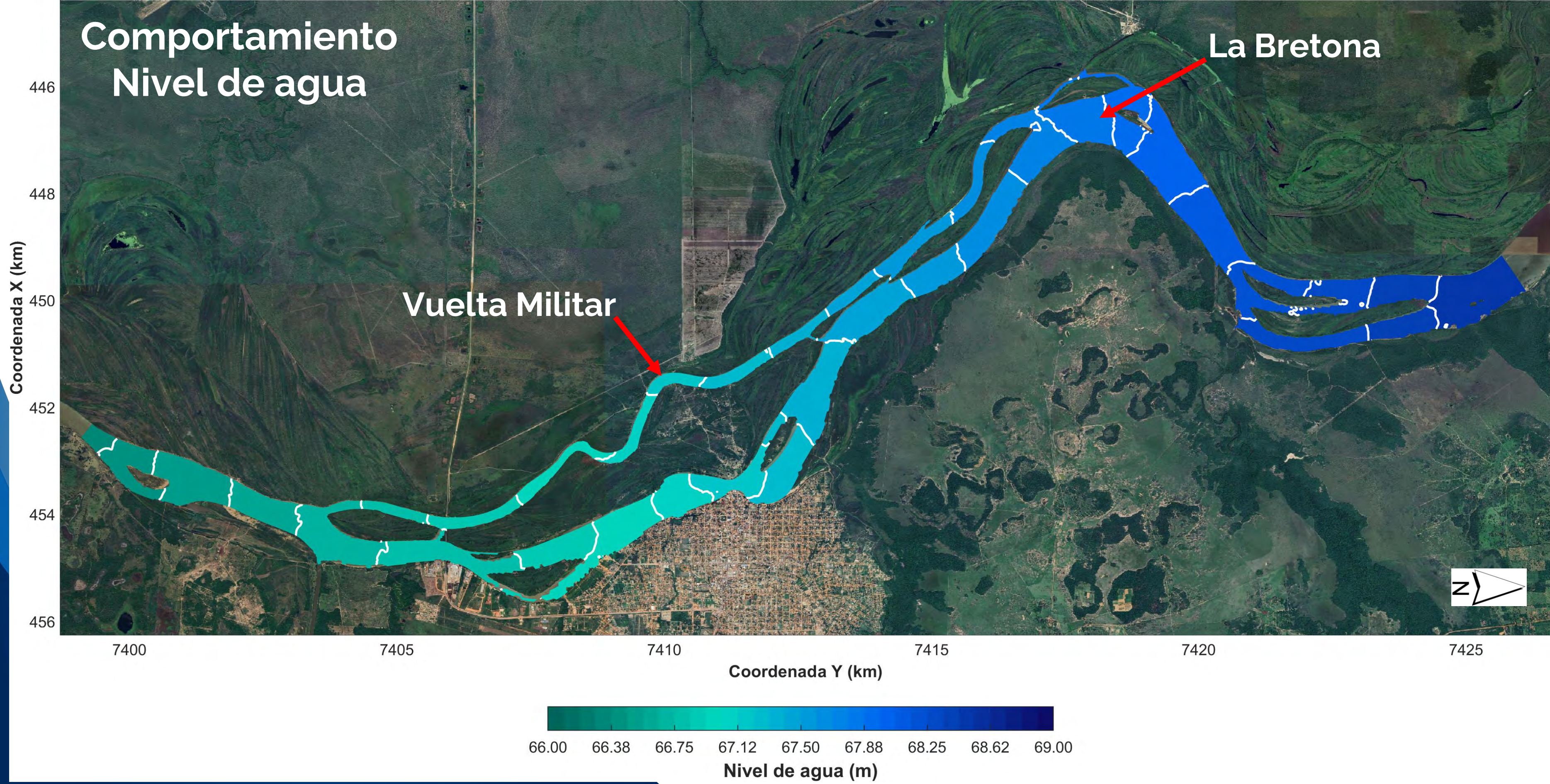
Resultados Hidrodinámicos

Escenario Pre-Dragado | Nivel de Agua (Q = 1870 m³/s)



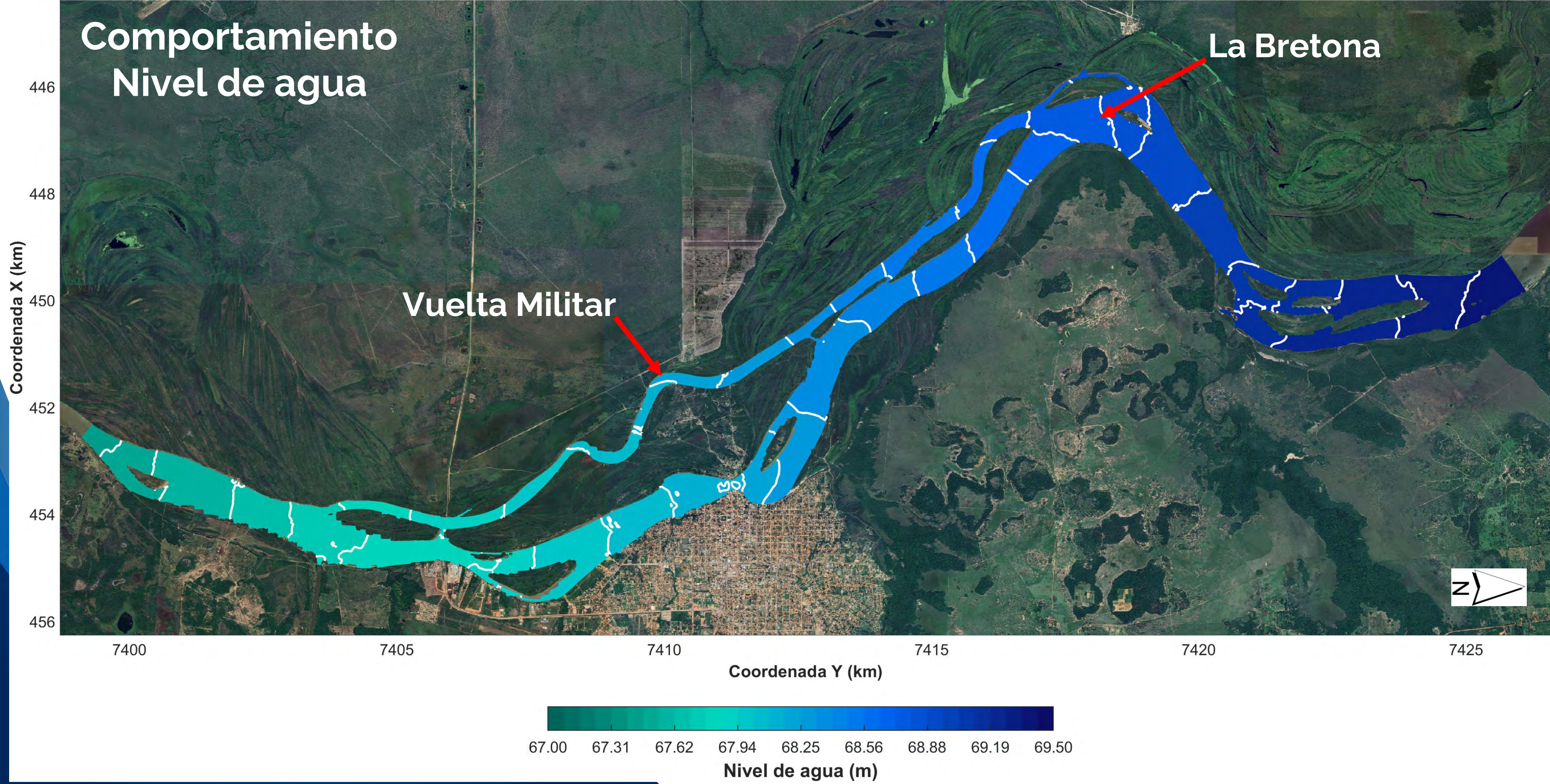
Resultados Hidrodinámicos

Escenario Pre-Dragado | Nivel de Agua (Q = 2630 m³/s)



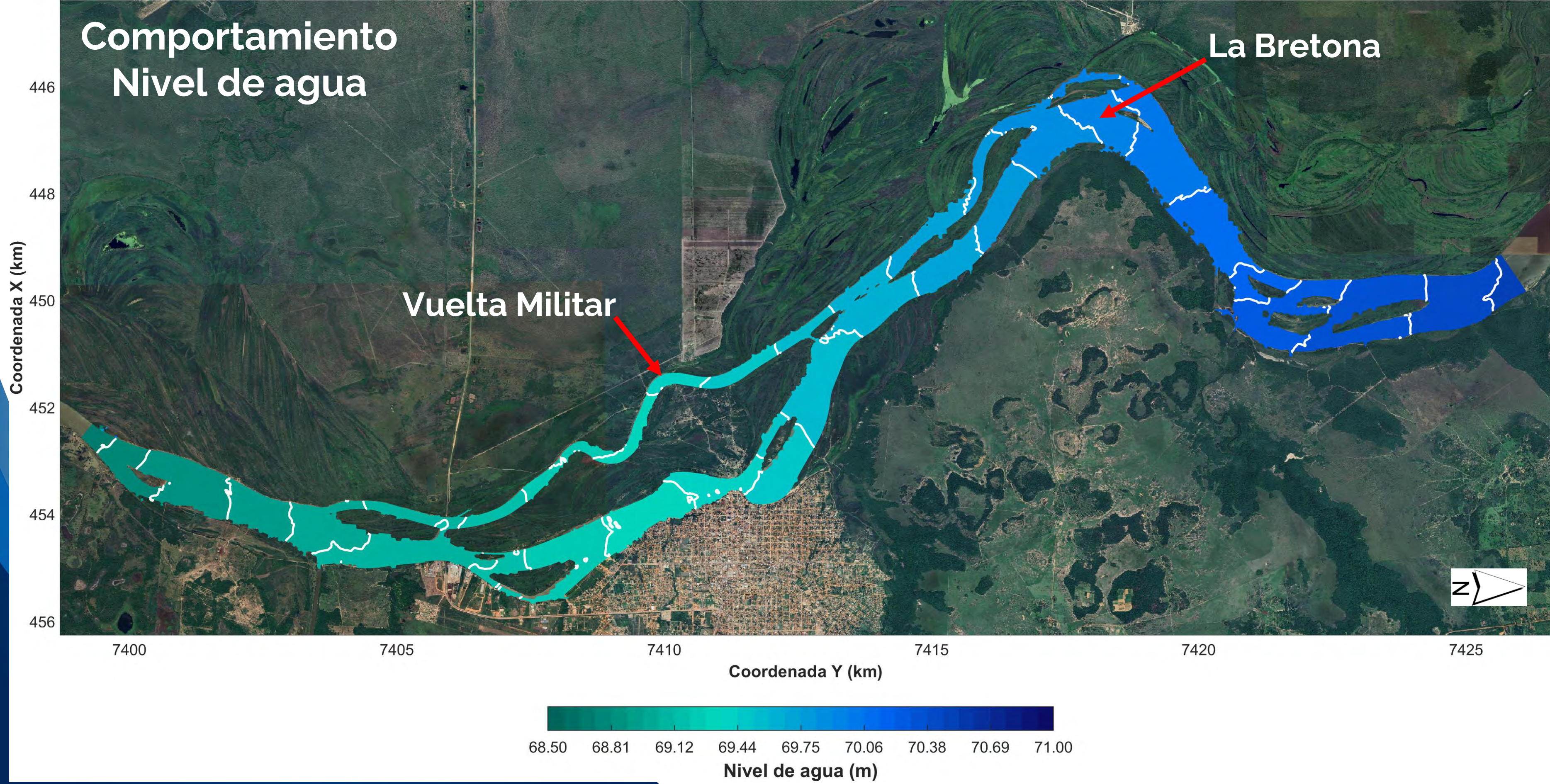
Resultados Hidrodinámicos

Escenario Pre-Dragado | Nivel de Agua (Q = 3470 m³/s)



Resultados Hidrodinámicos

Escenario Pre-Dragado | Nivel de Agua (Q = 4530 m³/s)

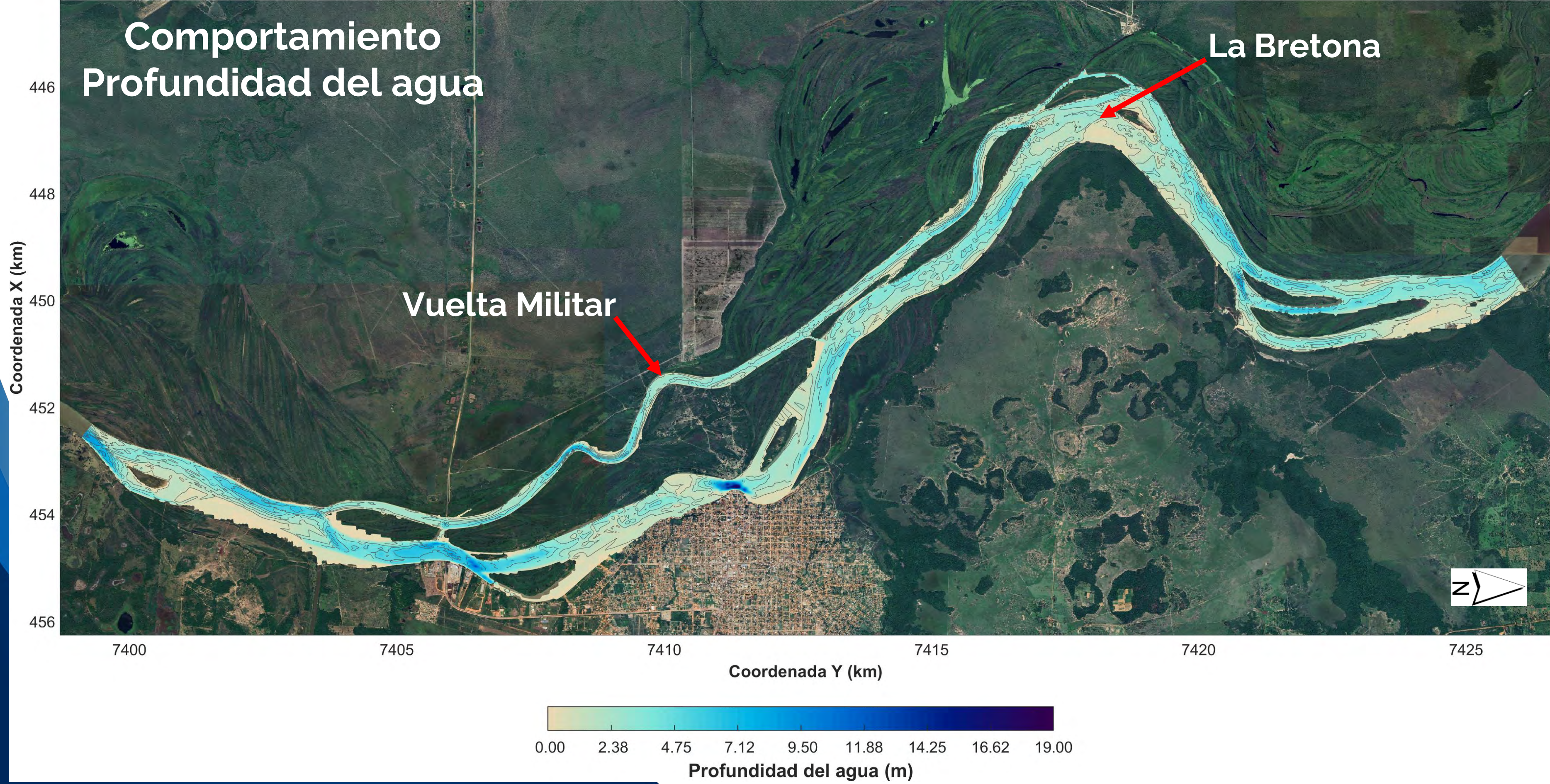


Modelación Hidrodinámica

Profundidad del agua

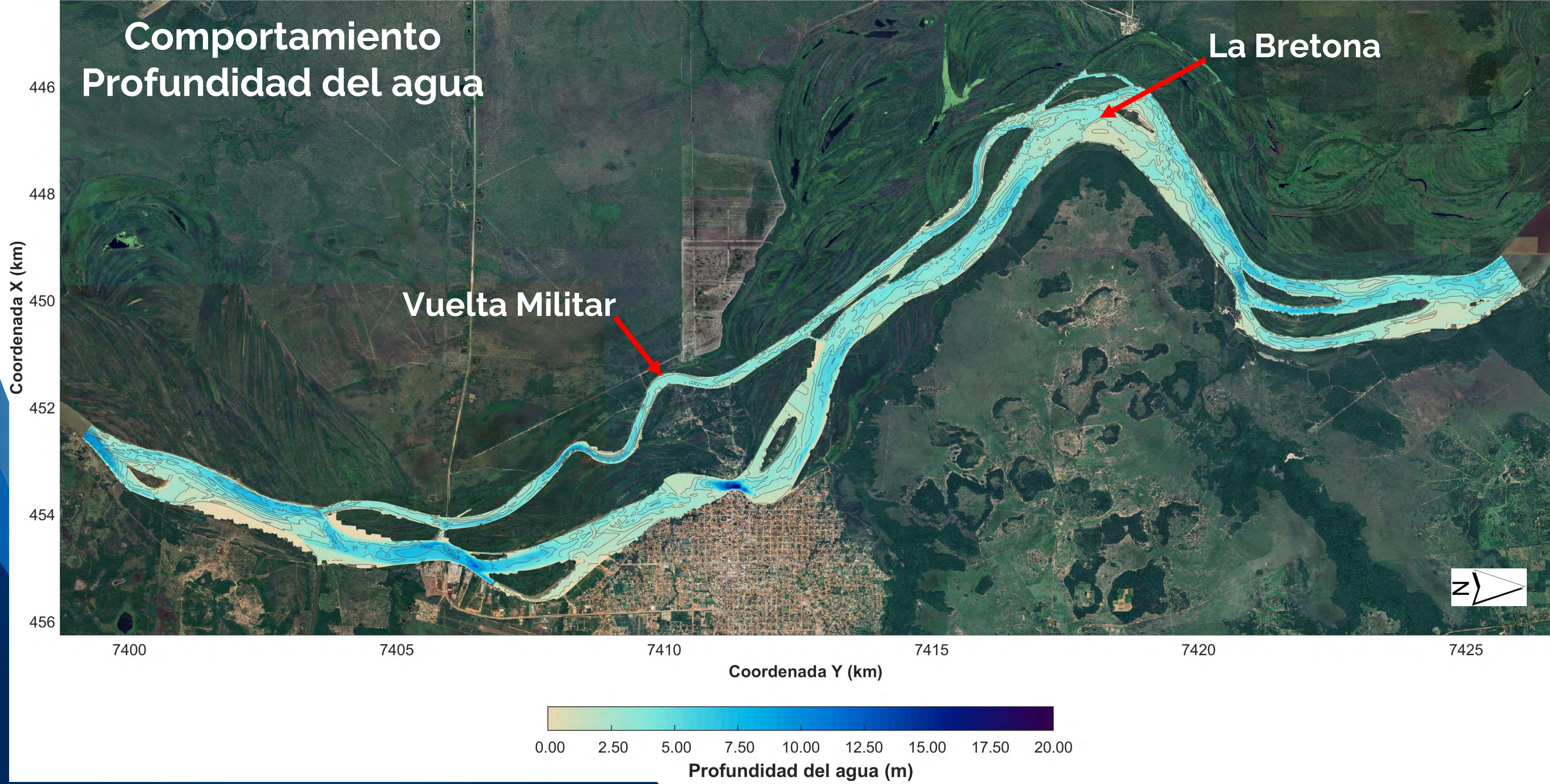
Resultados Hidrodinámicos

Escenario Pre-Dragado | Profundidad del agua (Q = 1250 m³/s)



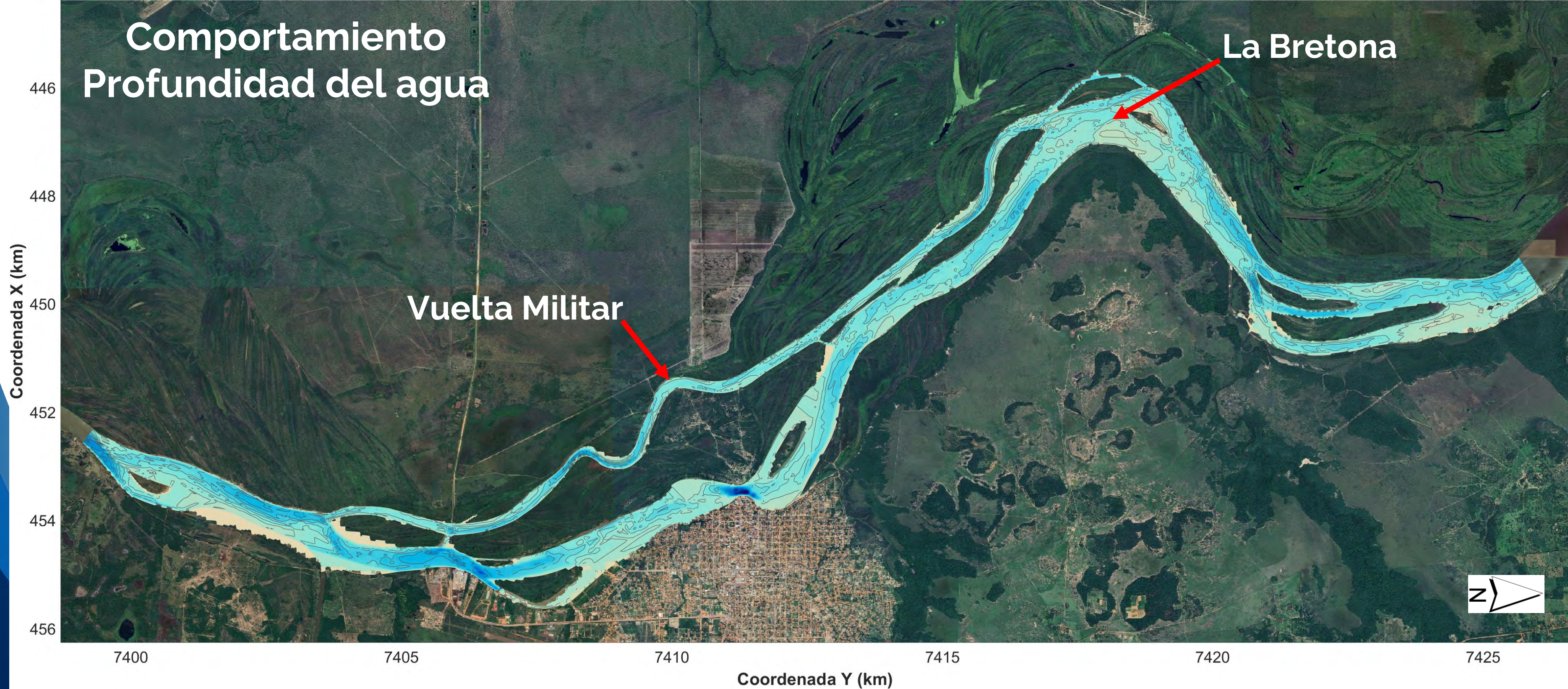
Resultados Hidrodinámicos

Escenario Pre-Dragado | Profundidad del agua (Q = 1870 m³/s)



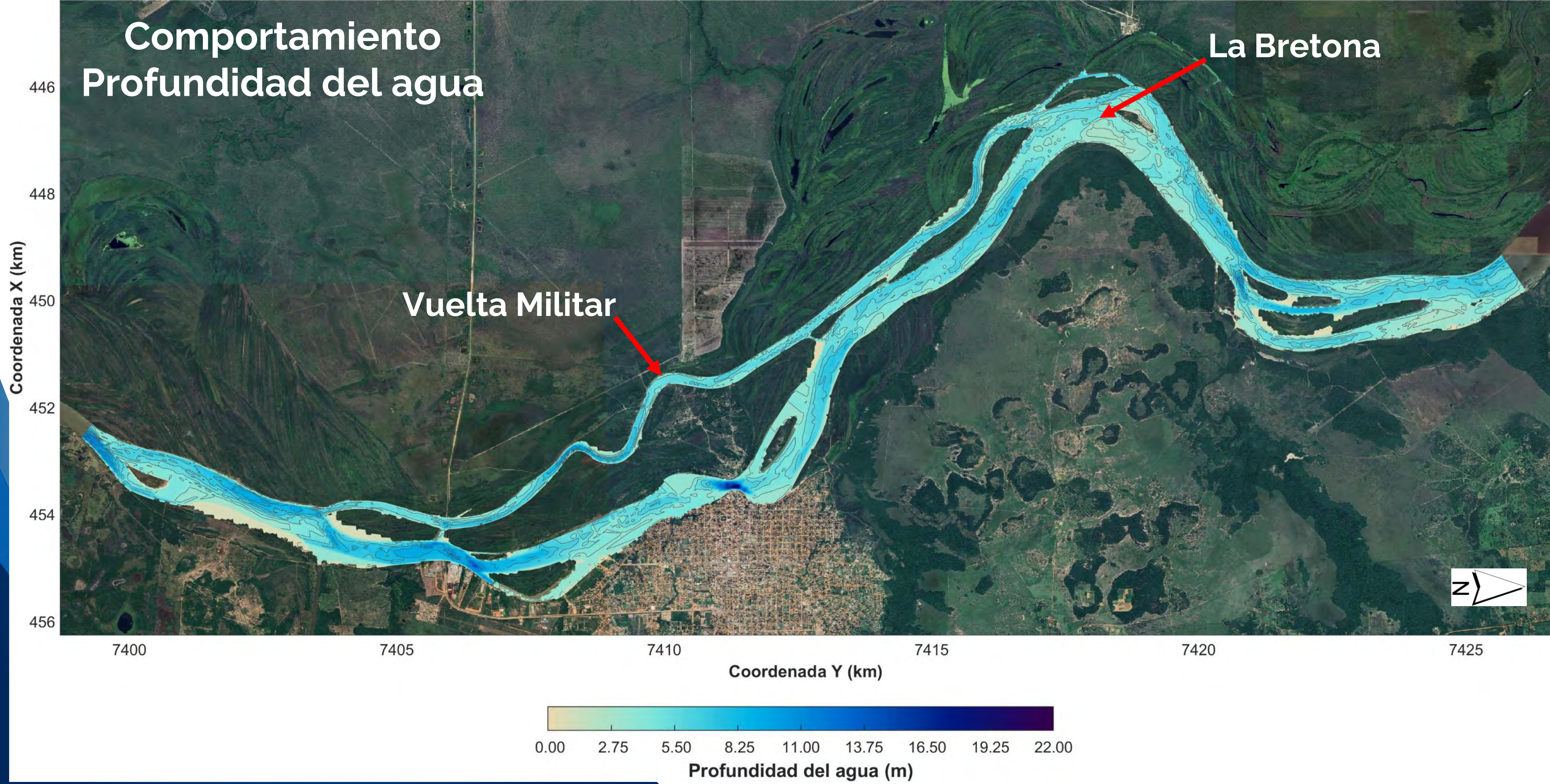
Resultados Hidrodinámicos

Escenario Pre-Dragado | Profundidad del agua (Q = 2630 m³/s)



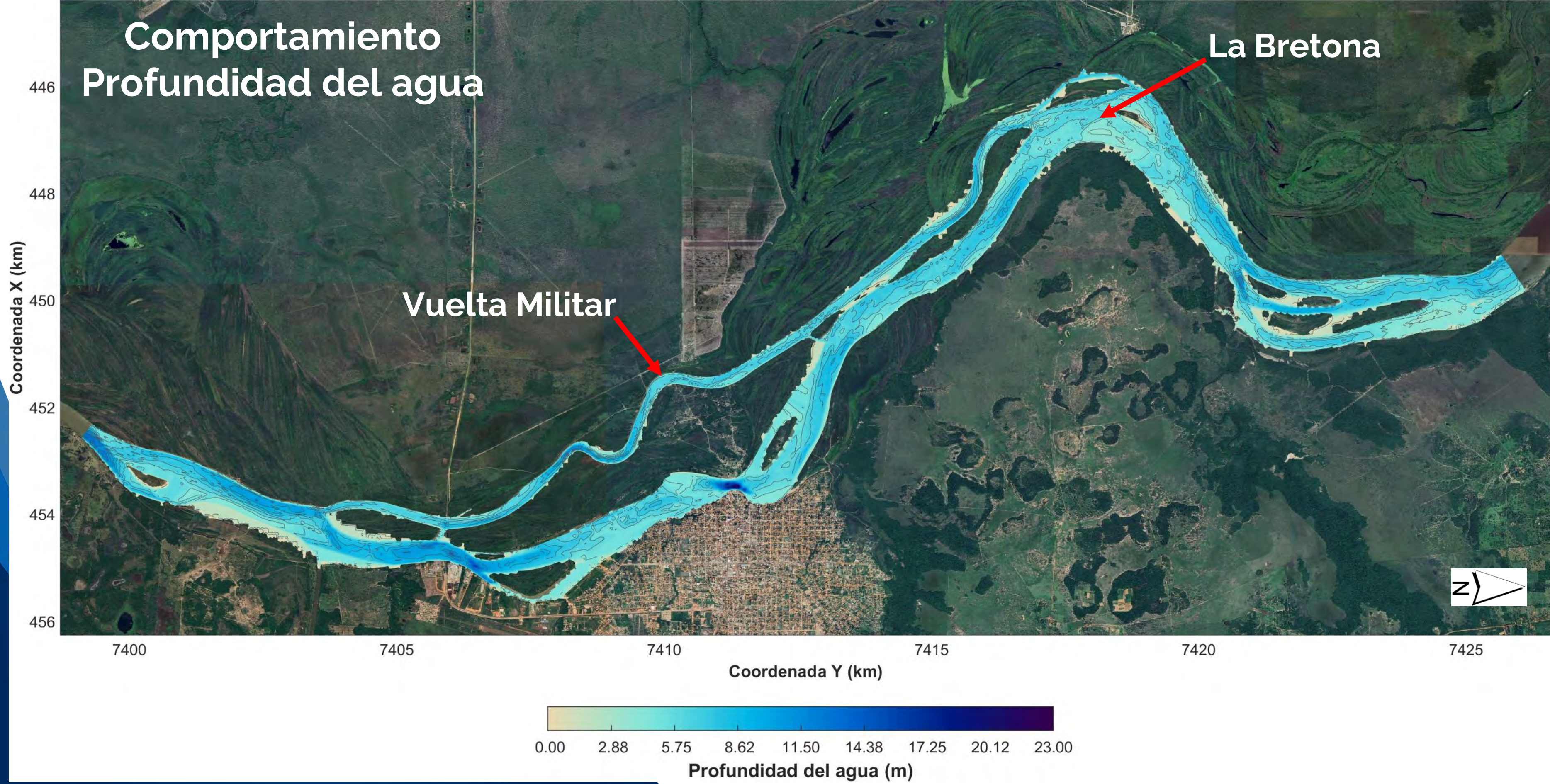
Resultados Hidrodinámicos

Escenario Pre-Dragado | Profundidad del agua ($Q = 3470 \text{ m}^3/\text{s}$)

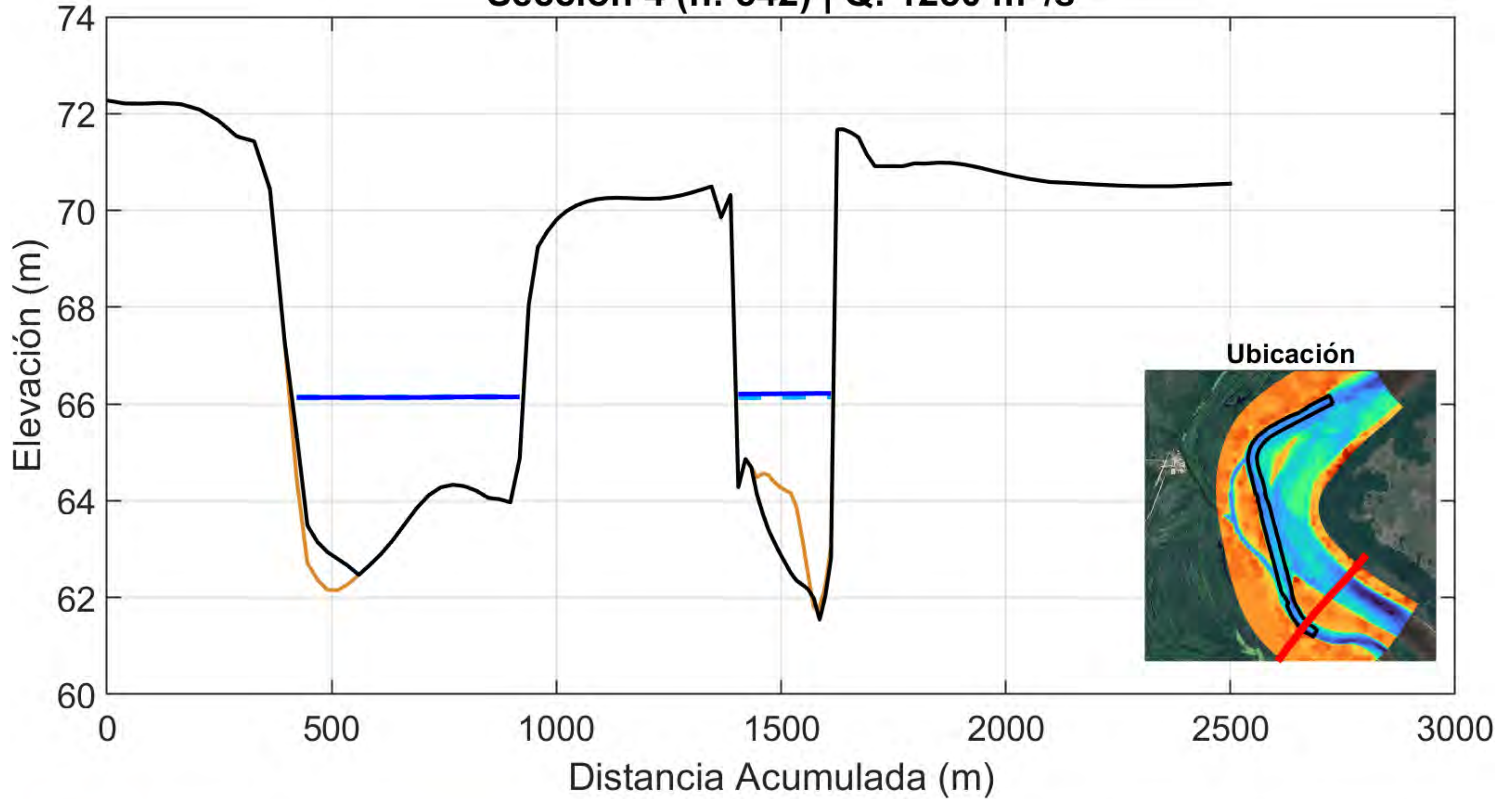


Resultados Hidrodinámicos

Escenario Pre-Dragado | Profundidad del agua (Q = 4530 m³/s)

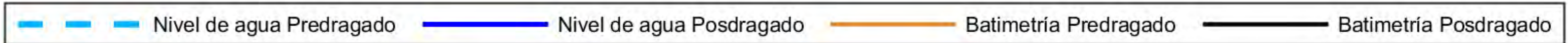
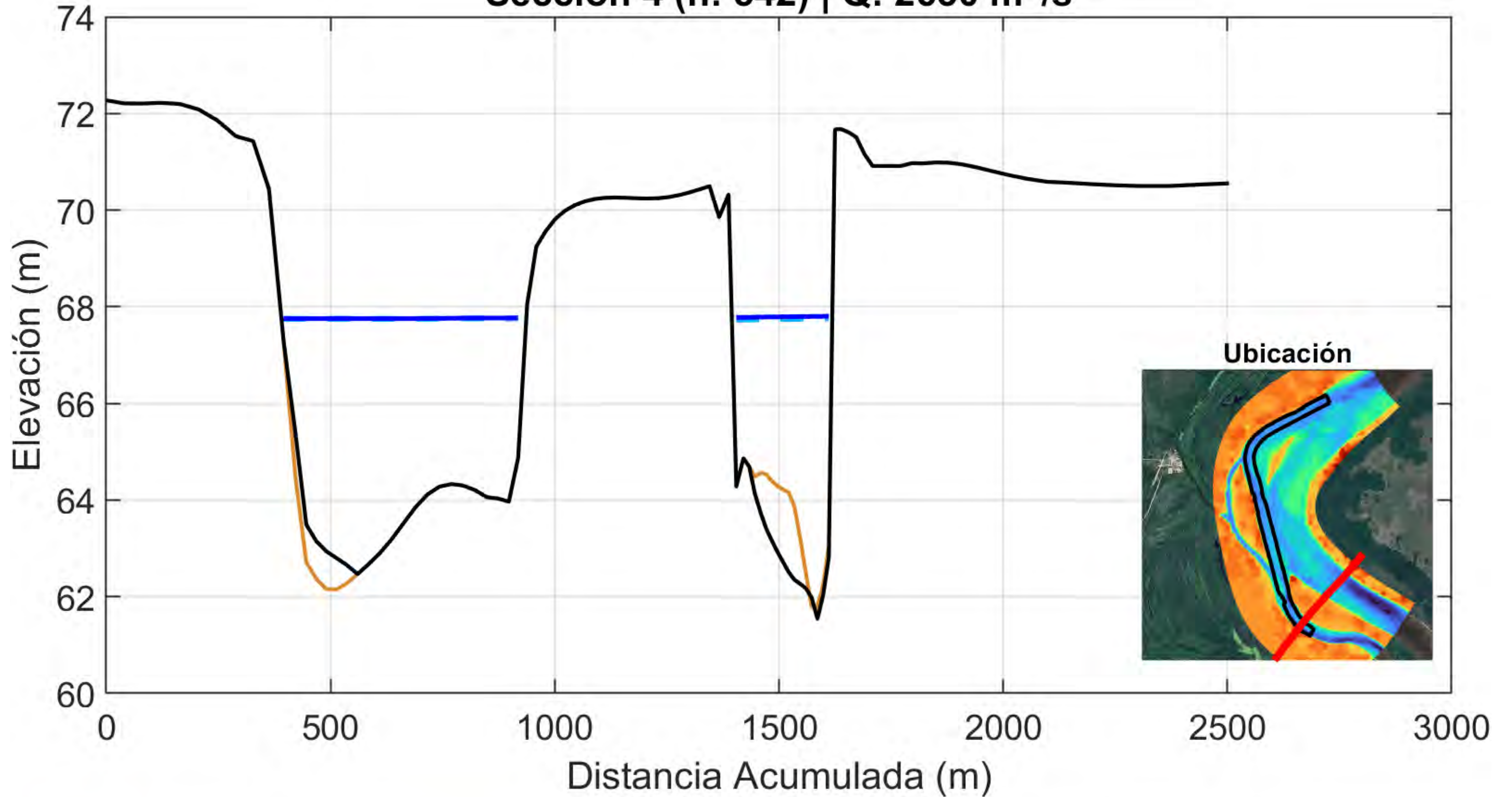


Sección 4 (n: 542) | Q: 1250 m³/s

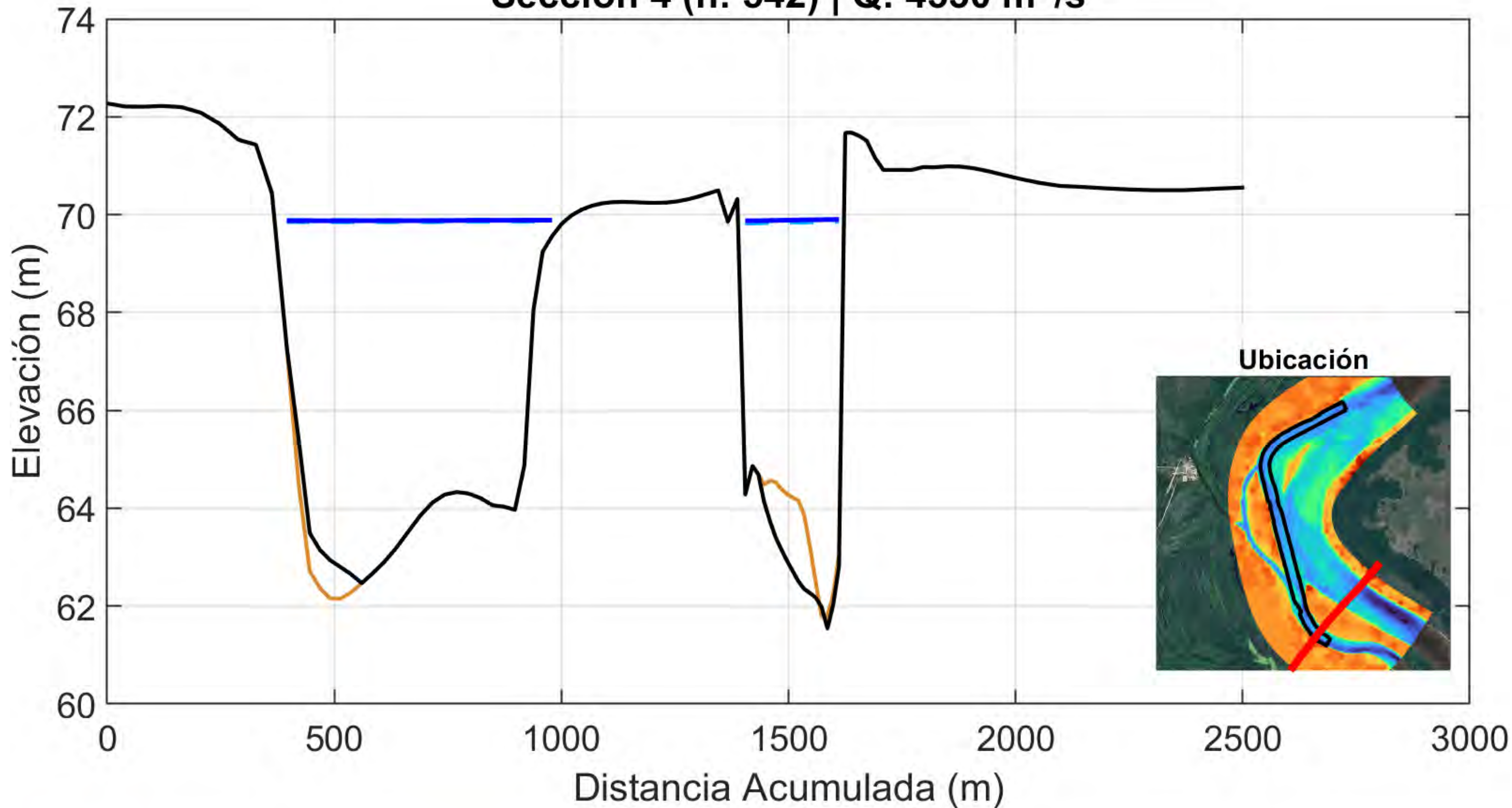


— Batimetría Predragado — Batimetría Posdragado - - - Nivel de agua Predragado — Nivel de agua Posdragado

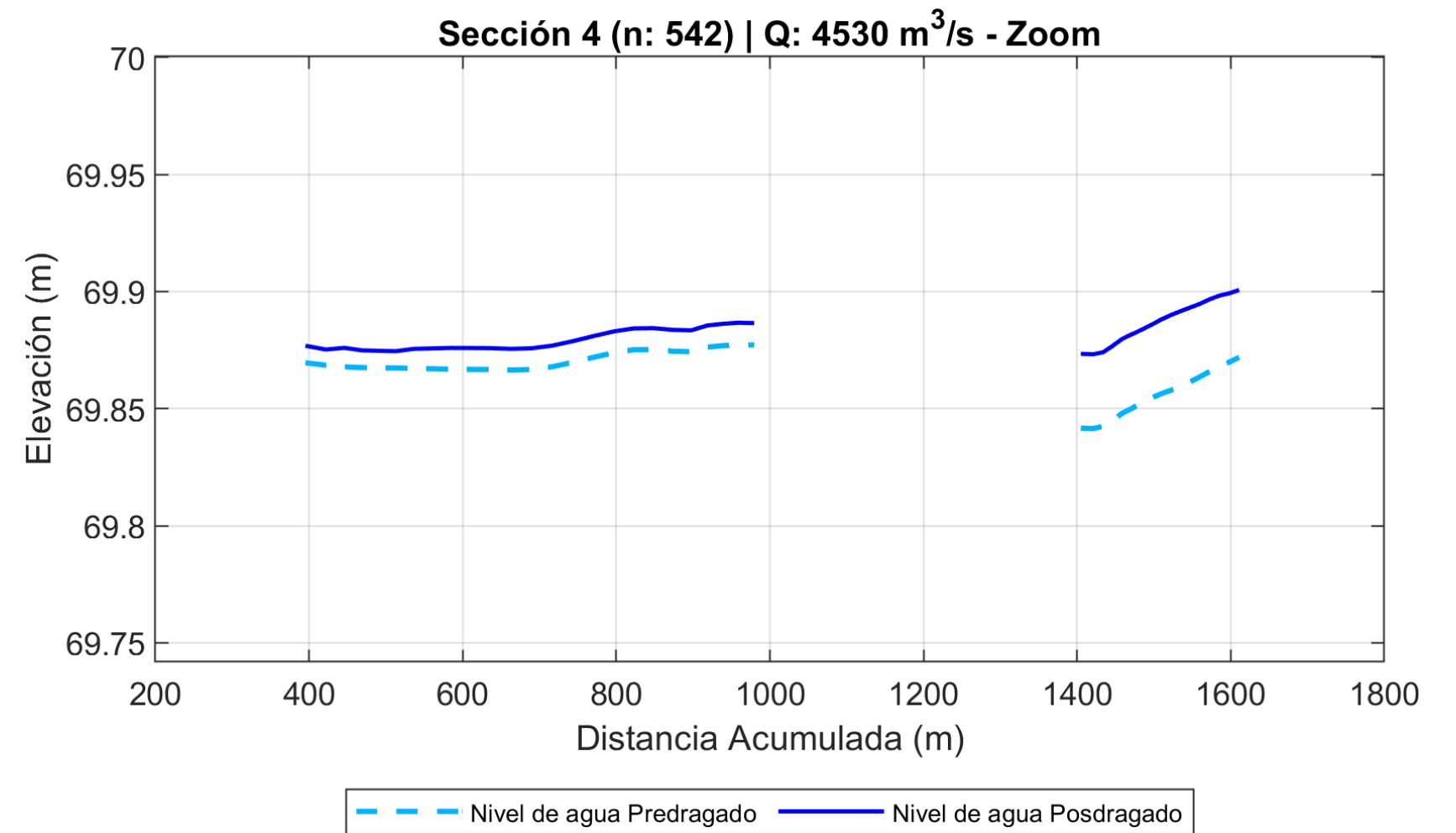
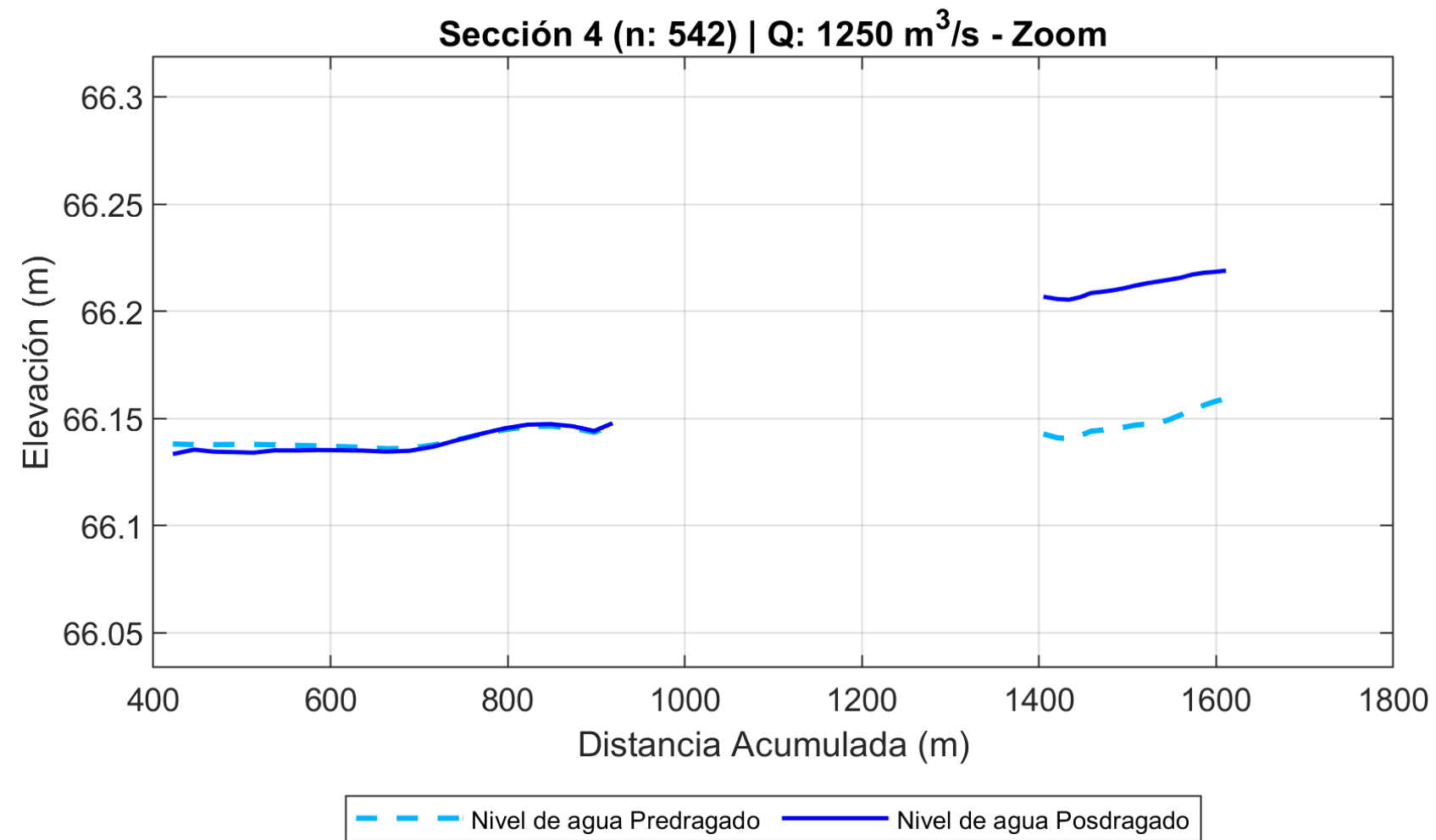
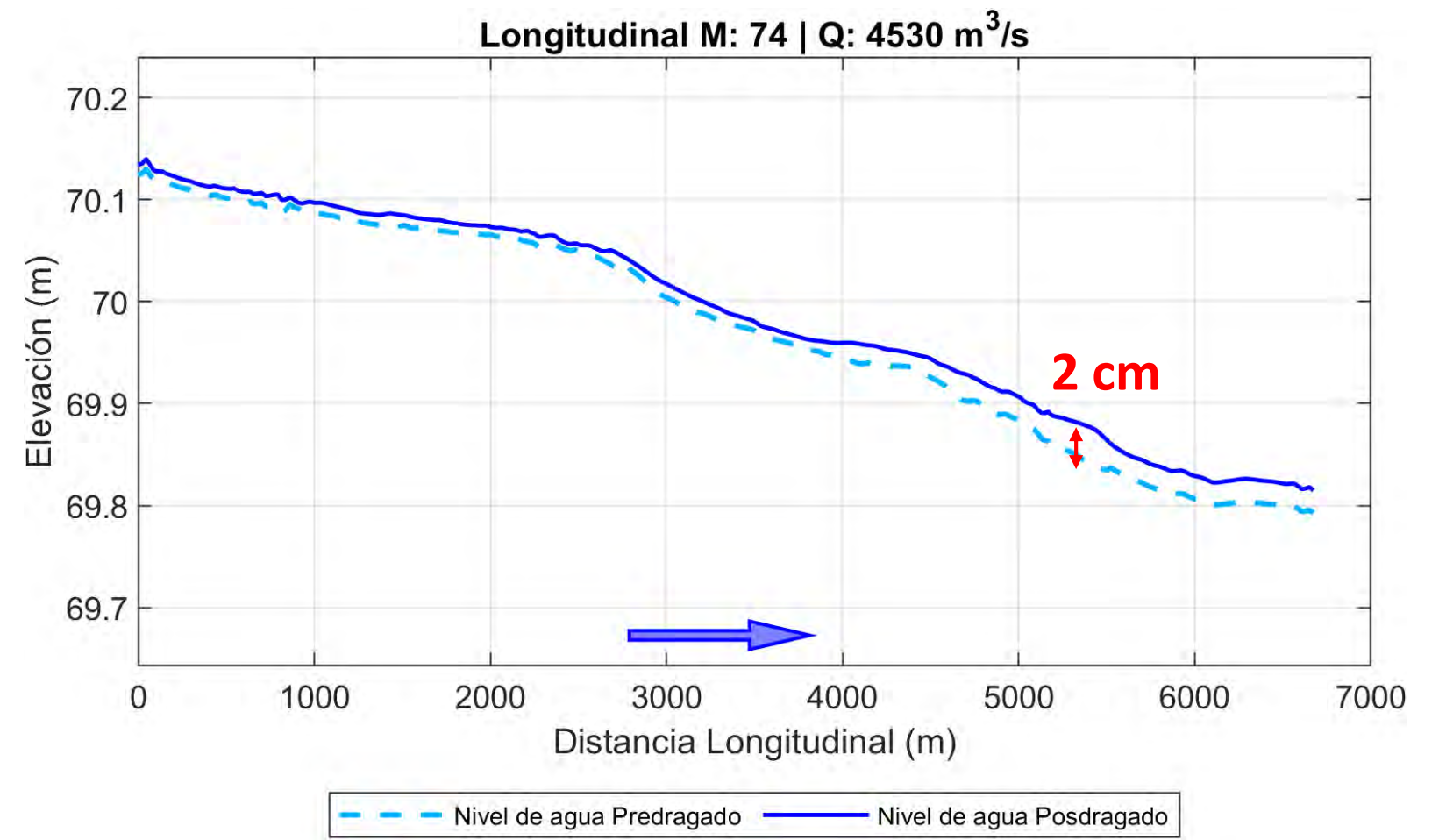
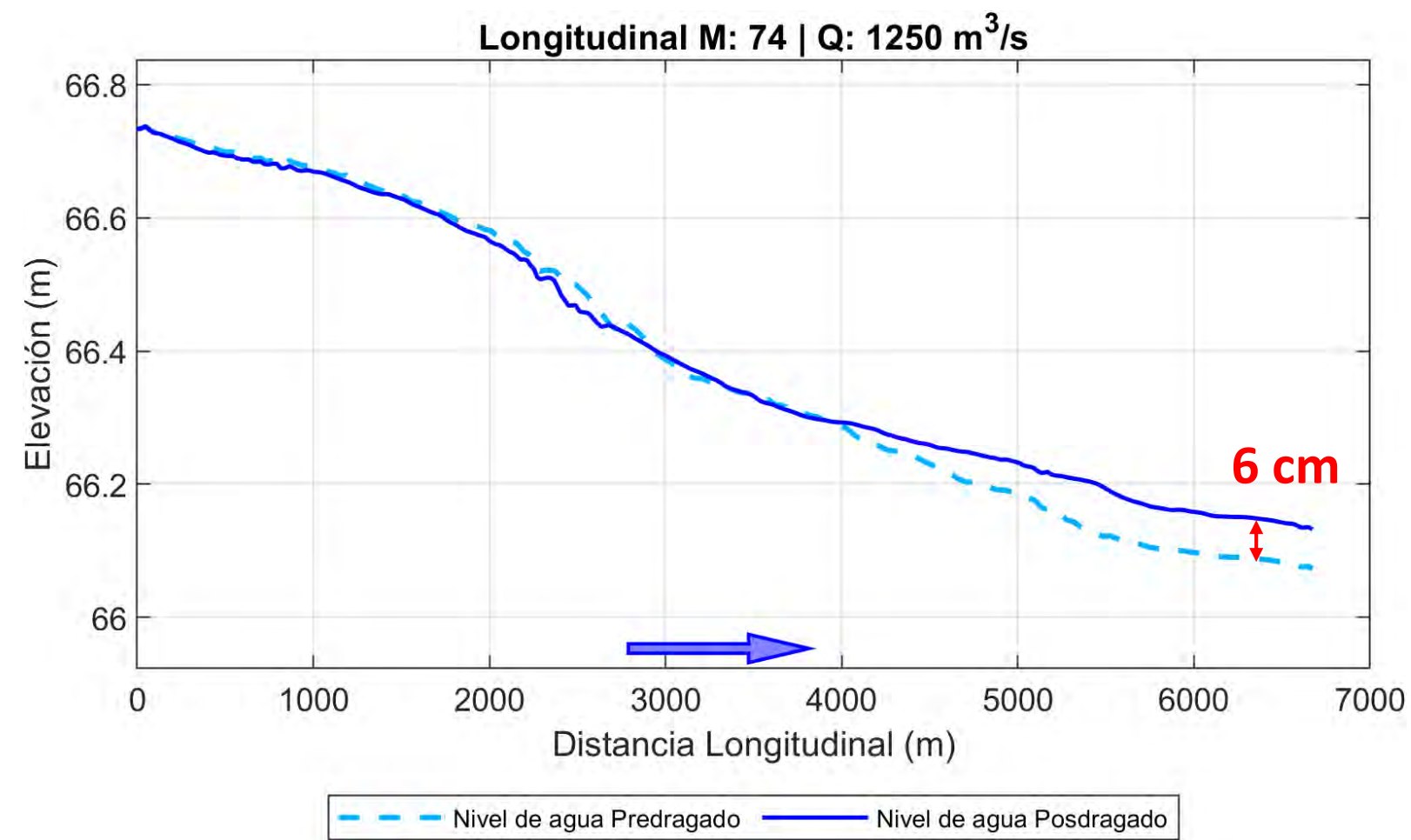
Sección 4 (n: 542) | Q: 2630 m³/s



Sección 4 (n: 542) | Q: 4530 m³/s



— Nivel de agua Predragado — Nivel de agua Posdragado — Batimetría Predragado — Batimetría Posdragado

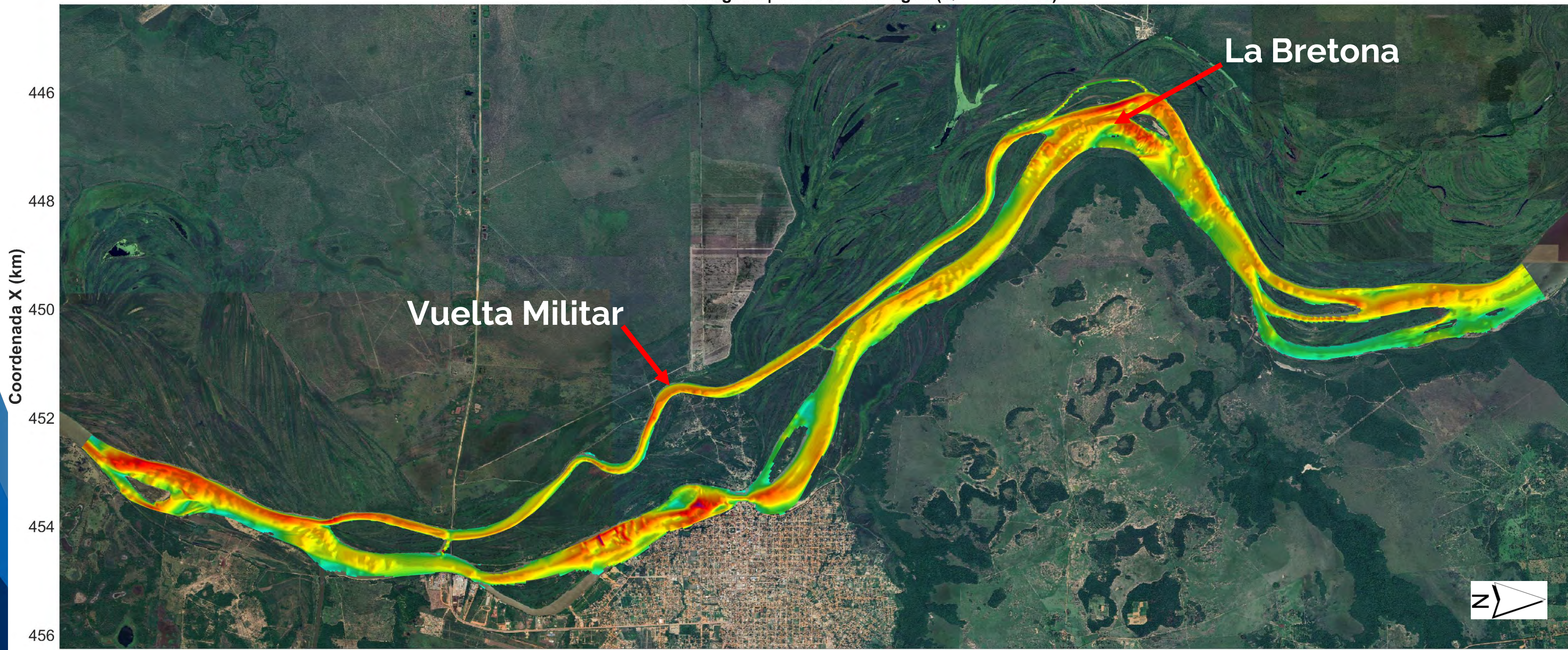


Modelación Hidrodinámica

Velocidad

Resultados Hidrodinámicos

Escenario Pre-Dragado | Velocidad del agua (Q = 1250 m³/s)



Coordenada X (km)

La Bretona

Vuelta Militar

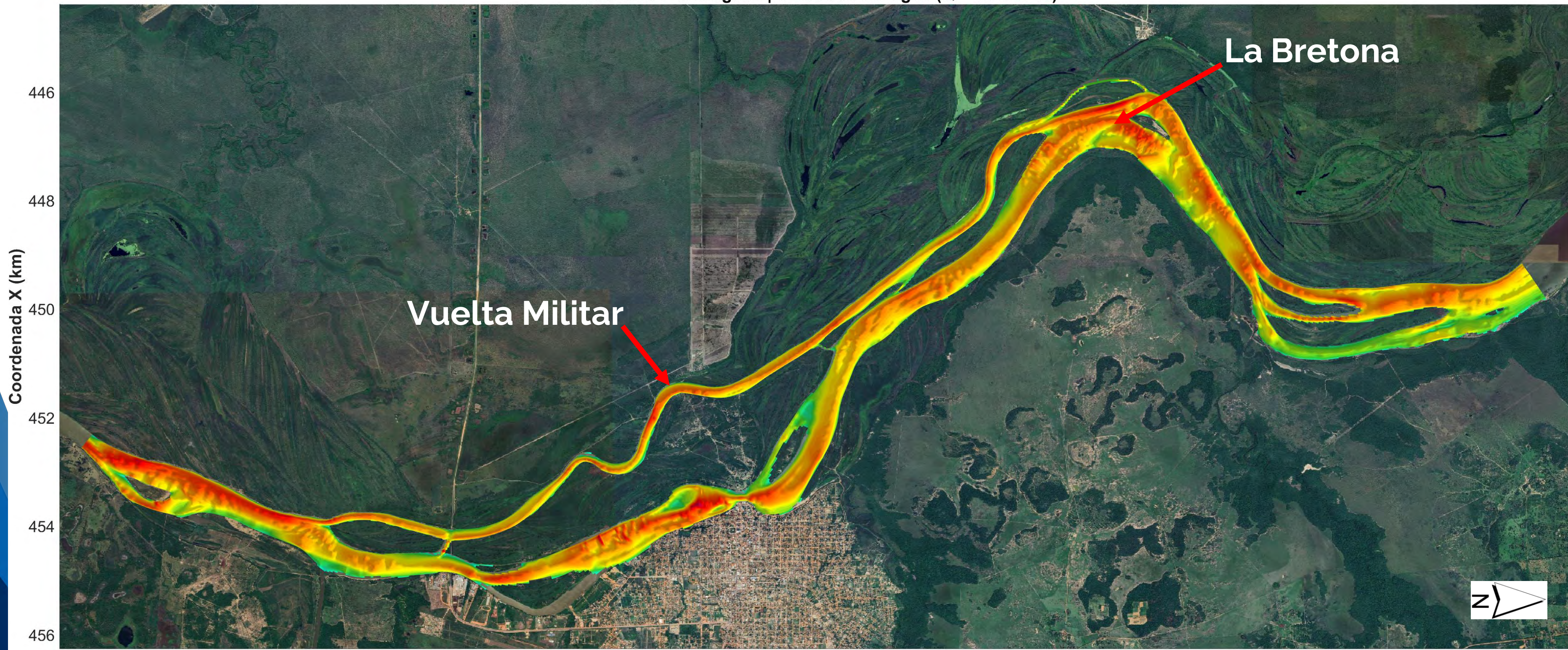
Coordenada Y (km)



Velocidad (m/s)

Resultados Hidrodinámicos

Escenario Pre-Dragado | Velocidad del agua (Q = 1870 m³/s)

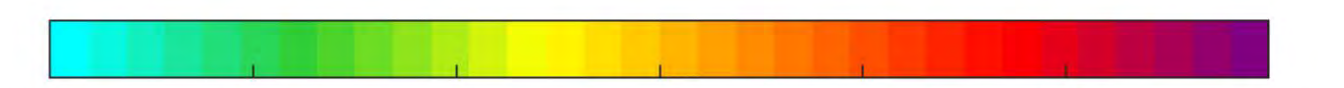


Coordenada X (km)

La Bretona

Vuelta Militar

Coordenada Y (km)

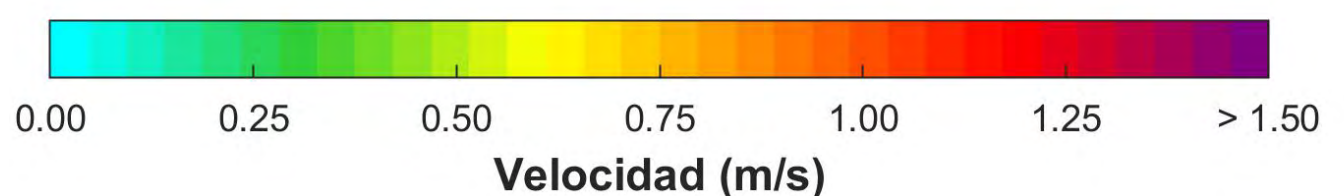
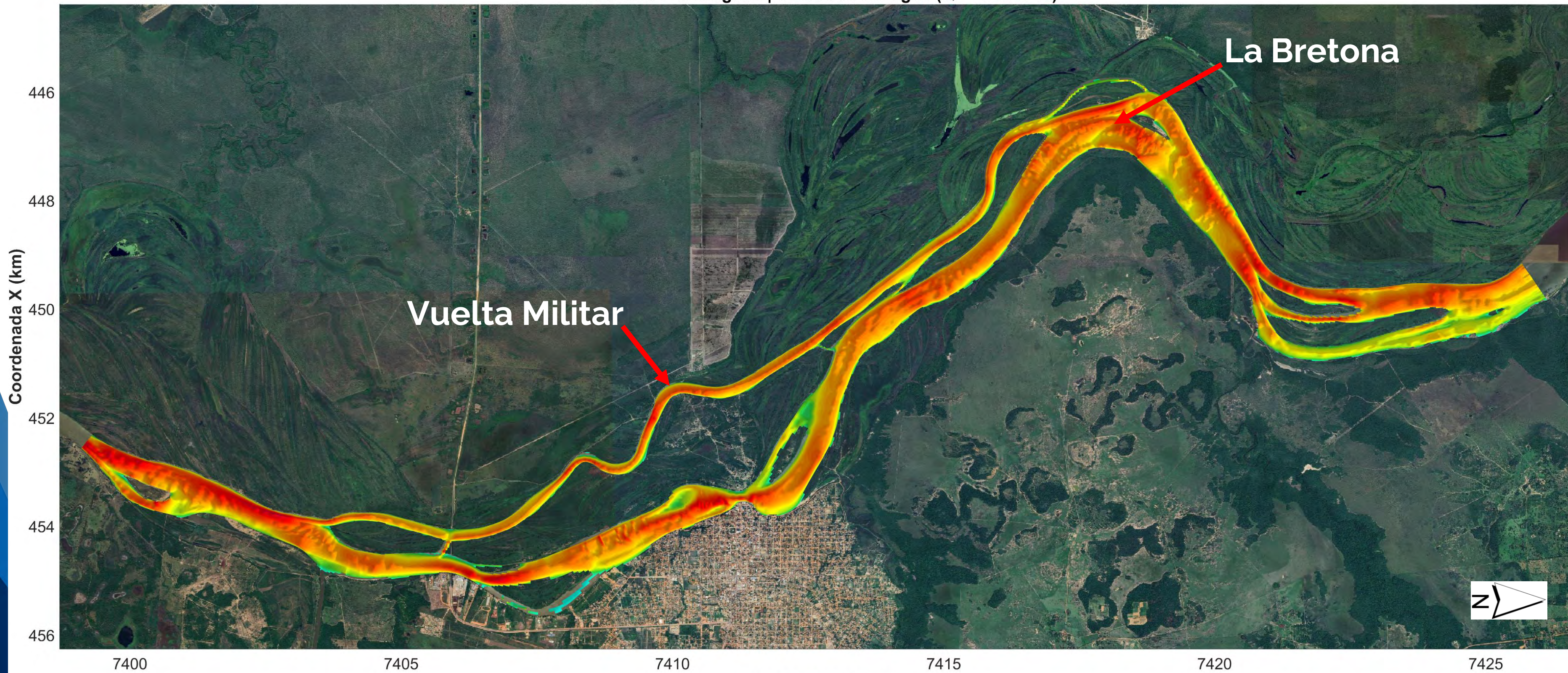


Velocidad (m/s)



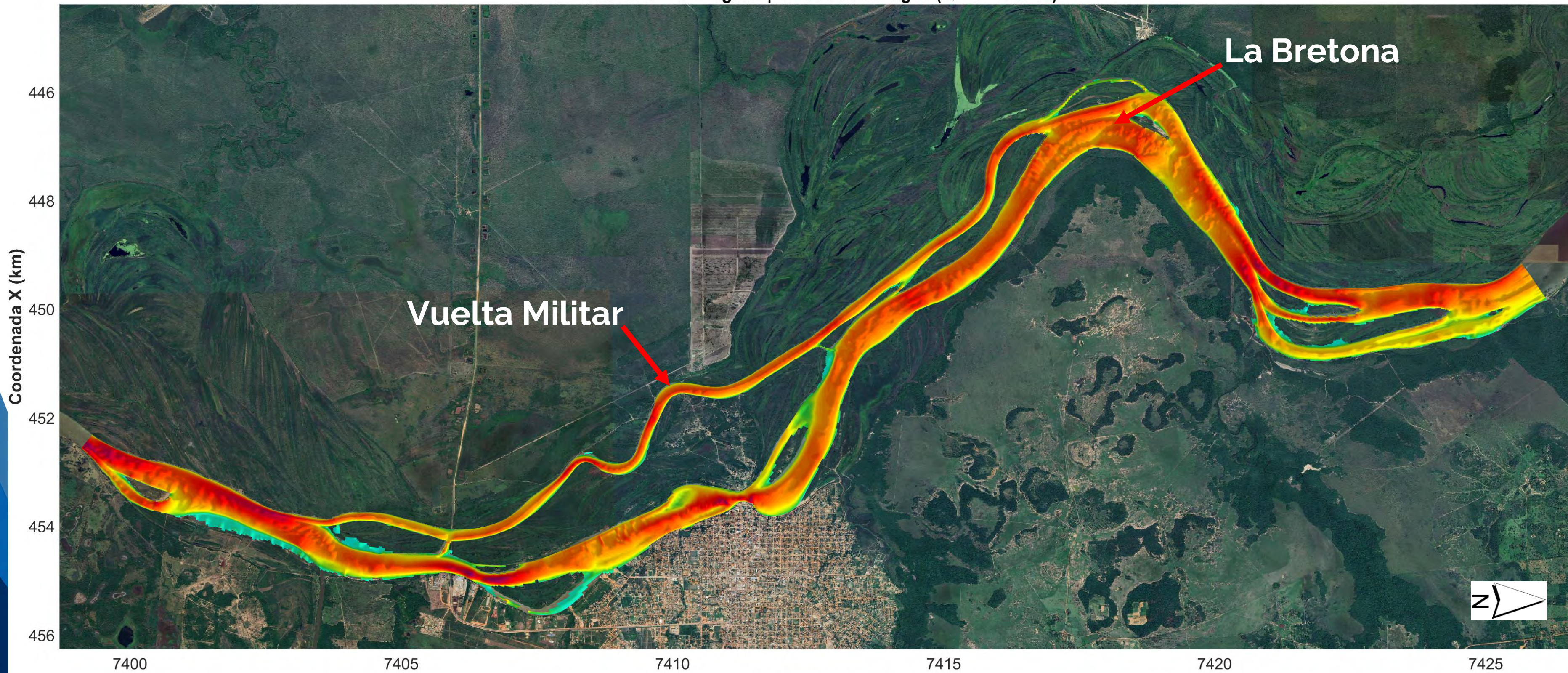
Resultados Hidrodinámicos

Escenario Pre-Dragado | Velocidad del agua (Q = 2630 m³/s)



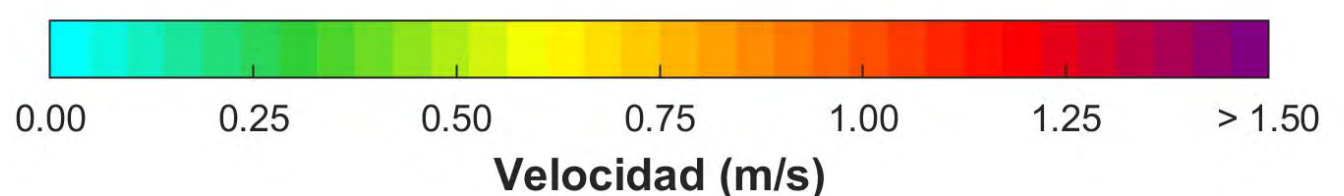
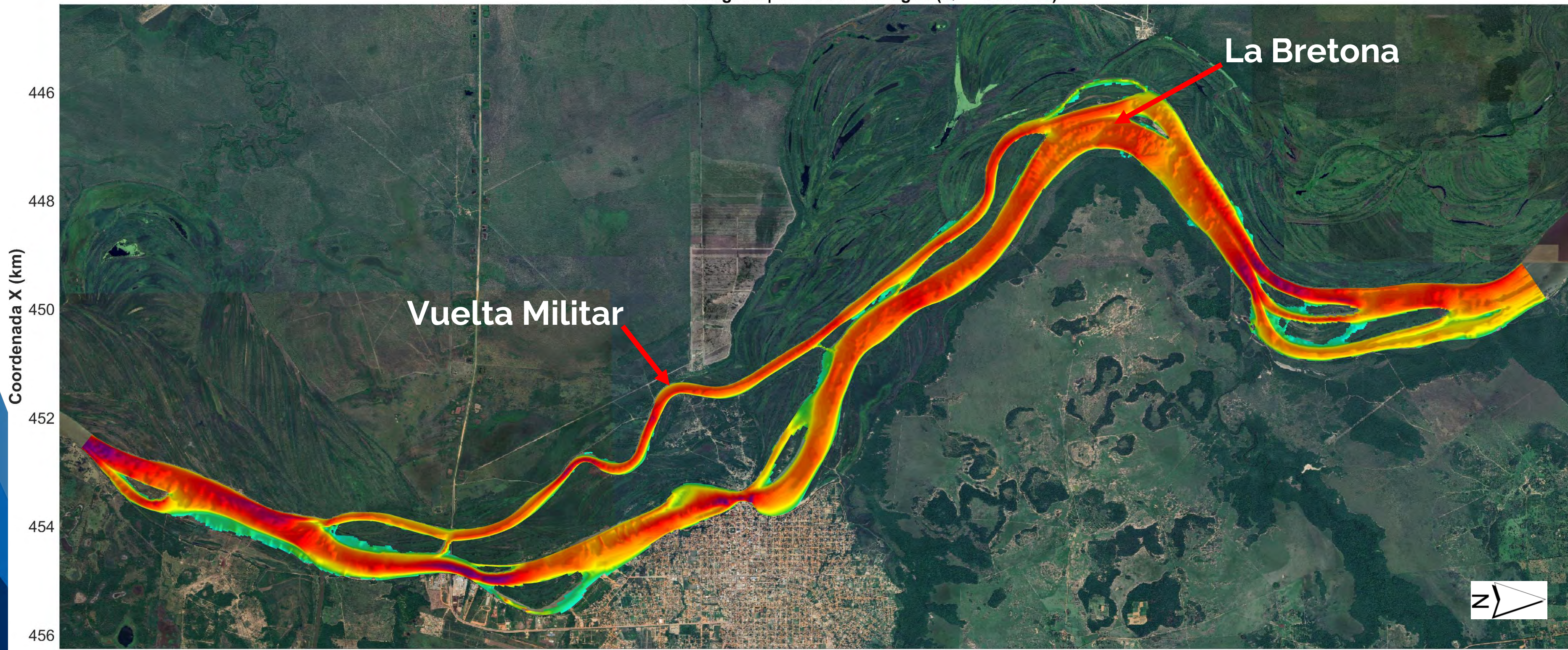
Resultados Hidrodinámicos

Escenario Pre-Dragado | Velocidad del agua (Q = 3470 m³/s)

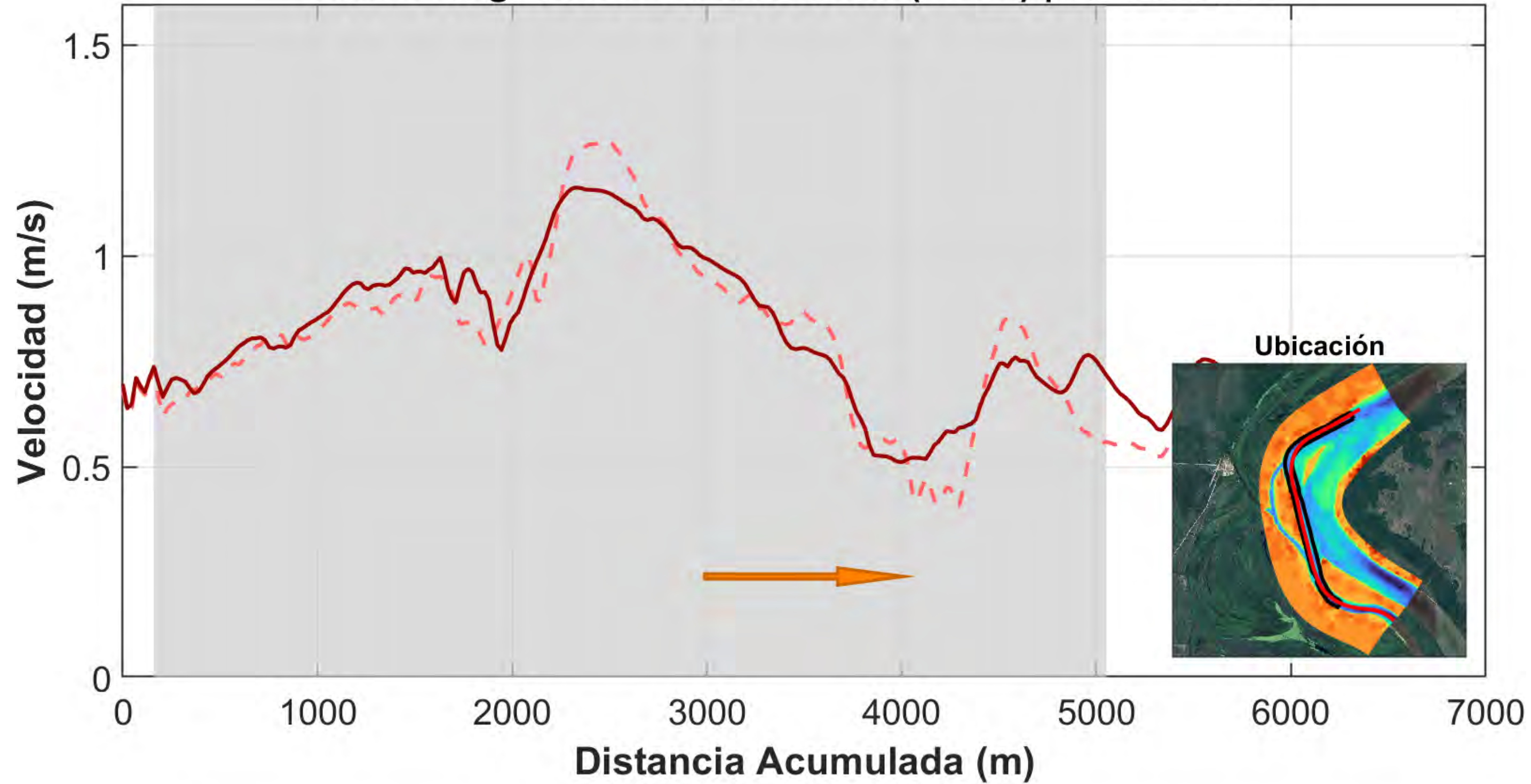


Resultados Hidrodinámicos

Escenario Pre-Dragado | Velocidad del agua (Q = 4530 m³/s)

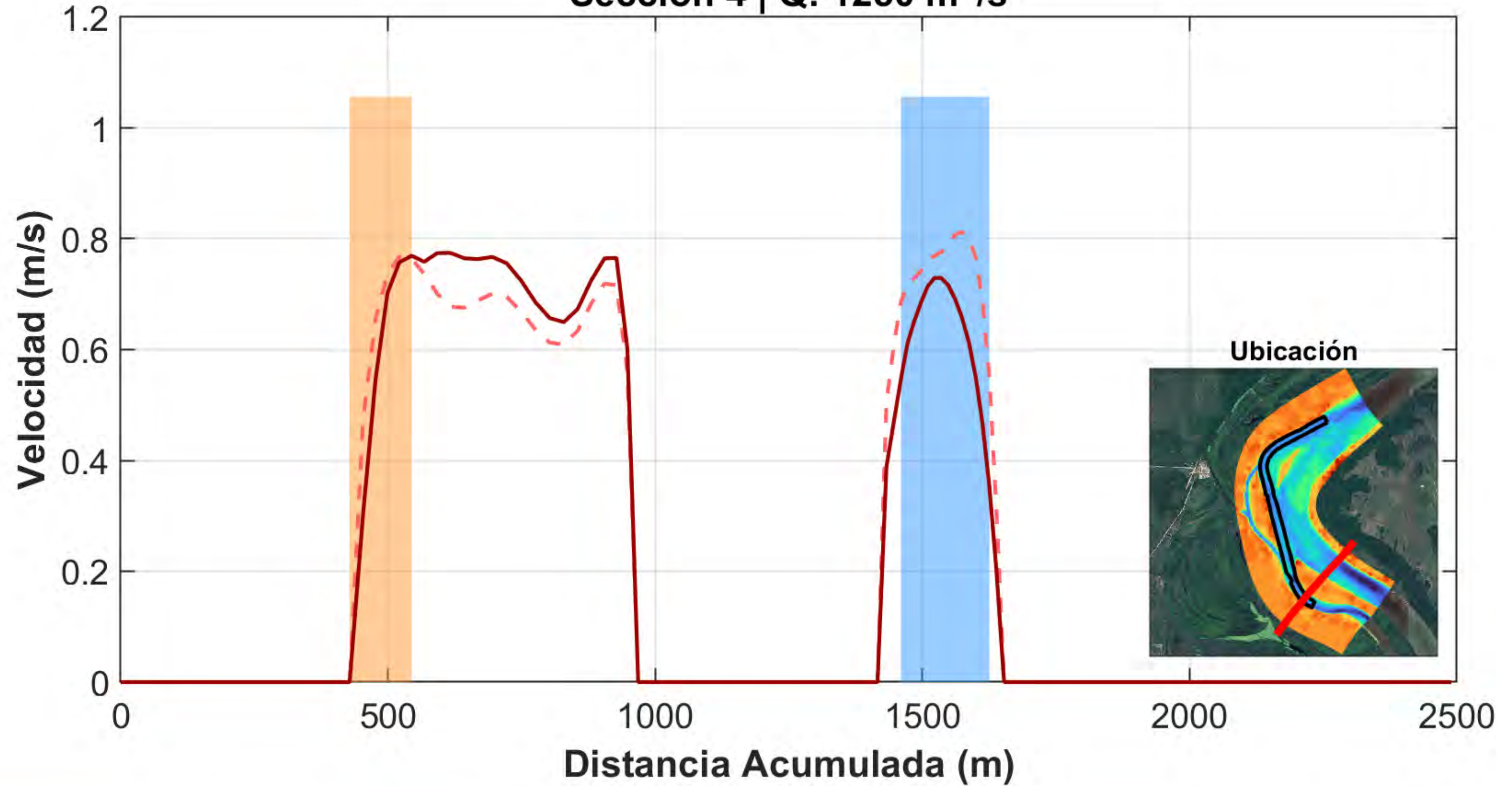


Perfil Longitudinal de Velocidad (M: 77) | Q: 1250 m³/s



Áreas Intervenidas - - - - - Velocidad Predragado ———— Velocidad Posdragado

Sección 4 | Q: 1250 m³/s



Área de Descarga Área de Dragado Velocidad Predragado Velocidad Posdragado

Modelación Morfodinámica

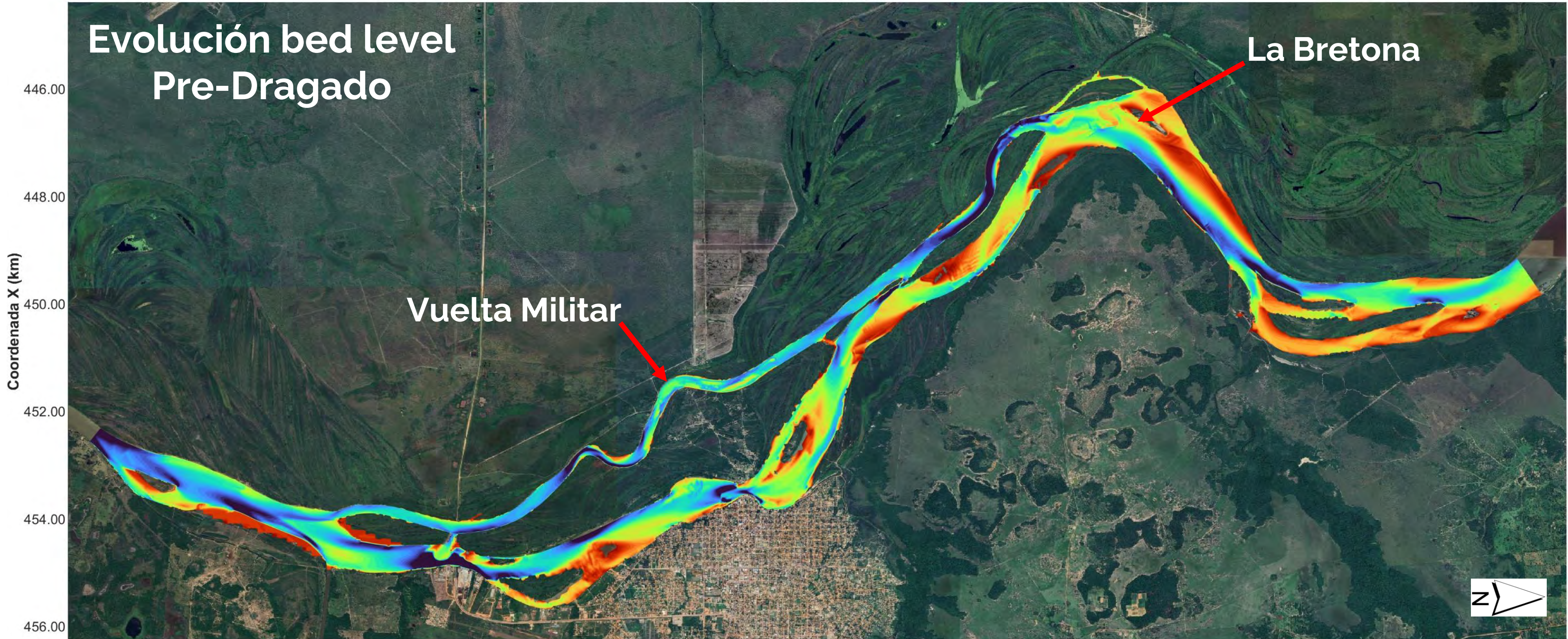
**Evolución del Fondo:
Pre-Intervención (5 Años)**

Pre-Intervención - Año 0

Evolución bed level Pre-Dragado

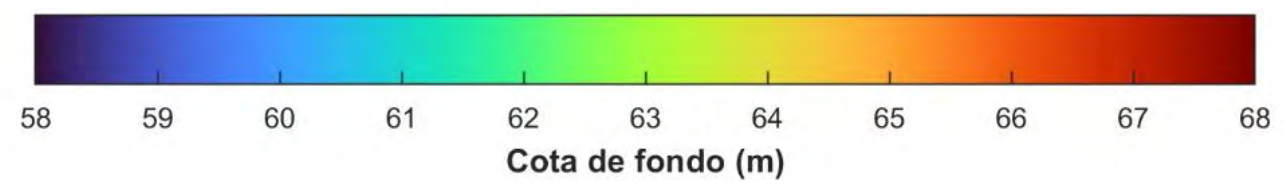
La Bretona

Vuelta Militar



Coordenada X (km)

Coordenada Y (km)



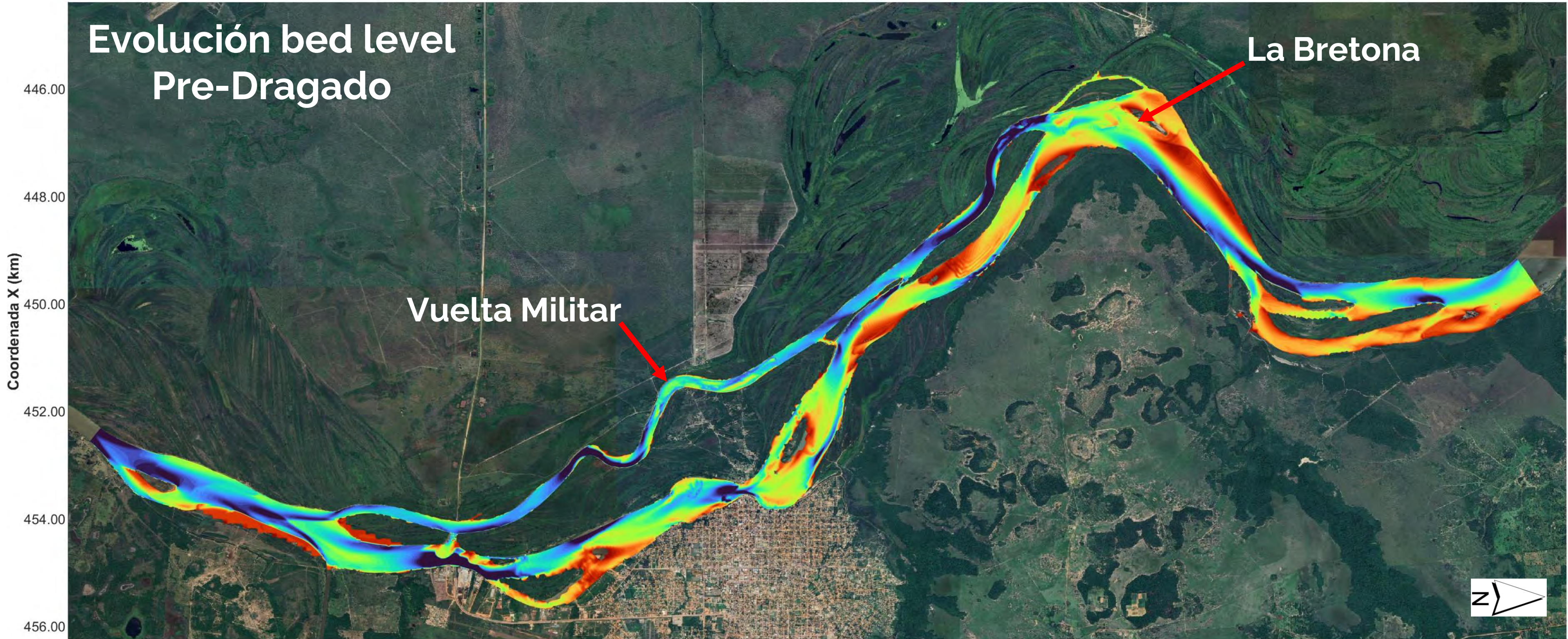
Cota de fondo (m)

Pre-Intervención - Año 1

Evolución bed level Pre-Dragado

La Bretona

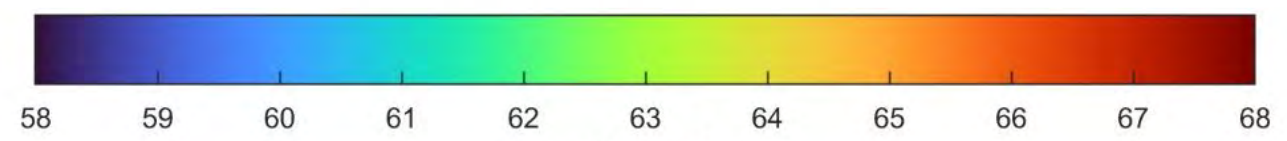
Vuelta Militar



Coordenada X (km)

7400.00 7405.00 7410.00 7415.00 7420.00 7425.00

Coordenada Y (km)



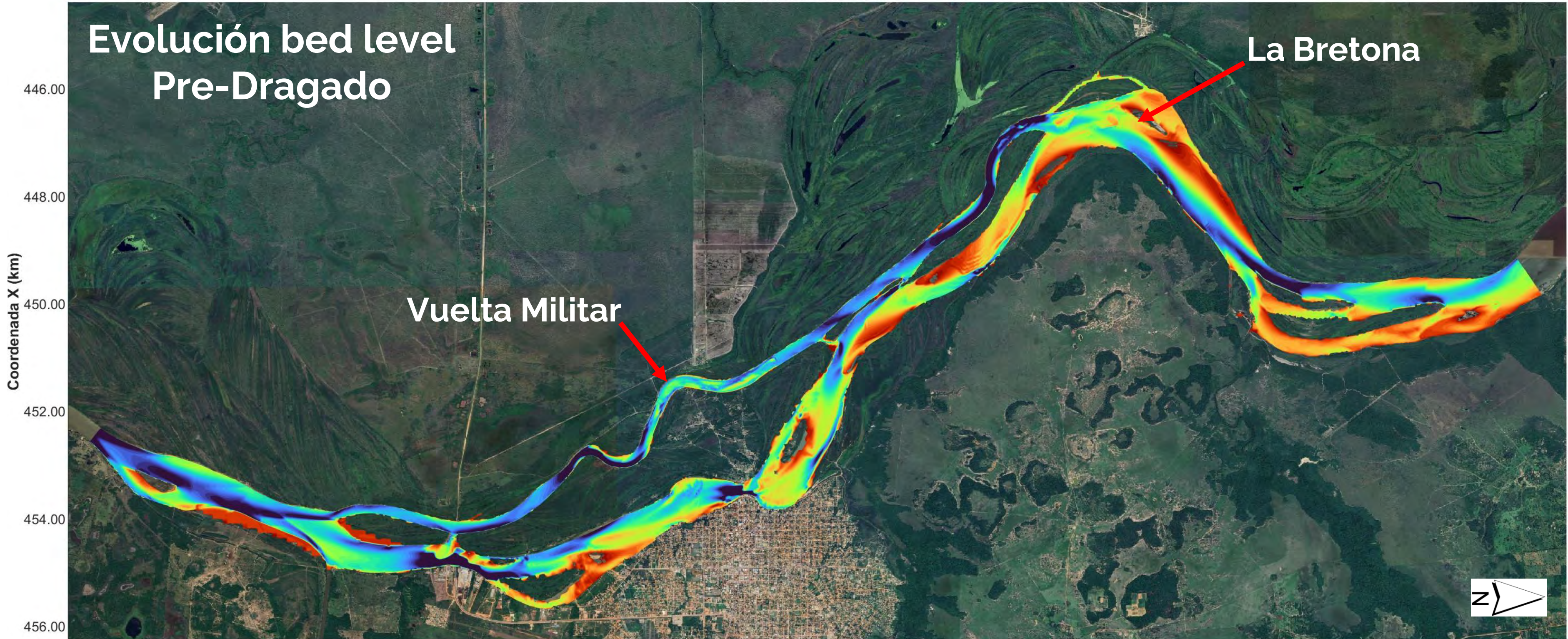
Cota de fondo (m)

Pre-Intervención - Año 2

Evolución bed level Pre-Dragado

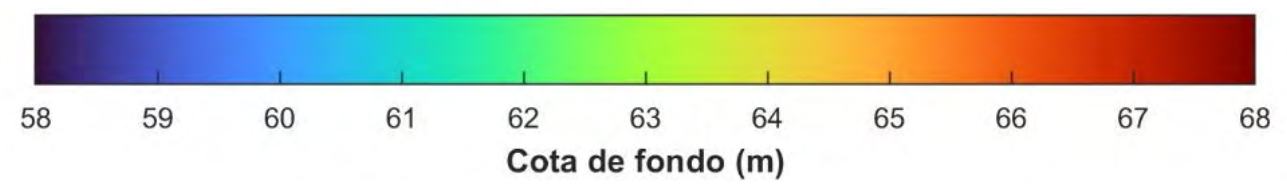
La Bretona

Vuelta Militar



Coordenada X (km)

Coordenada Y (km)



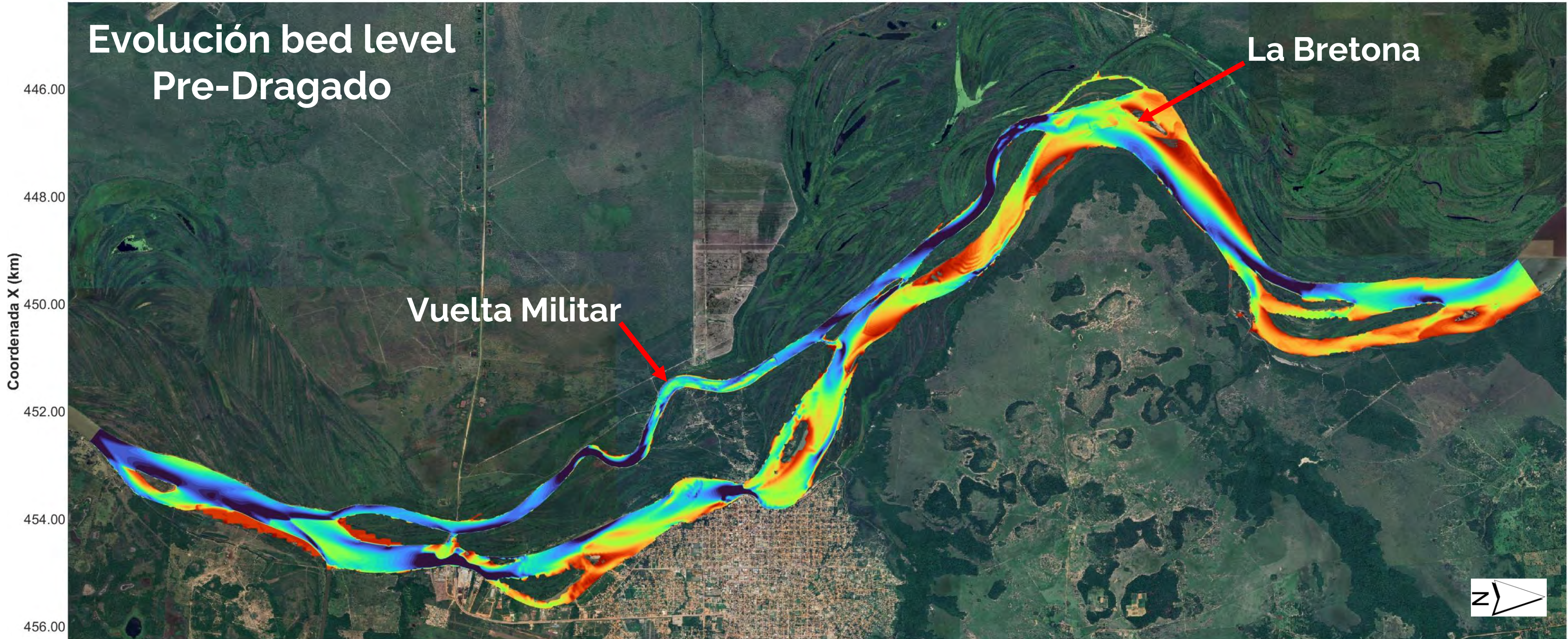
7400.00 7405.00 7410.00 7415.00 7420.00 7425.00

Pre-Intervención - Año 3

Evolución bed level Pre-Dragado

La Bretona

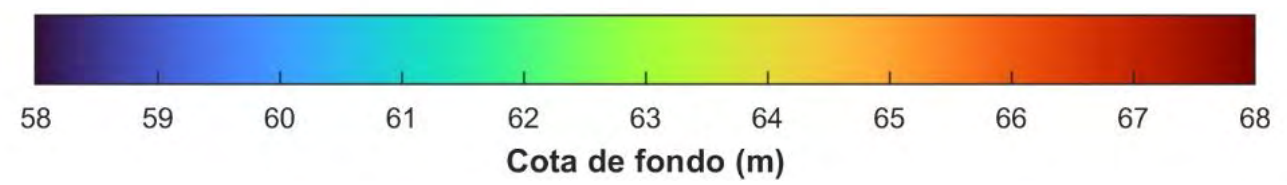
Vuelta Militar



Coordenada X (km)

7400.00 7405.00 7410.00 7415.00 7420.00 7425.00

Coordenada Y (km)

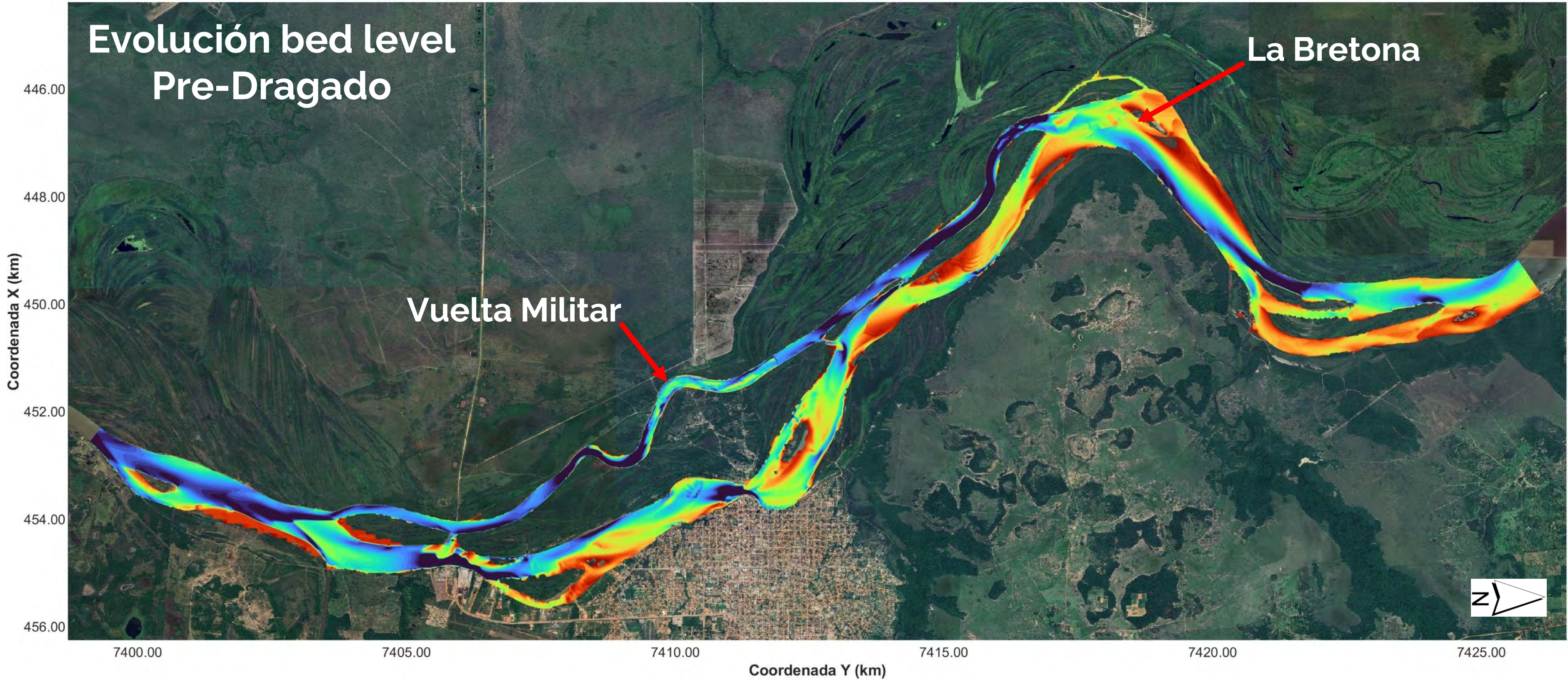


Pre-Intervención - Año 4

Evolución bed level Pre-Dragado

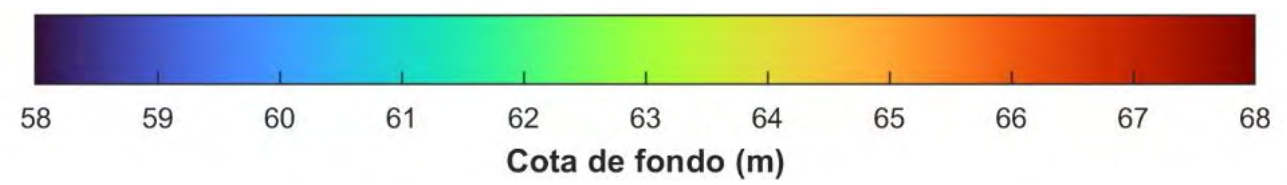
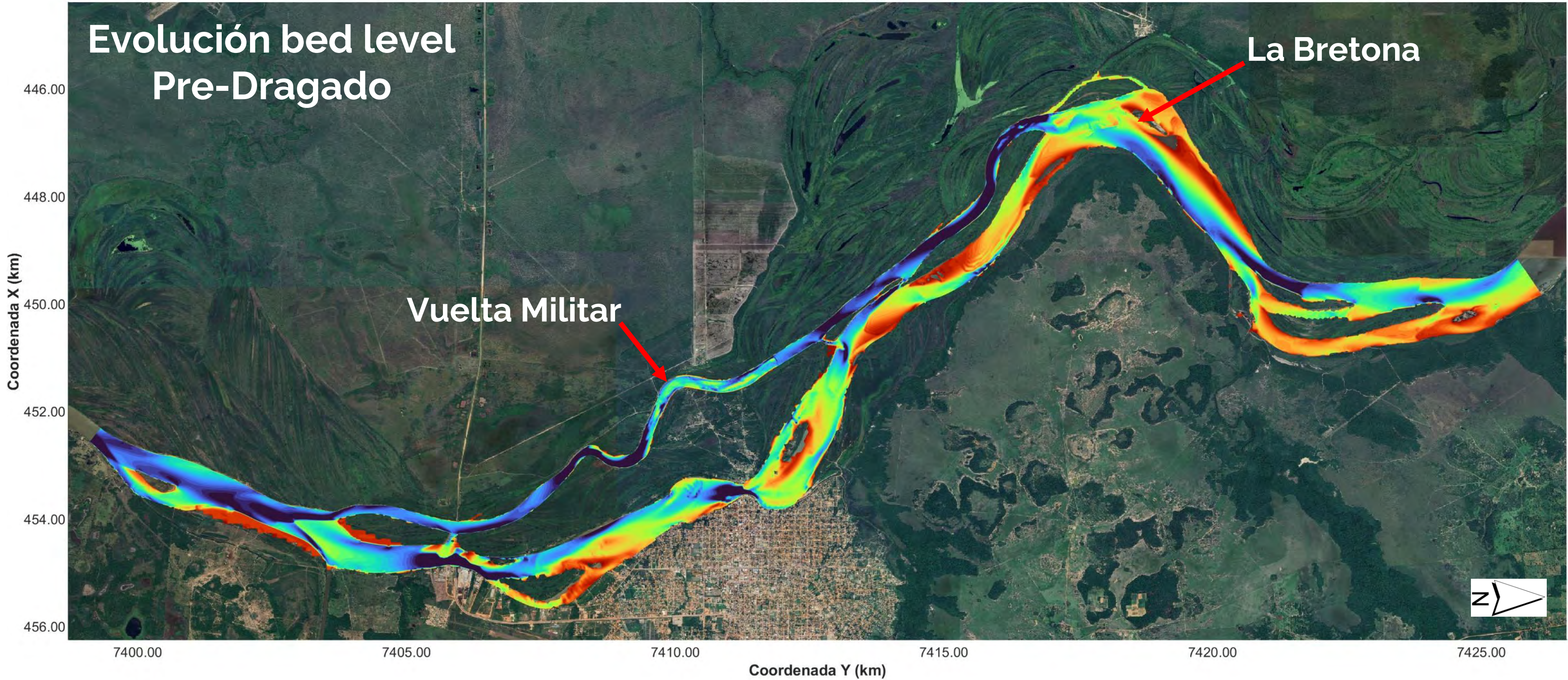
La Bretona

Vuelta Militar



Pre-Intervención - Año 5

Evolución bed level Pre-Dragado



Resultados Morfodinámicos

Acumulado

Erosión/Sedimentación:
Pre-Intervención (5 Años)

Erosión / Sedimentación Pre-Dragado

La Bretona

Vuelta Militar

Coordenada X (km)



7400.00

7405.00

7410.00

7415.00

7420.00

7425.00

Coordenada Y (km)



-1.5

-0.5

0.5

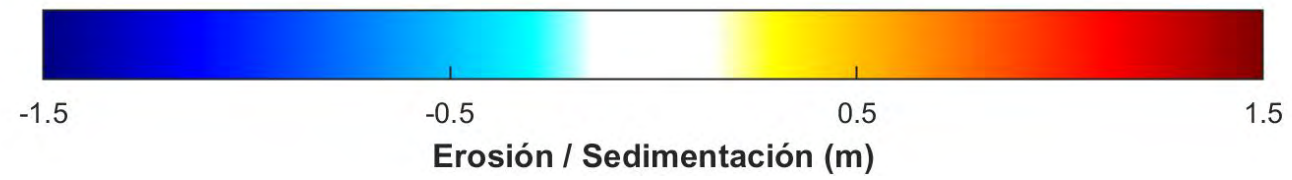
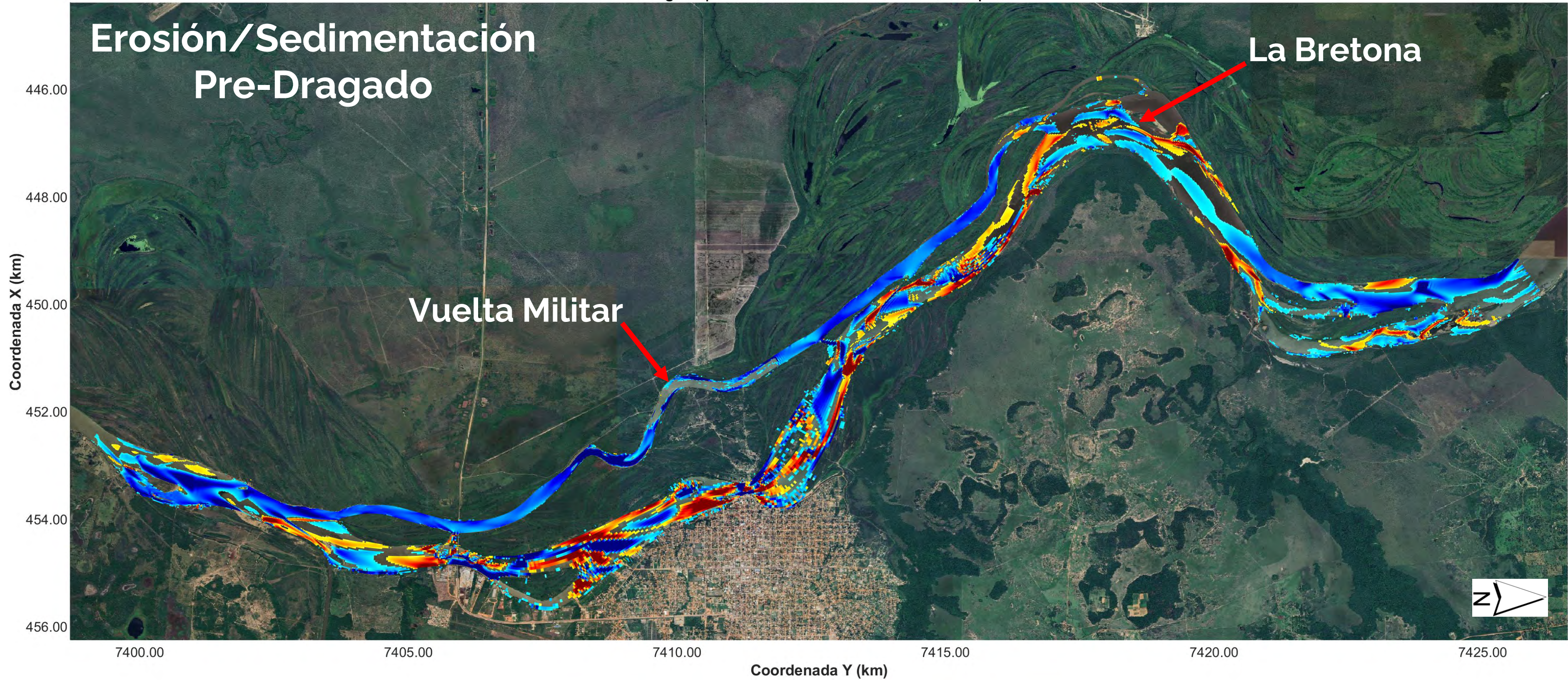
1.5

Erosión / Sedimentación (m)

Erosión / Sedimentación Pre-Dragado

La Bretona

Vuelta Militar



Erosión / Sedimentación Pre-Dragado

La Bretona

Vuelta Militar

Coordenada X (km)



7400.00

7405.00

7410.00

7415.00

7420.00

7425.00

Coordenada Y (km)

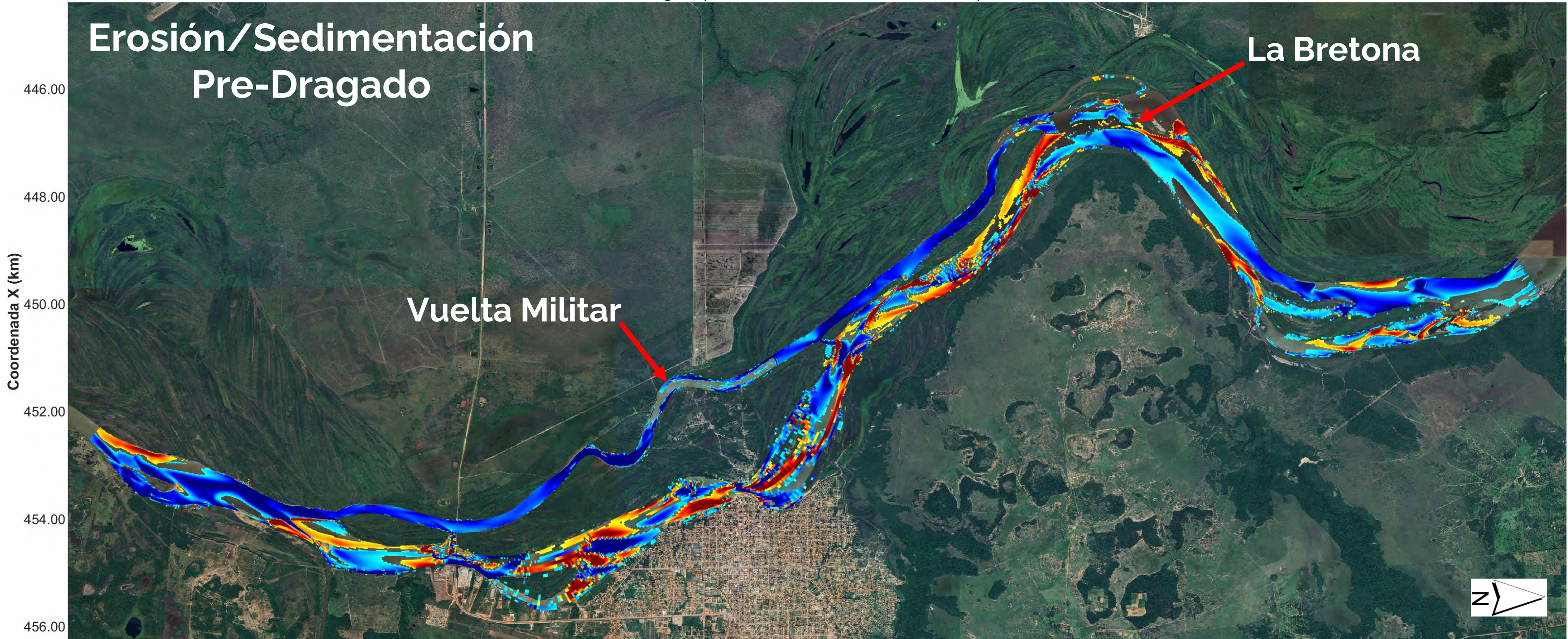
-1.5

-0.5

0.5

1.5

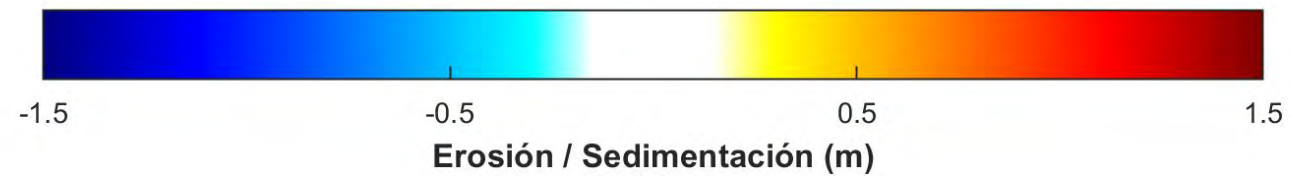
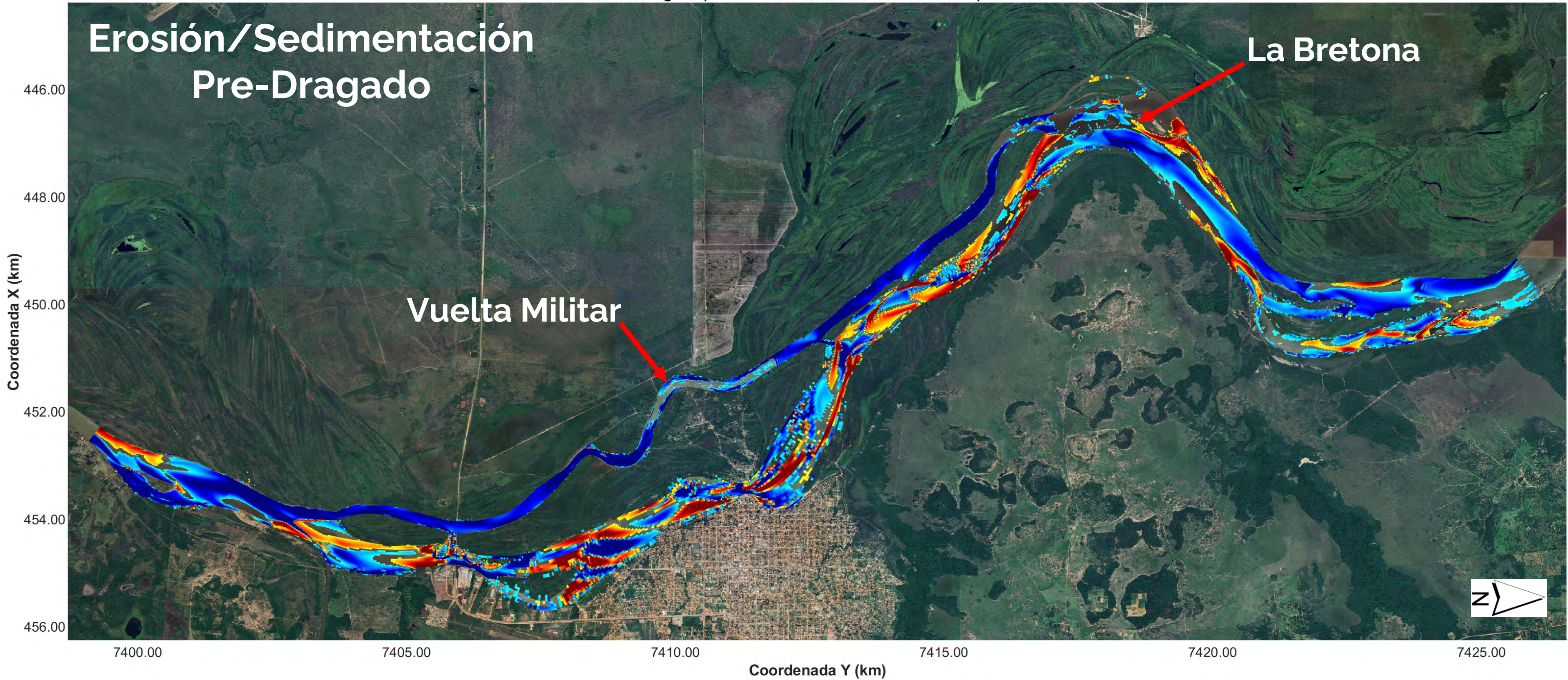
Erosión / Sedimentación (m)



Erosión / Sedimentación Pre-Dragado

La Bretona

Vuelta Militar



Erosión / Sedimentación Pre-Dragado

La Bretona

Vuelta Militar

Coordenada X (km)



7400.00

7405.00

7410.00

7415.00

7420.00

7425.00

Coordenada Y (km)

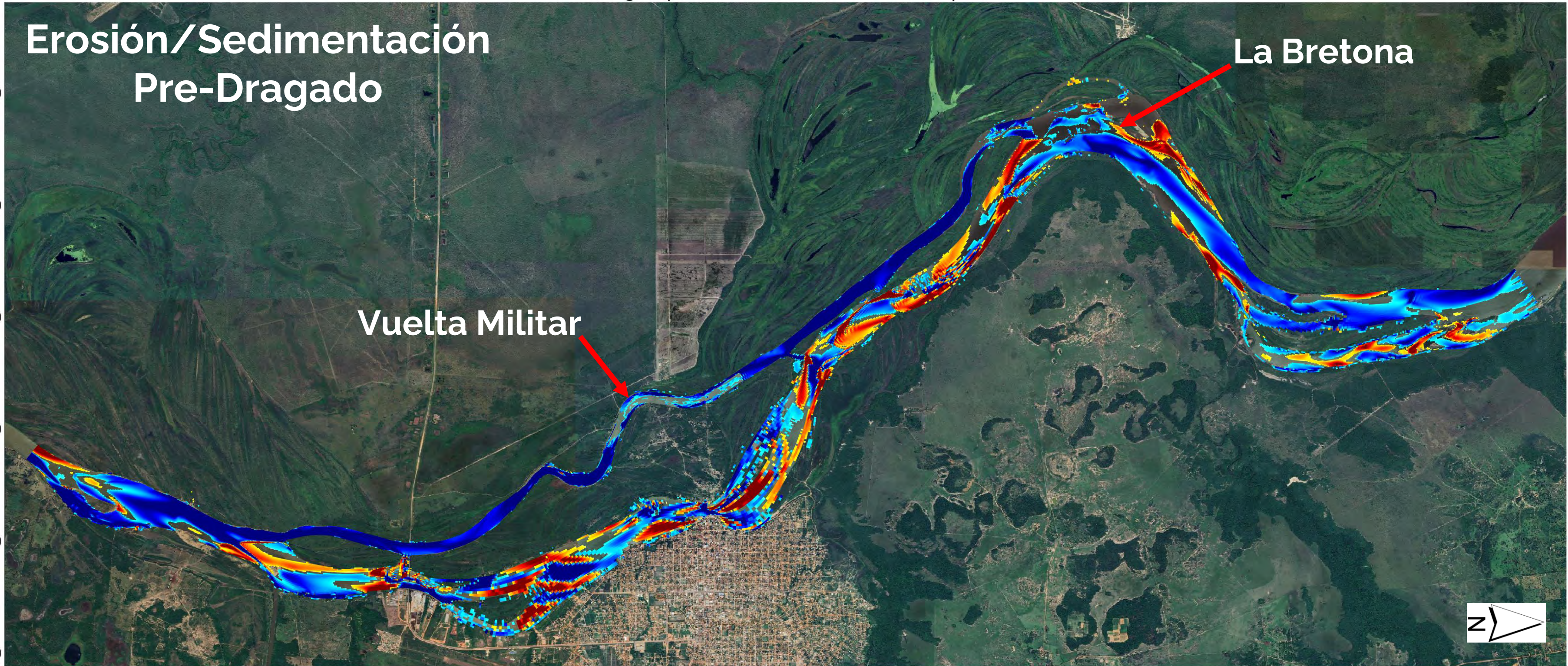
-1.5

-0.5

0.5

1.5

Erosión / Sedimentación (m)



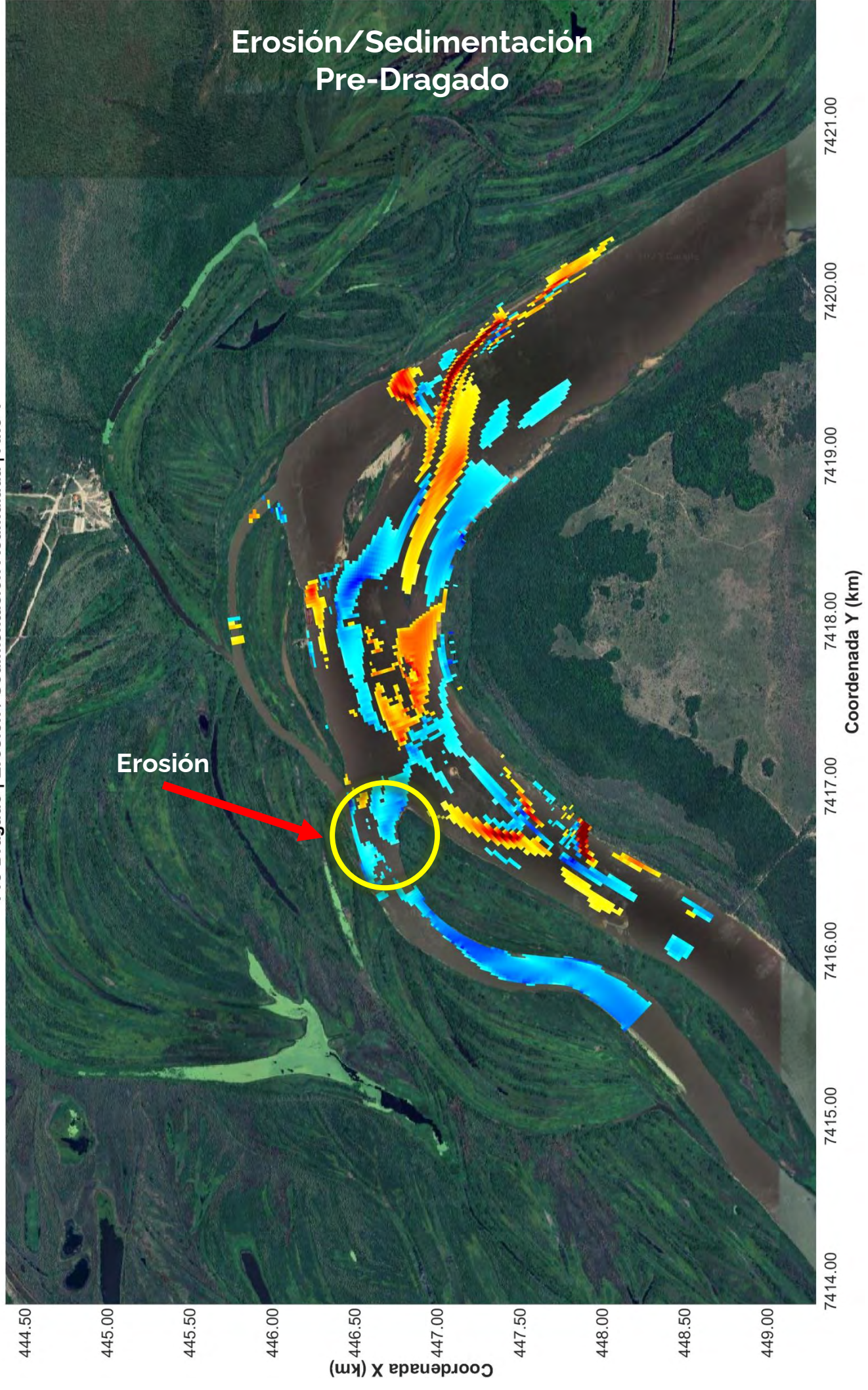
Resultados Morfodinámicos

Diferencia

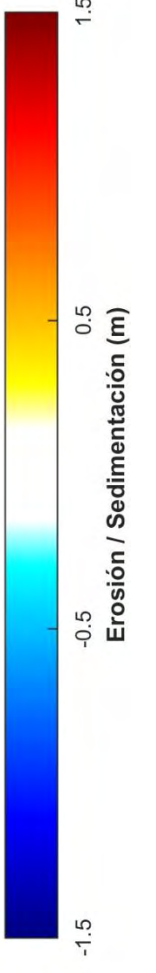
Erosión/Sedimentación:

Pre y Pos-Intervención (5 Años)

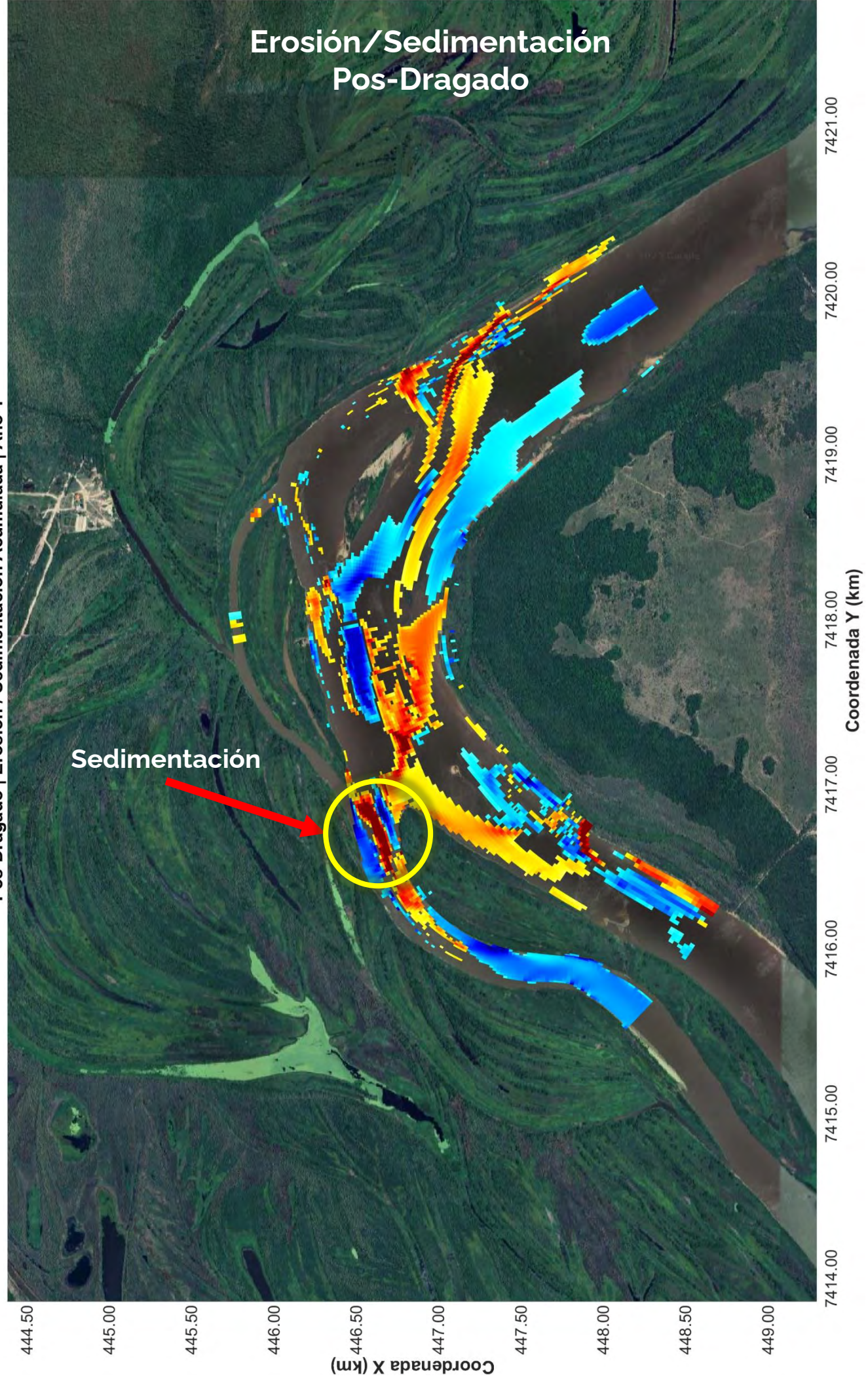
Pre-Dragado | Erosión / Sedimentación Acumulada | Año 1



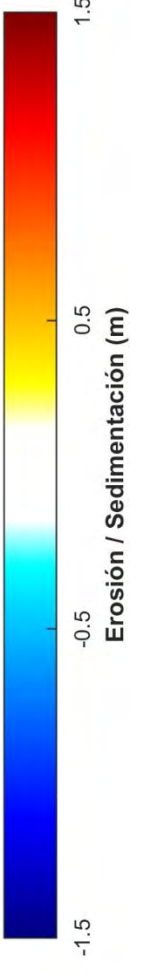
Erosión



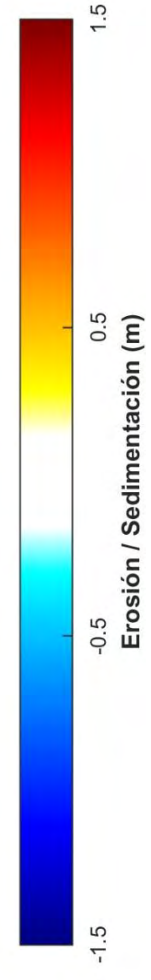
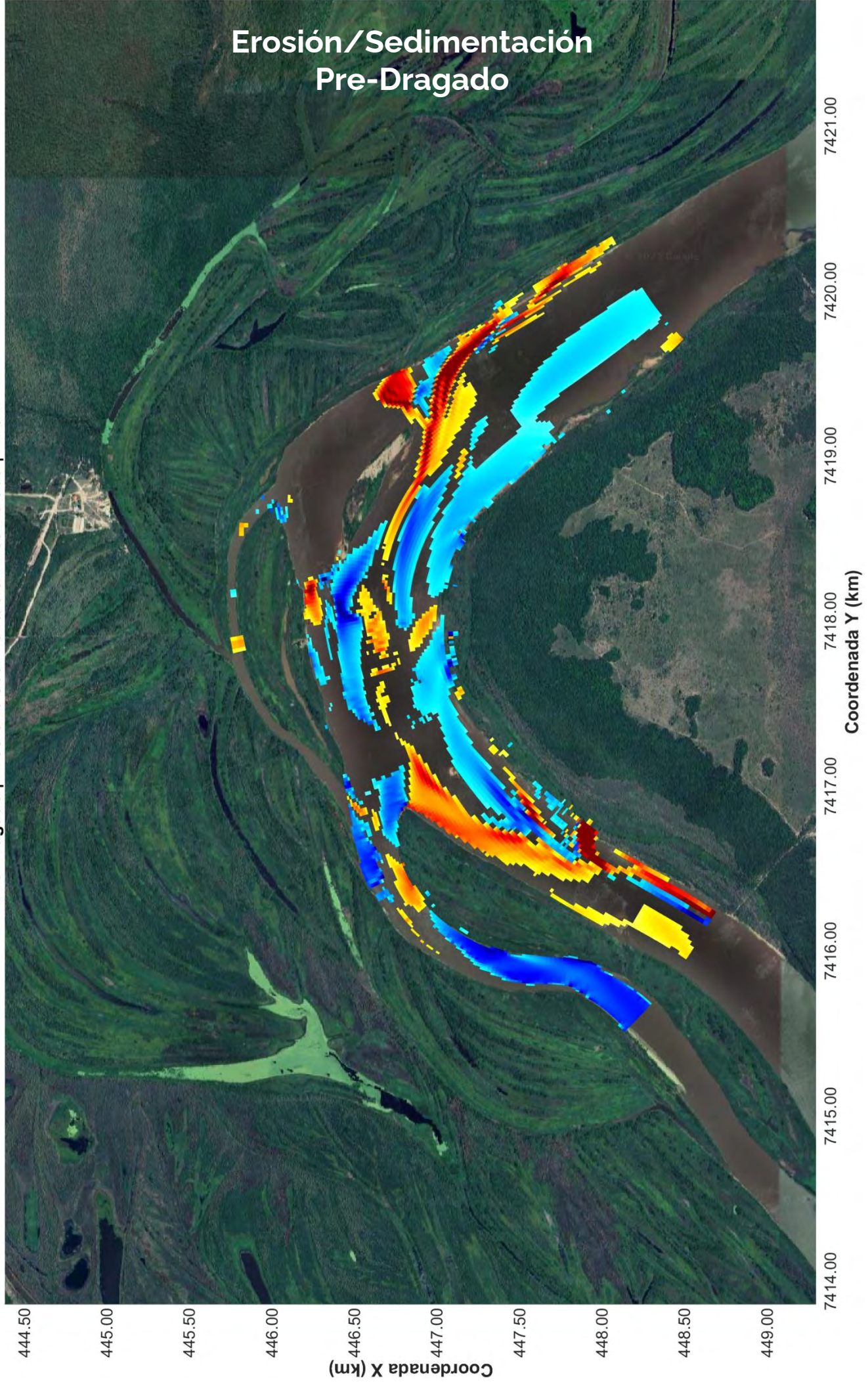
Pos-Dragado | Erosión / Sedimentación Acumulada | Año 1



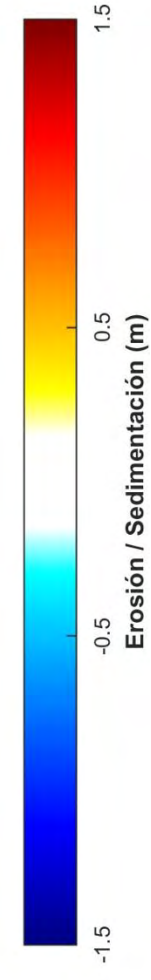
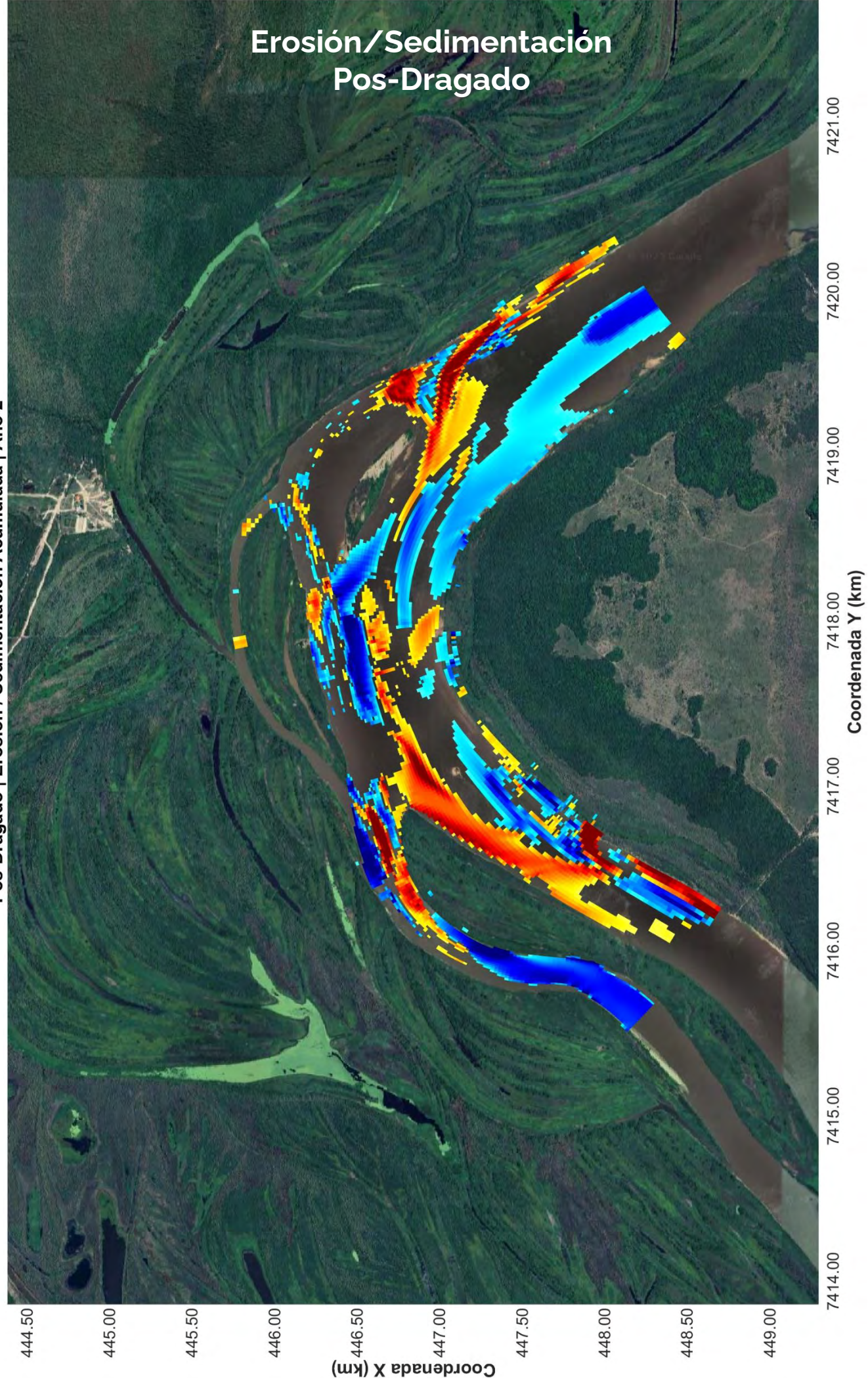
Sedimentación



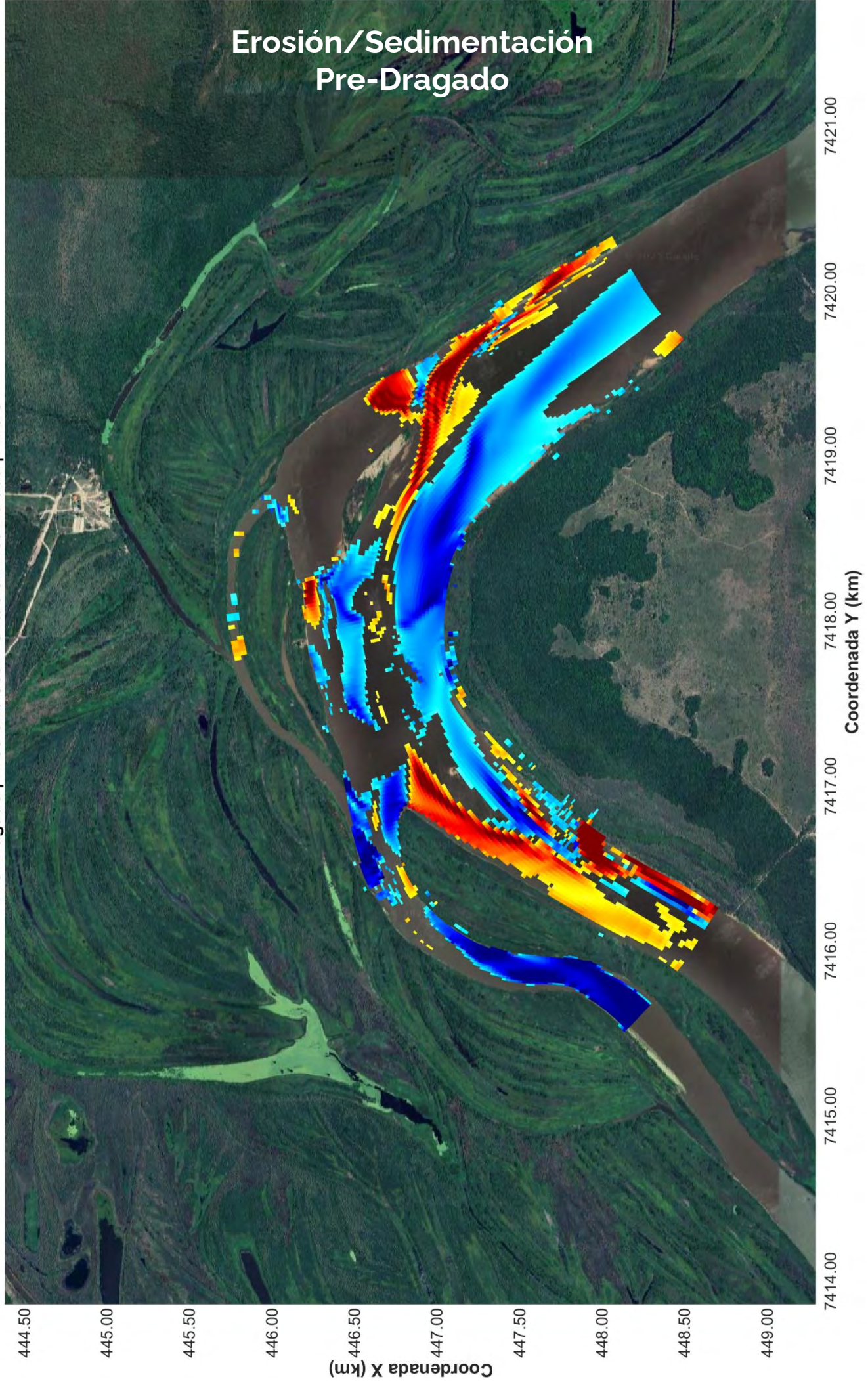
Pre-Dragado | Erosión / Sedimentación Acumulada | Año 2



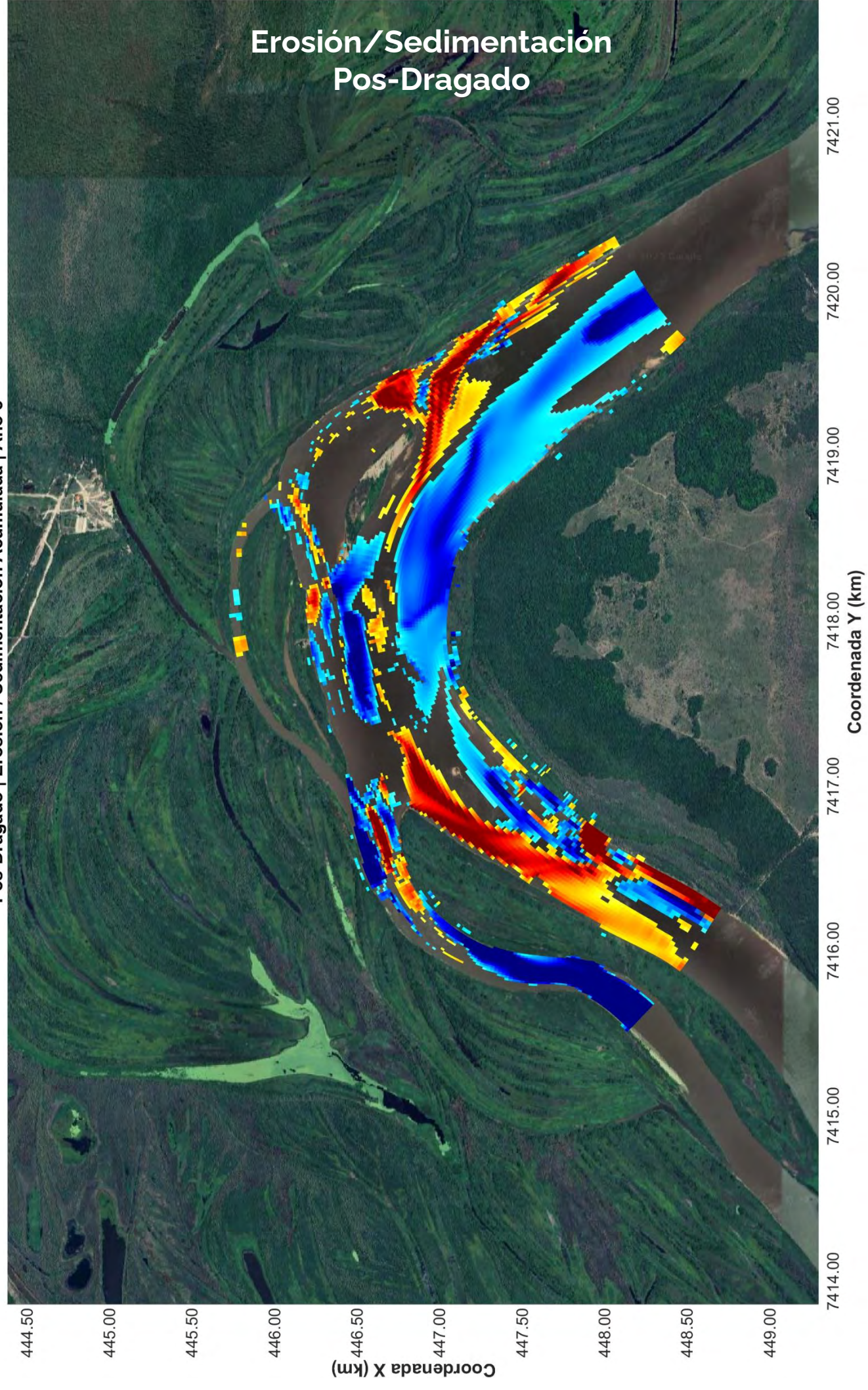
Pos-Dragado | Erosión / Sedimentación Acumulada | Año 2



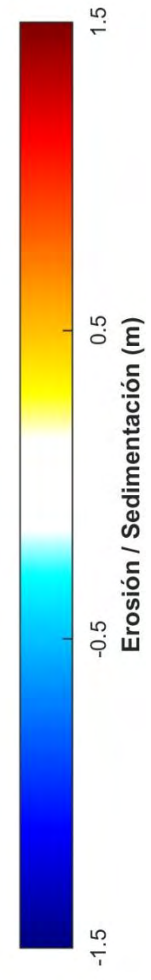
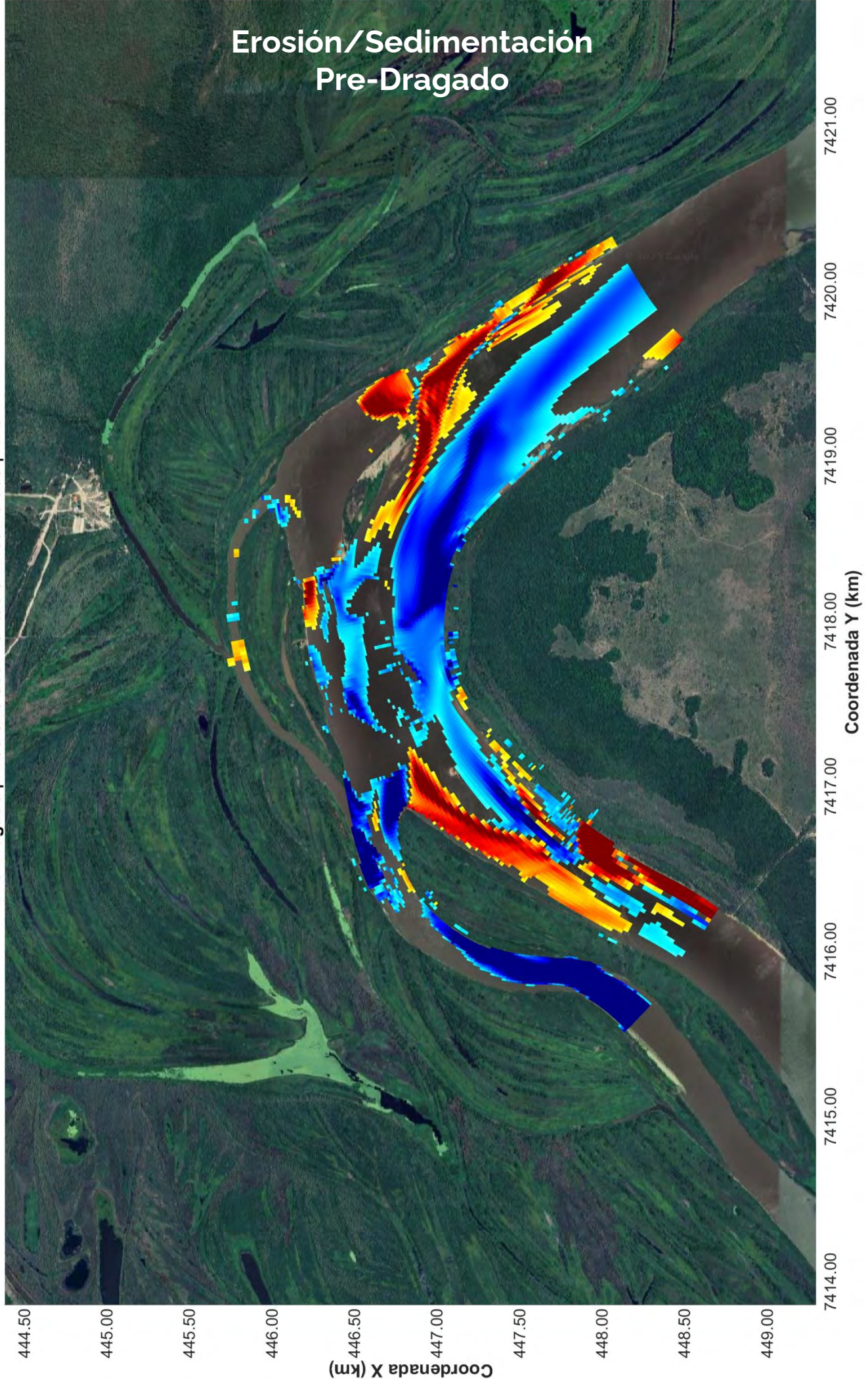
Pre-Dragado | Erosión / Sedimentación Acumulada | Año 3



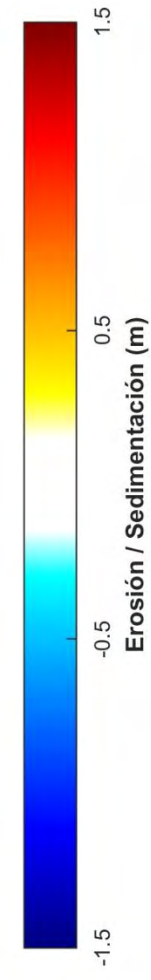
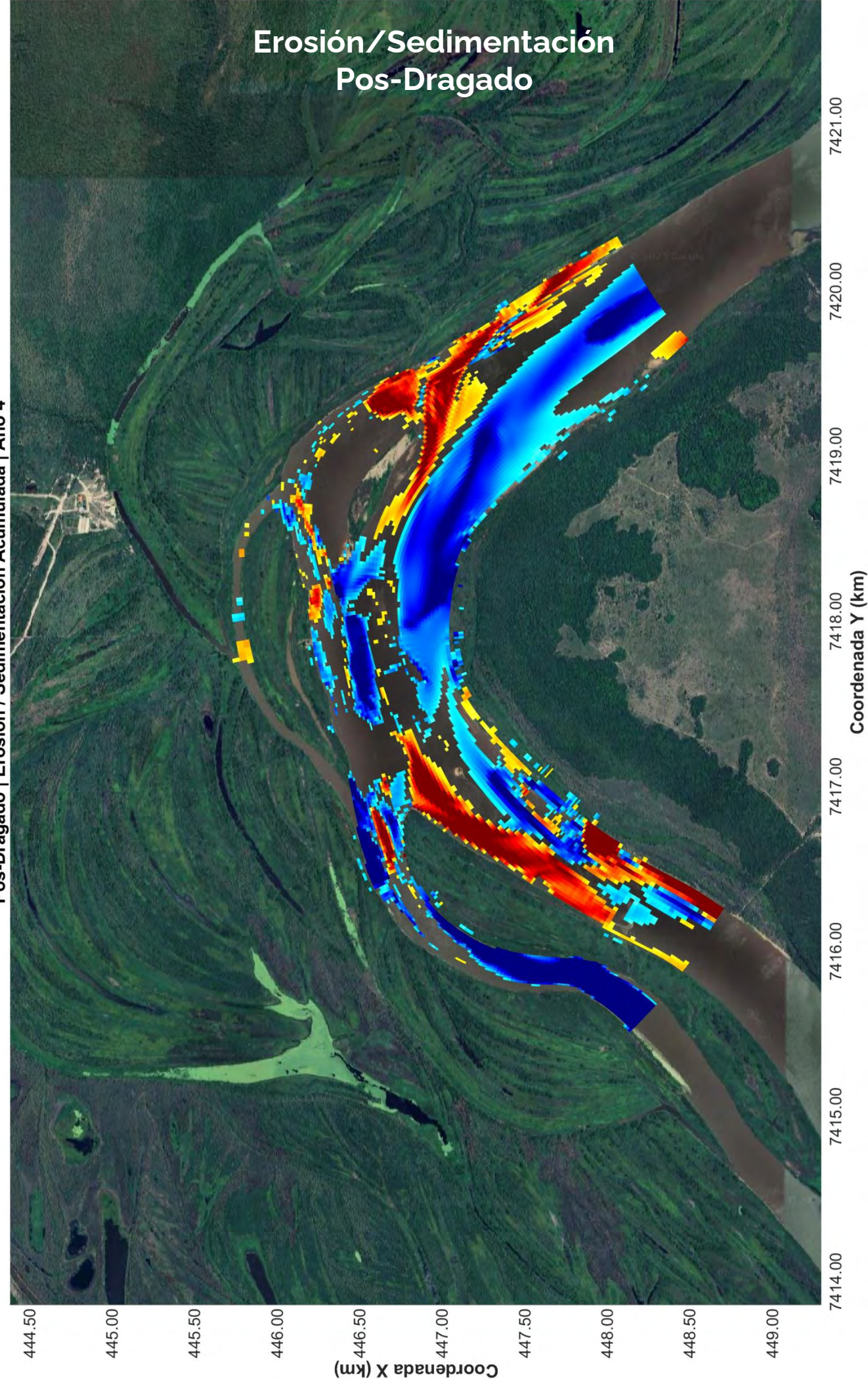
Pos-Dragado | Erosión / Sedimentación Acumulada | Año 3



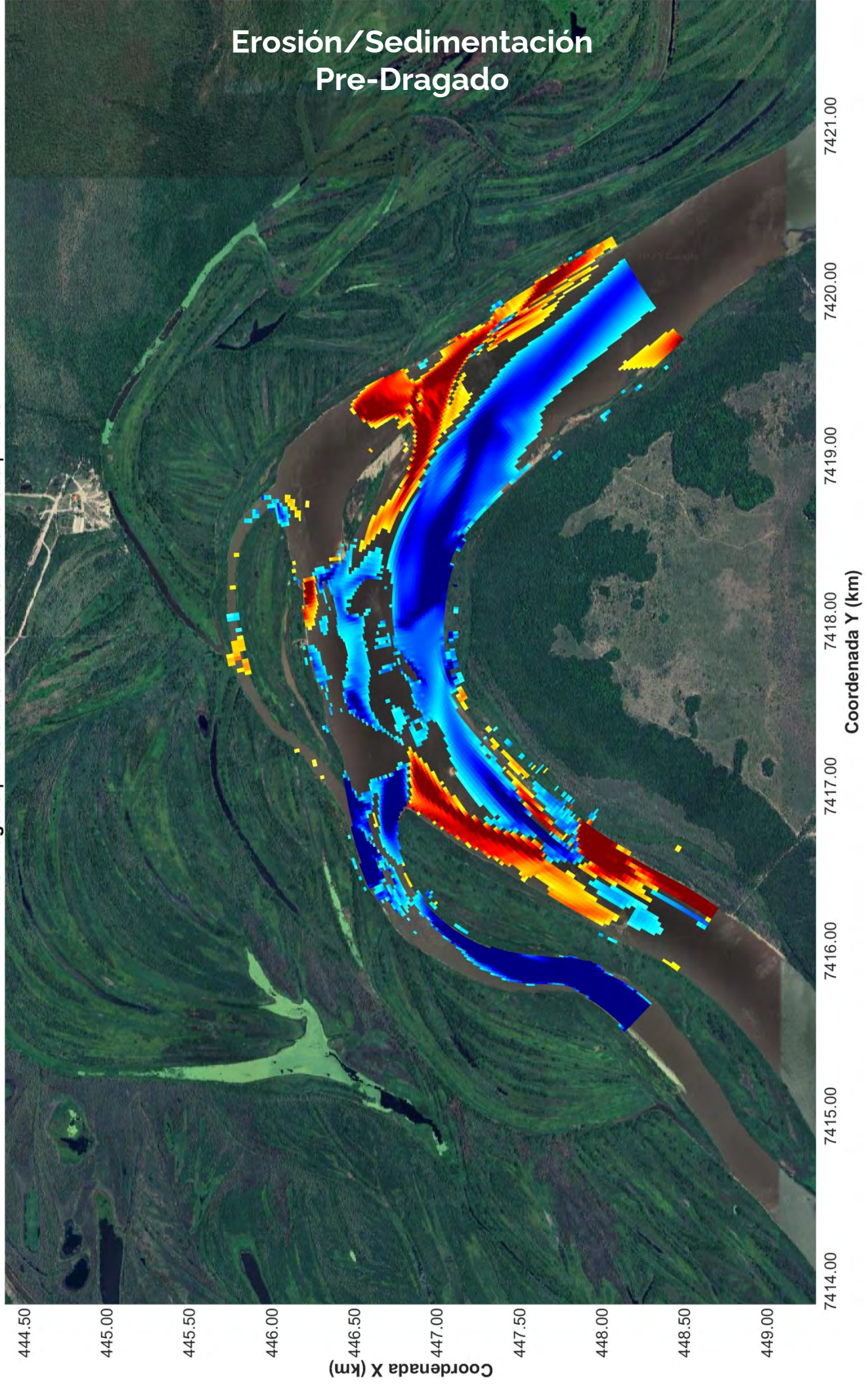
Pre-Dragado | Erosión / Sedimentación Acumulada | Año 4



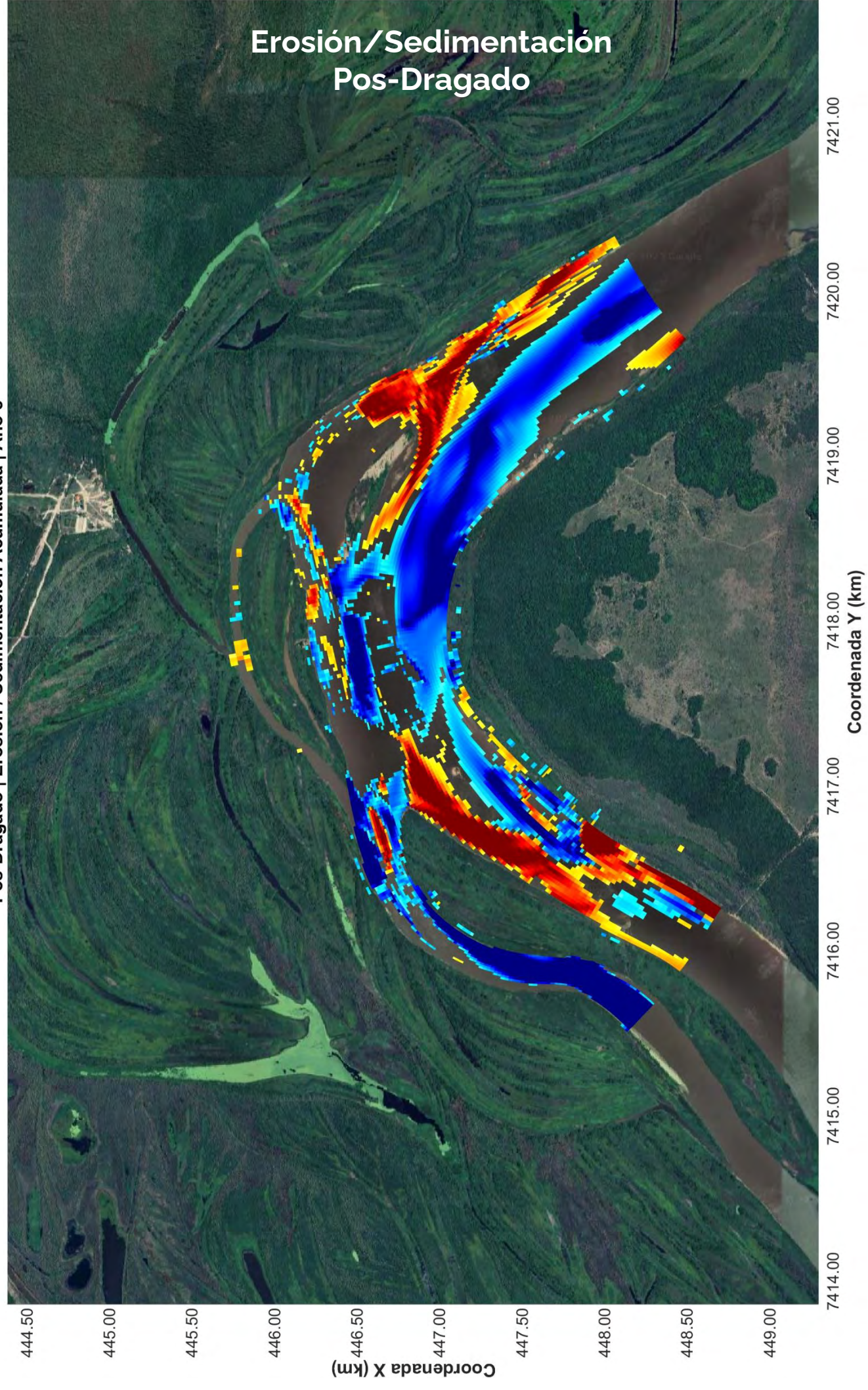
Pos-Dragado | Erosión / Sedimentación Acumulada | Año 4



Pre-Dragado | Erosión / Sedimentación Acumulada | Año 5



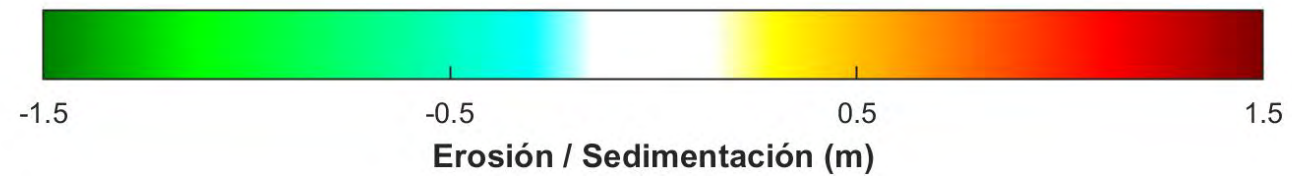
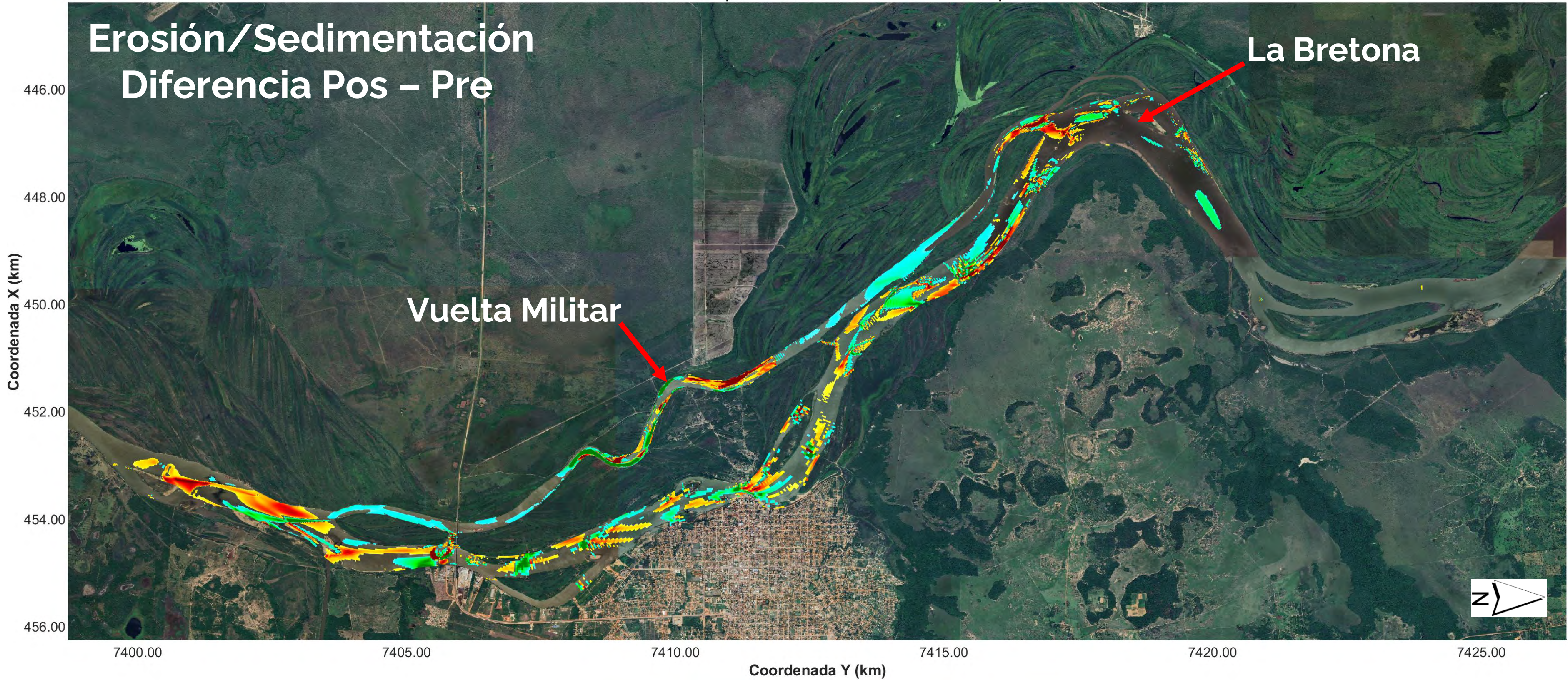
Pos-Dragado | Erosión / Sedimentación Acumulada | Año 5



Resultados Morfodinámicos

Diferencia de
Erosión/Sedimentación:
Pos – Pre (5 Años)

Erosión / Sedimentación Diferencia Pos – Pre



Erosión / Sedimentación Diferencia Pos – Pre

La Bretona

Vuelta Militar

Coordenada X (km)



7400.00

7405.00

7410.00

7415.00

7420.00

7425.00

Coordenada Y (km)



-1.5

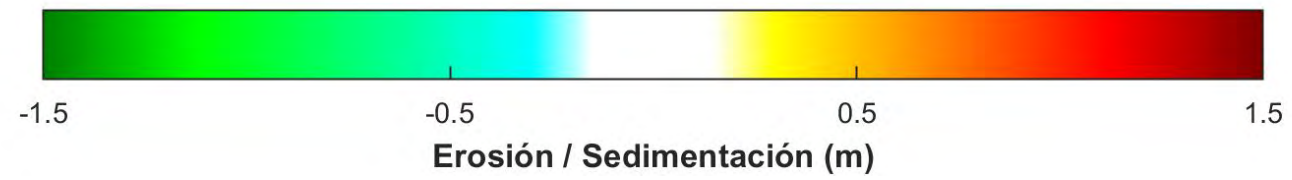
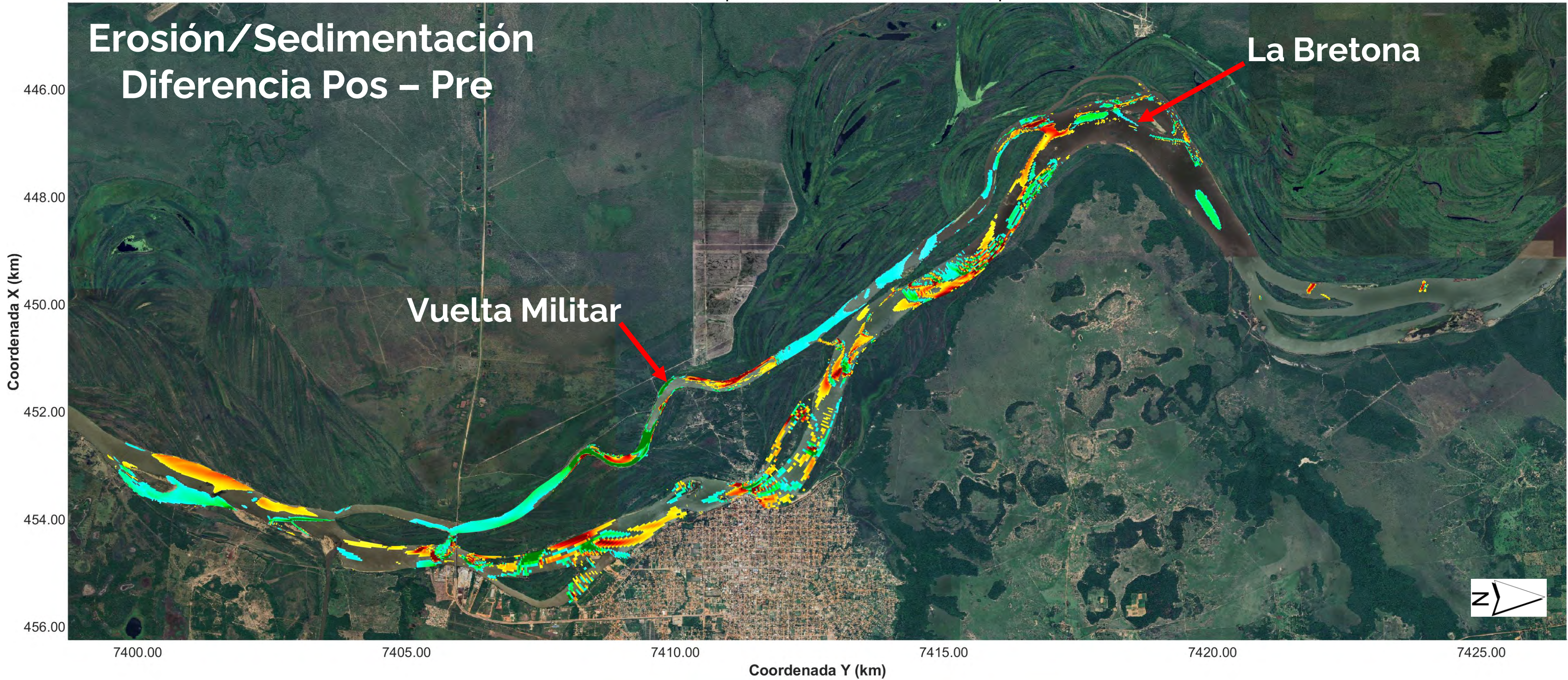
-0.5

0.5

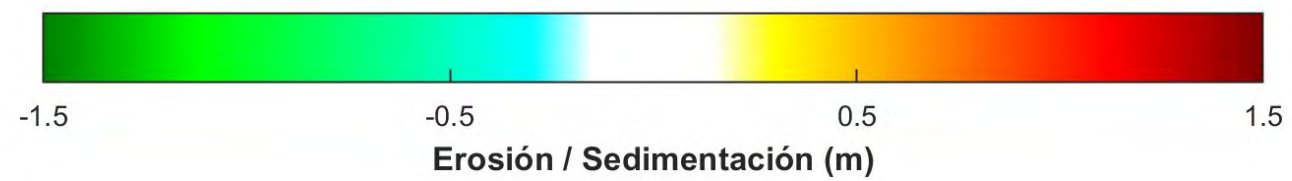
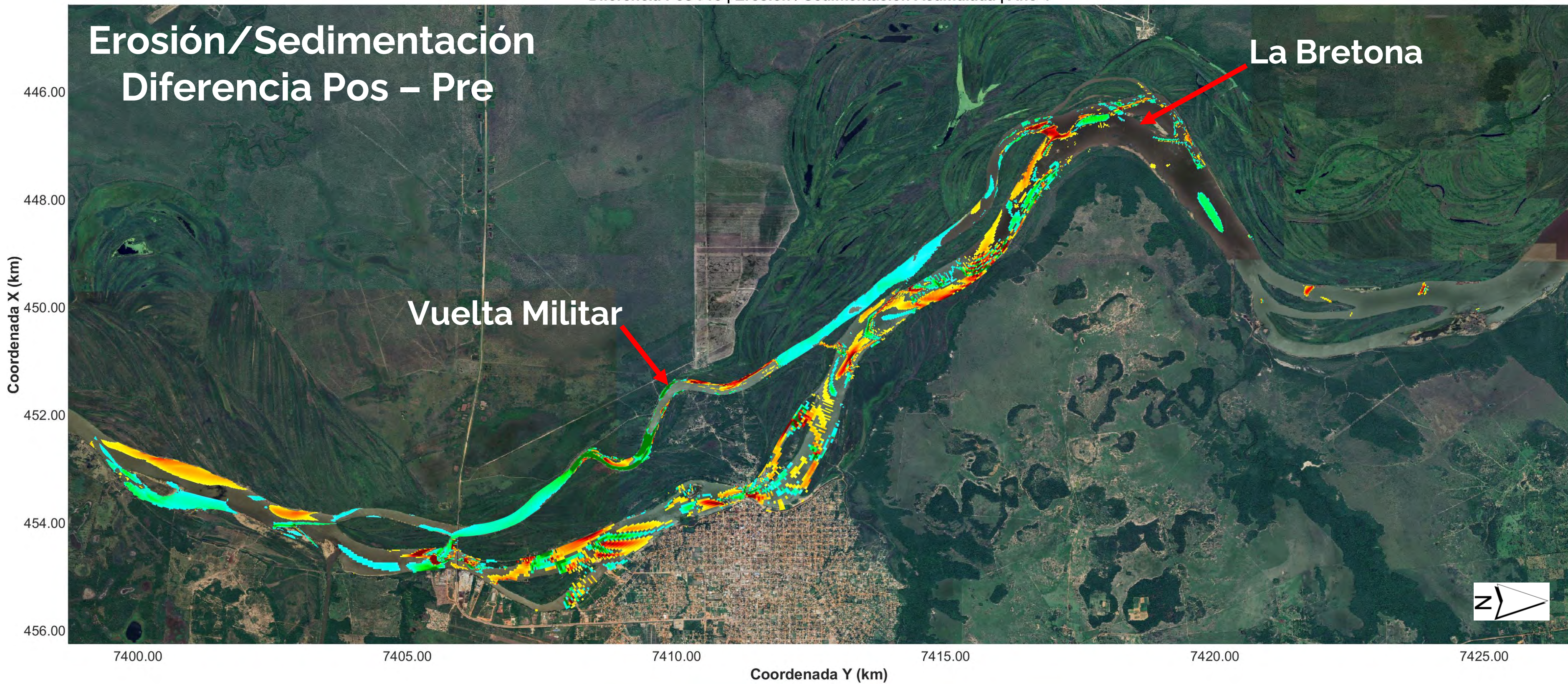
1.5

Erosión / Sedimentación (m)

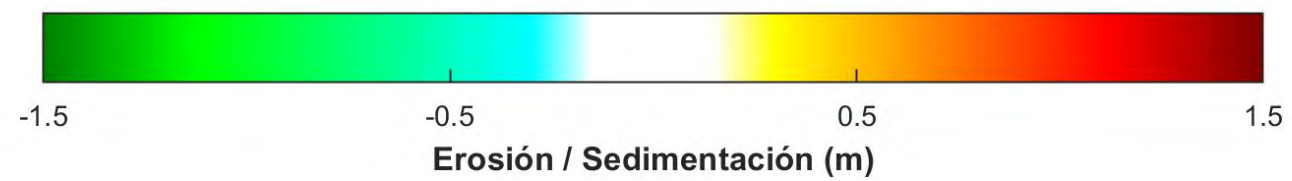
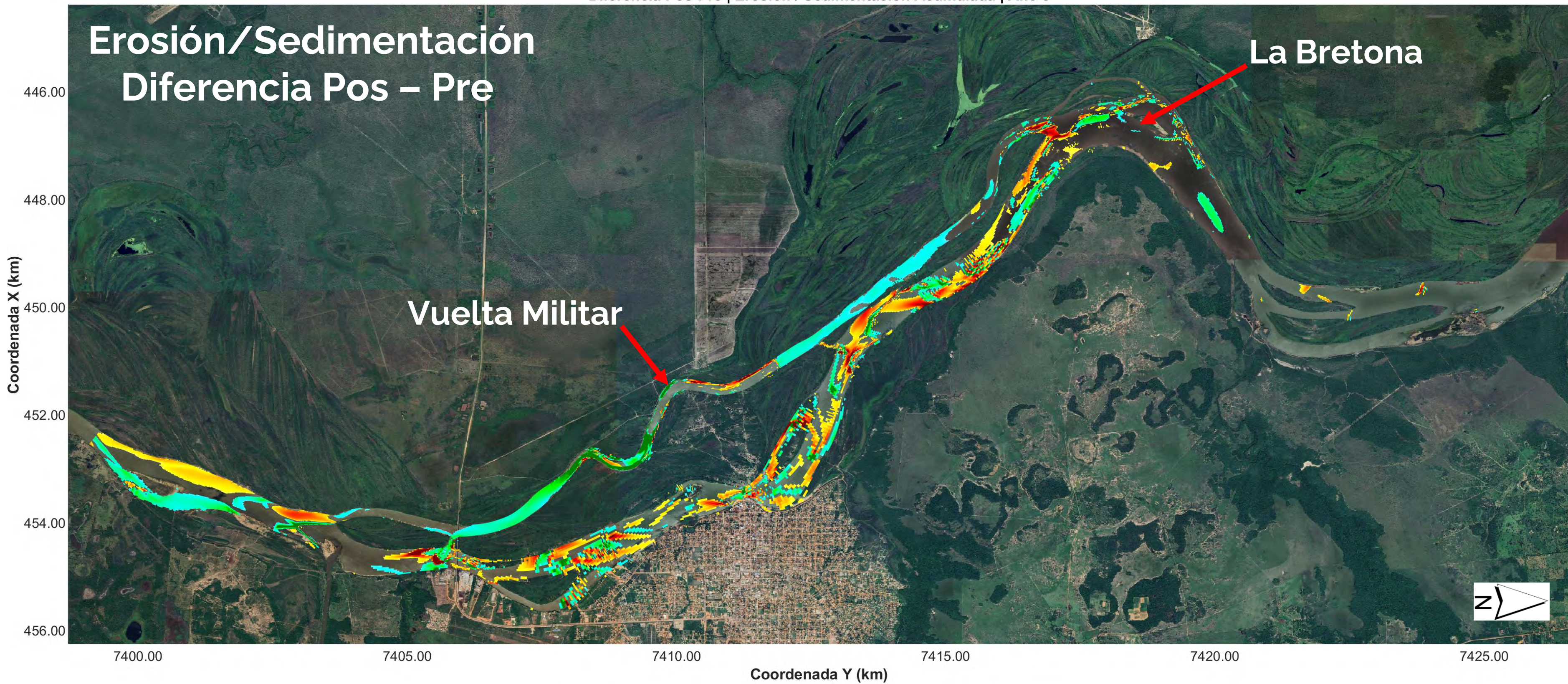
Erosión / Sedimentación Diferencia Pos – Pre



Erosión / Sedimentación Diferencia Pos – Pre



Erosión / Sedimentación Diferencia Pos – Pre



Resultados Morfodinámicos

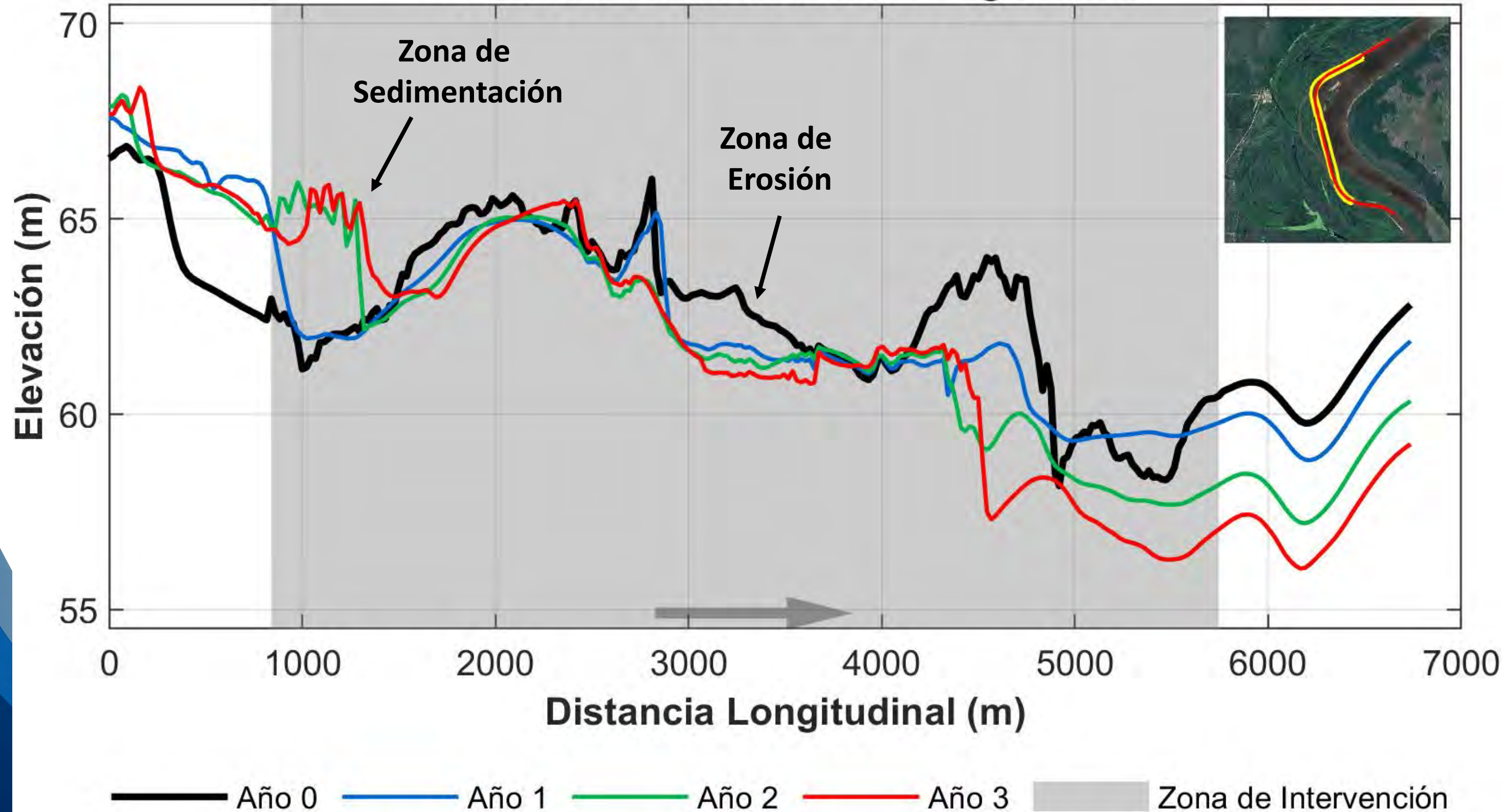
Evolución del Bed Level:
Secciones Transversales

Resultados Morfodinámicos

**Evolución del Bed Level:
Secciones Longitudinales**

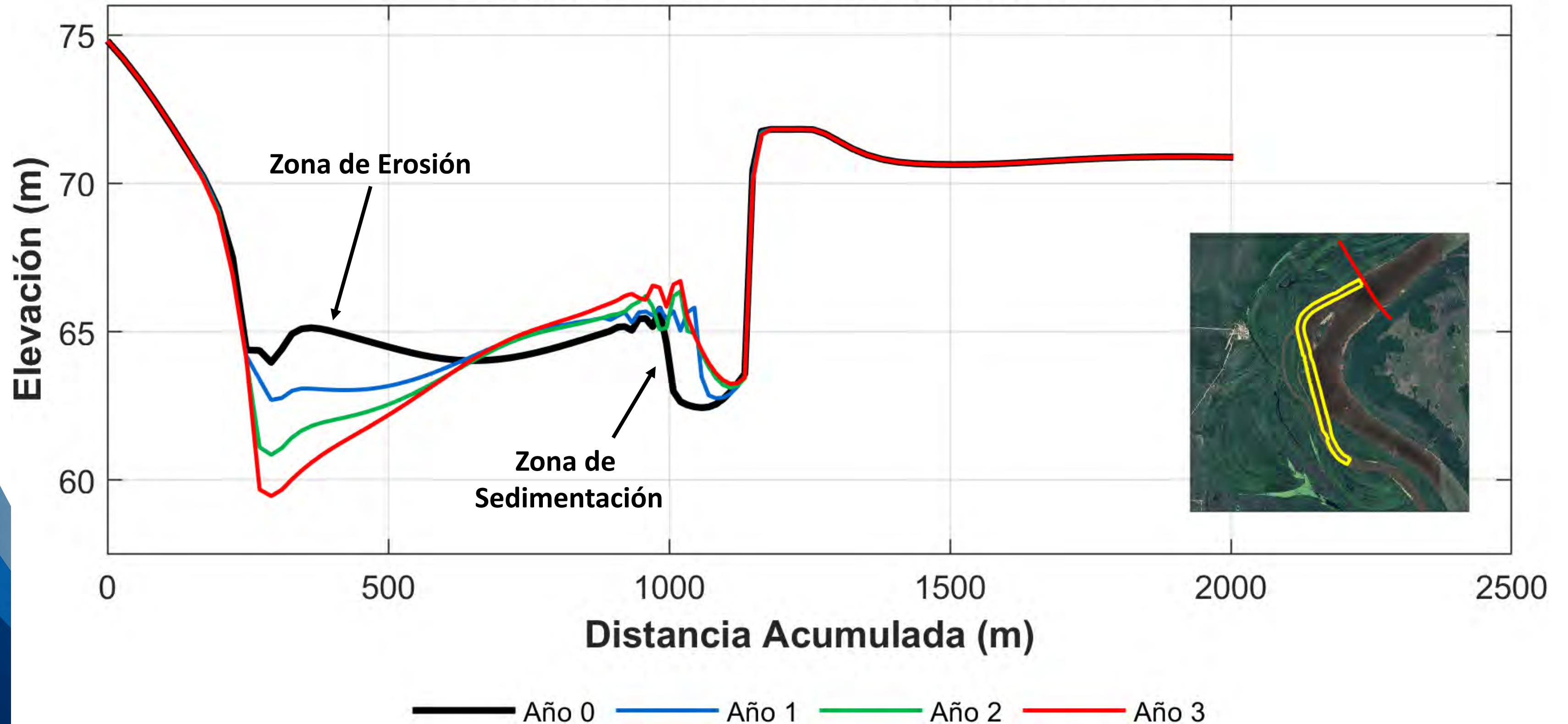
Resultados Morfodinámicos

Evolución Morfodinámica Longitudinal



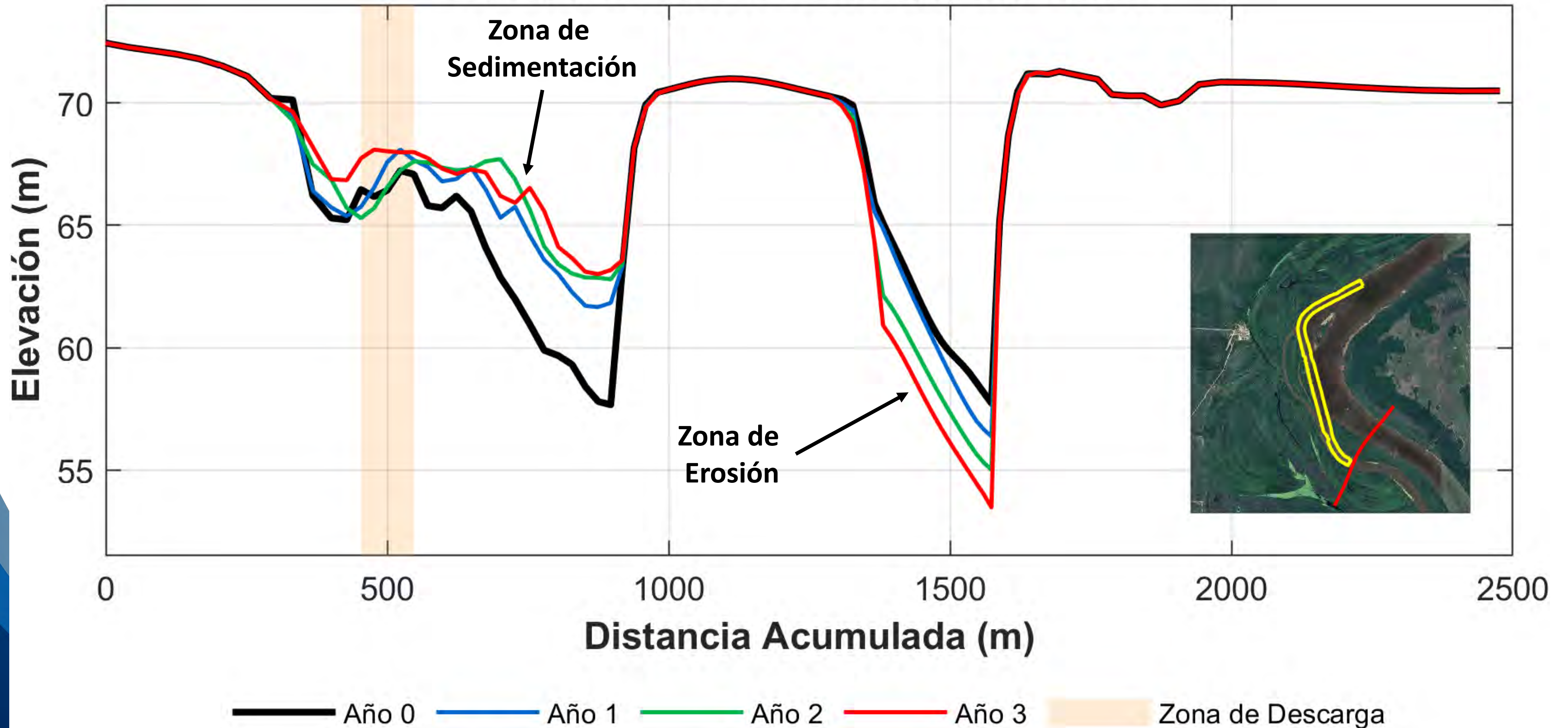
Resultados Morfodinámicos

Evolución Morfodinámica: Sección 1

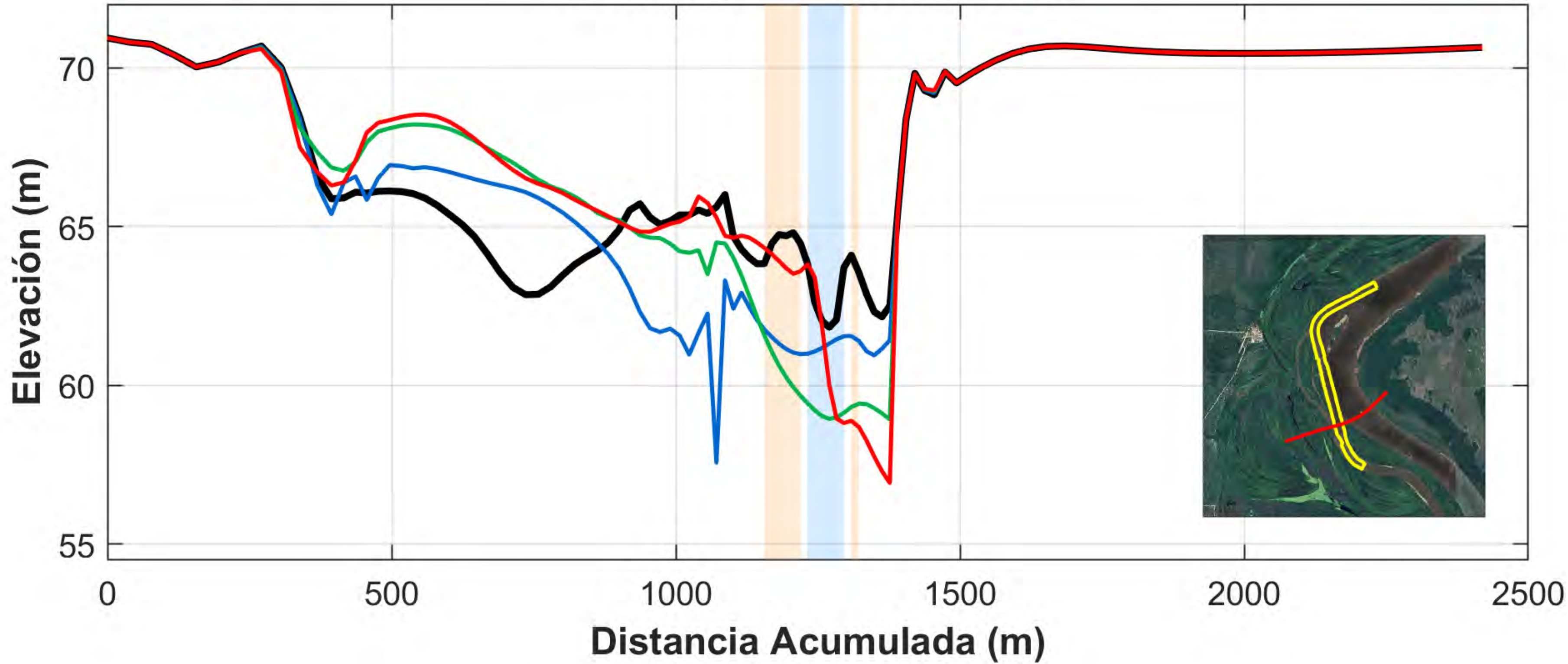


Resultados Morfodinámicos

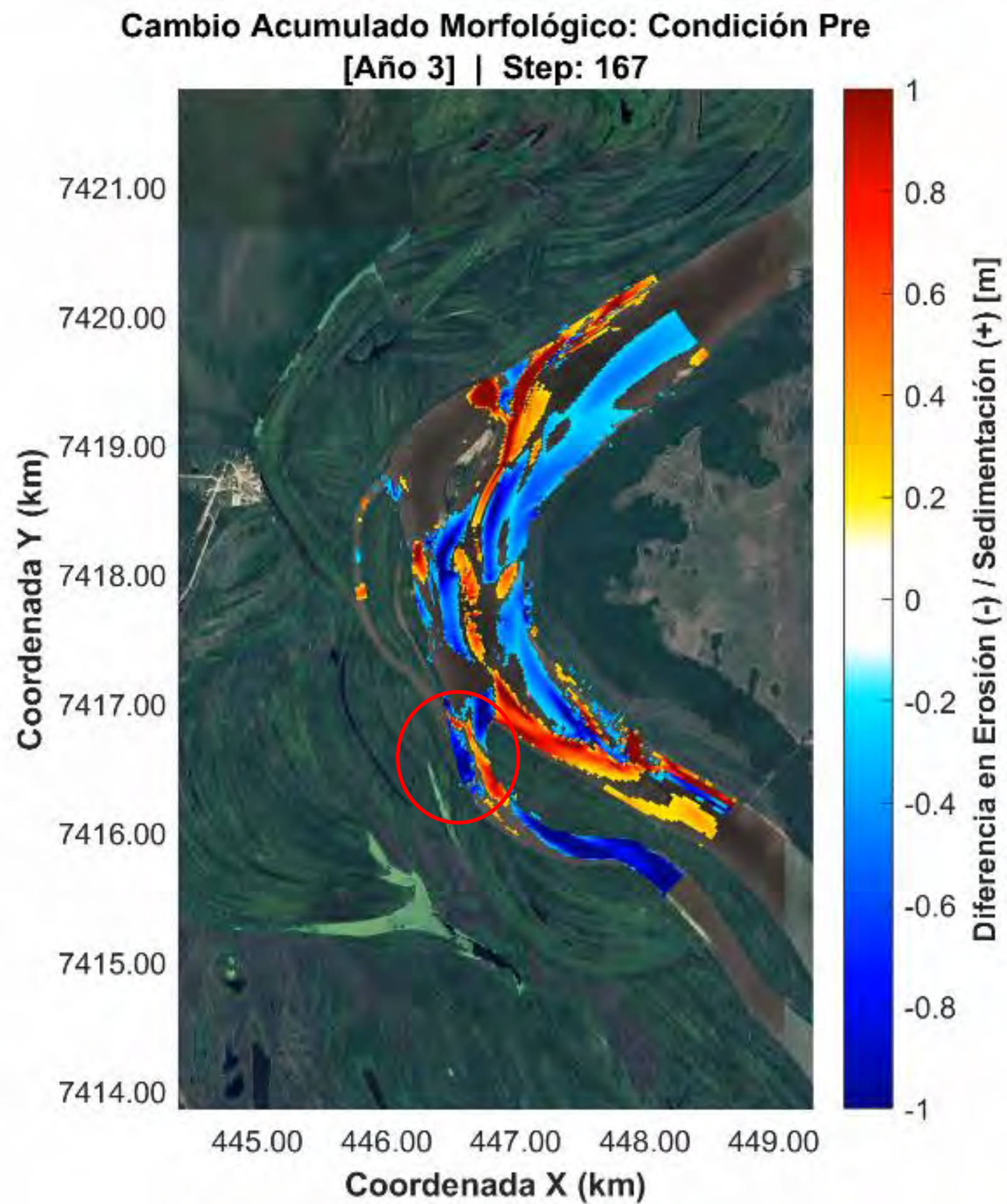
Evolución Morfodinámica: Sección 5



Evolución Morfodinámica



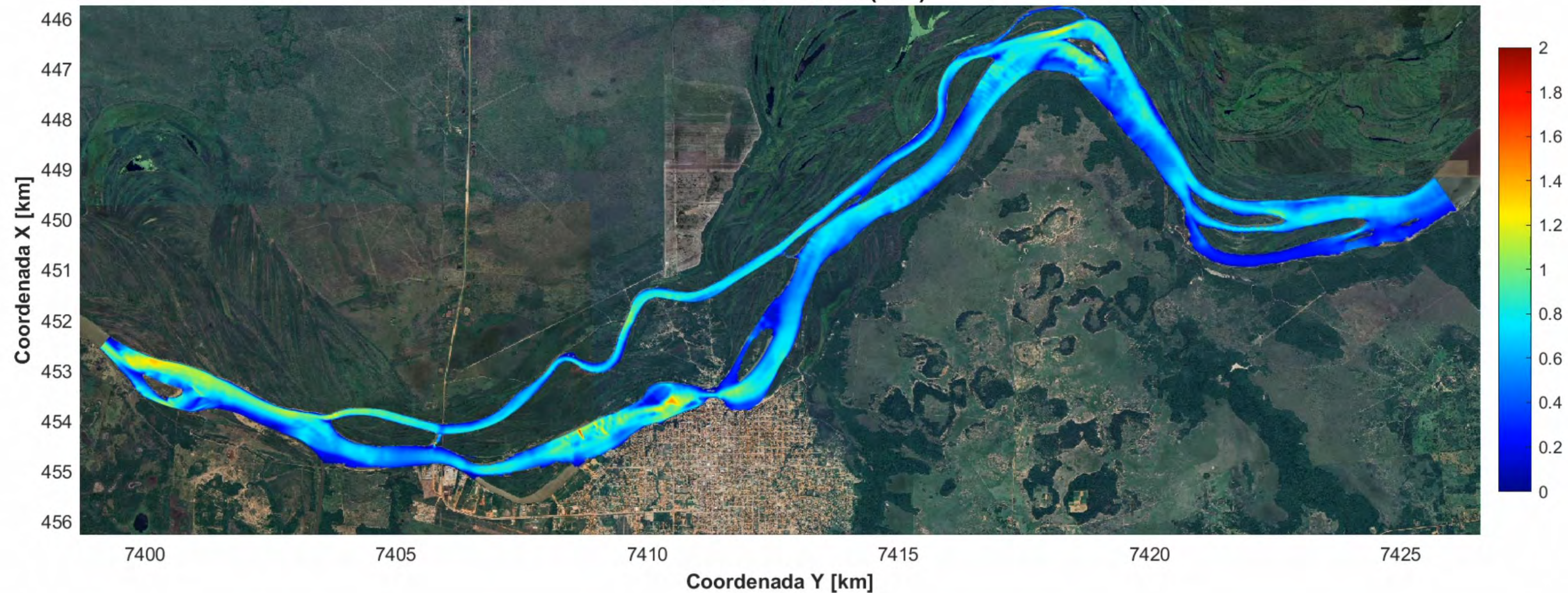
— Año 0 — Año 1 — Año 2 — Año 3 — Zona de Descarga — Zona de Intervención



Videos

Estabilización del Modelo

Velocidad en Planta (m/s)



Perfil Hidráulico: Lecho vs Pelo de Agua



Siguientes Pasos

- Monitoreo
- Relevamientos batimétricos y de caudales Anuales
- Levantamiento del Perfil Hidráulico del Pelo de Agua



MUCHAS GRACIAS

Contactos: albertogrissetti@gmail.com anaespinalar@gmail.com